



HAL
open science

Effet du calcul mental et de la comparaison de nombres sur la performance de mouvements complexes

Joy Khayat

► **To cite this version:**

Joy Khayat. Effet du calcul mental et de la comparaison de nombres sur la performance de mouvements complexes. Education. Université de Lyon; Université Libanaise, 2019. Français. NNT : 2019LYSE1313 . tel-02955509

HAL Id: tel-02955509

<https://theses.hal.science/tel-02955509>

Submitted on 2 Oct 2020

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

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



N° d'ordre NNT : xxx

THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON

opérée au sein de

l'Université Claude Bernard Lyon 1

Ecole Doctorale N° ED 205

Ecole Doctorale Interdisciplinaire Science-Santé

Spécialité de doctorat : STAPS

(Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives)

Soutenue publiquement le 05/12/2019, par :

Joy KHAYAT

**Effet du calcul mental et de la comparaison de nombres
sur la performance de mouvements complexes**

Sous la direction de :

FARGIER Patrick, MCF-HDR, Université Lyon 1, Directeur
RIFAI SARRAJ Ahmad, PU, Université Libanaise, Directeur
DIAB Ahmad, MCF, Université Libanaise, Co-directeur

Rapporteurs :

ABU FARAJ Ziad, PU, American University of Science & Technology, Beyrouth
MOHAMMED Samer, PU, Université Paris-Est-Créteil
PINTI Antonio, MCF-HDR, Université de Valenciennes

Devant le jury composé de :

MOHAMMED Samer, PU, Université Paris-Est-Créteil, Rapporteur
PINTI Antonio, MCF-HDR, Université de Valenciennes, Rapporteur
GUILLET Emma, MCF-HDR, Université Lyon 1, Examinatrice
KHALIL Mohammed, PU, Université Libanaise, Examineur
MARQUE Catherine, PU, Université de Technologie de Compiègne, Examinatrice
RIHANA Sandy, Professeure Associée, Université Saint Esprit de Kaslik, Examinatrice
FARGIER Patrick, MCF-HDR, Université Lyon 1, Directeur
RIFAI SARRAJ Ahmad, PU, Université Libanaise, Directeur

A ma famille qui m'a appris ce qu'amour,
sacrifice et courage veulent dire. Merci de ne
jamais cesser de croire en moi et de représenter la
lumière d'espoir qui me guidait à travers les
moments de doute. Que ce travail soit
l'expression des vœux que vous n'avez cessé de
formuler dans vos prières.

A ma belle-famille qui m'a toujours soutenu et
aidé à aboutir à cette thèse. Que dieu vous
préserve santé et longue vie.

A mon mari qui est une source infinie d'amour,
de tendresse et de courage. C'est grâce à ton
soutien, ta patience et ta gestion que j'ai pu
persister et finir ma thèse.

A ma chère cousine qui m'a aidé tout au long de
ma thèse.

A tous mes amis.

Remerciements

Il me sera très difficile de remercier tout le monde car c'est grâce à l'aide de nombreuses personnes que j'ai pu mener cette thèse à son terme.

Je tiens à remercier mon directeur de thèse du côté français, le Dr. FARGIER Patrick, Maître de Conférences HDR, qui m'a encadré tout au long de cette thèse, pour toute son aide grâce à laquelle le travail a avancé à grands pas. Je suis ravie d'avoir travaillé en sa compagnie car outre son appui scientifique, il a toujours été là pour me soutenir, me guider et me conseiller au cours de l'élaboration de cette thèse. Je le remercie également pour sa persistance et ses remarques qui m'ont permis d'envisager mon travail sous un autre angle.

Je remercie également mon directeur de thèse du côté Libanais, le Professeur RIFAI SARRAJ Ahmad, qui m'a non seulement accompagné durant le diplôme de master lorsque j'étais de ses élèves, mais cette thèse est le fruit d'une collaboration de plus de cinq ans avec lui. C'est à ses côtés que j'ai compris ce que rigueur et persévérance voulaient dire. Qu'il soit aussi remercié pour sa disponibilité permanente, pour les nombreux encouragements qu'il m'a prodigués et sa confiance en moi qui m'a permis d'être la première physiothérapeute inscrite en doctorat en cotutelle entre l'Université Libanaise et l'Université de Lyon.

Il m'est également impossible d'oublier le Professeur Honoraire MASSARELLI Raphaël pour son aide précieuse pour ma thèse ainsi que le Dr. CHAMPELY Stéphane pour son aide déterminante en matière d'analyse statistique.

Je tiens aussi à remercier le Professeur KHALIL Mohammad, Directeur du Centre Azm pour la Recherche en Biotechnologie et ses Applications, qui m'a accueilli au sein de son laboratoire. C'est grâce à lui que j'ai pu concilier avec bonheur recherche théorique et appliquée pendant cette thèse.

Je tiens à remercier particulièrement le Dr. DIAB Ahmad, co-directeur de ma thèse, pour toutes nos discussions et ses conseils techniques qui m'ont accompagné tout au long de ma thèse.

Je tiens aussi à remercier le Dr. DAHER Alaa pour son aide technique, ainsi que le temps qu'il a consacré pour concevoir l'appareil de pointage indispensable à mon étude expérimentale.

Mes grands remerciements vont à toutes celles et ceux qui m'ont aidé à réaliser mes études expérimentales.

J'adresse tous mes remerciements à Messieurs ABOU FARAJ Ziad, Professeur à l'Université Américaine de Sciences et Technologie, MOHAMMED Samer, Professeur à l'Université de Paris-Est Créteil et PINTI Antonio, Maître de Conférences HDR à l'Université de Valenciennes, de l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être rapporteurs de cette thèse.

Enfin j'exprime ma gratitude à Mesdames GUILLET-DESCAS Emma, Maître de Conférences HDR à l'Université Lyon 1, MARQUE Catherine, Professeur des Universités à l'Université de Technologie de Compiègne et RIHANA Sandy, Professeure associée à l'Université Saint-Antoine de Kaslik ainsi qu'à Monsieur KHALIL Mohammed, Professeur à l'Université Libanaise, qui ont bien voulu être examinateurs.

RESUME - ABSTRACT

RESUME, ABSTRACT

Résumé

Les nombres et les opérations sur les nombres contribuent à donner forme à notre rapport à l'environnement au point que ceux-ci font l'objet d'un enseignement scolaire spécifique. Au-delà de cet impact social et éducatif, il en va du fonctionnement cérébral de l'humain. Des études ont ainsi cherché à comprendre les mécanismes cérébraux responsables de la cognition numérique ou encore à clarifier, de ce point de vue, les causes de la dyscalculie.

Alors que le sens commun associe les nombres et les opérations sur les nombres au domaine de l'abstraction, ces travaux-ci ont suggéré que les représentations mathématiques s'ancrent dans des expériences corporelles et/ou que la cognition numérique et la préparation du mouvement sont sous-tendues par des mécanismes cérébraux en partie similaires. Le recours aux doigts pour apprendre à compter ou calculer pourrait ainsi, par la suite, avoir des conséquences sur les mécanismes cérébraux sous-tendant le traitement numérique (*e.g.* : lecture d'un nombre) ou la performance arithmétique (*e.g.* : soustraction mentale).

Des études comportementales ont ainsi montré que la gnose des doigts constitue un prédicteur de la performance arithmétique de l'enfant. D'autres études ont montré que le recours à une gestuelle ou à la manipulation d'un boulier est de nature à favoriser, chez l'enfant, la réalisation de calculs en l'absence de mouvement. Si le développement de la cognition numérique pourrait ainsi être sous-tendu par des processus moteurs et/ou sensorimoteurs, des études ont aussi suggéré que de tels processus restent influents dans la cognition numérique chez l'adulte.

En cohérence, des études recourant à l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle ont avéré une activation accrue du cortex prémoteur durant un traitement numérique réalisé, en l'absence de mouvement, par des sujets adultes. Plusieurs études de ce type ont aussi montré une activation accrue des régions cérébrales motrices (notamment du cortex prémoteur), voire sensori-motrices, durant des tâches arithmétiques, en particulier chez l'adulte. L'une d'elles a en outre montré que cette activation peut être accrue par la complexité du calcul, ce qui suggère une influence des demandes propres des tâches arithmétiques (et pas seulement du traitement numérique suscité par celles-là, donc).

Une série d'études concourt dès lors à indiquer l'existence d'une relation entre préparation du mouvement et traitement numérique ou réalisation d'une tâche arithmétique. En complément, d'autres études ont suggéré que des processus d'attention visuo-spatiale similaires puissent être requis pour effectuer mentalement certaines tâches numériques ou arithmétiques (*i.e.* : addition, soustraction), en raison d'une représentation des nombres qui serait spatialement organisée, et pour contrôler la direction d'un mouvement.

Les études évoquées jusqu'ici avèrent soit l'effet d'un mouvement sur une tâche numérique ou arithmétique, soit l'activation accrue, pendant l'effectuation de telles tâches, sans mouvement, de mécanismes cérébraux impliqués dans la préparation du mouvement. Il existe en outre des études, en moindre nombre, montrant qu'une tâche numérique ou arithmétique peut influencer sur la performance d'un mouvement subséquent. Elles intéressent pour l'essentiel des mouvements des doigts ou de la main, réalisés dans la quasi-totalité des cas sans contrainte d'intensité. A

priori, seule une étude a examiné l'effet d'une tâche arithmétique (soustraction complexe) sur un mouvement autre que manuel (saut vertical) et à intensité maximale, montrant l'influence positive de ce calcul sur la performance motrice (hauteur de saut).

Les protocoles de l'ensemble des études ainsi évoquées recourent par ailleurs, de façon variable, à une diversité de formats numériques (nombres écrits en chiffres arabes, en toutes lettres ou représentés par des ensembles de points, essentiellement), sans examiner de façon systématique si la relation entre tâche numérique ou arithmétique et mouvement est affectée par le format numérique. Ce, alors que divers essais de modélisation de la cognition numérique suggèrent une possible influence du format numérique sur les mécanismes cérébraux mobilisés durant une tâche numérique ou arithmétique.

L'analyse de la littérature permet ainsi de dresser un panorama dans lequel on perçoit des zones d'ombre. Elle incite, d'abord, à approfondir l'étude de l'éventuel effet des tâches numériques ou arithmétiques sur la performance motrice. En ce cadre, au regard des tâches numériques et arithmétiques, la littérature invite à examiner : (1) la part imputable au traitement numérique dans la relation éventuelle entre une tâche arithmétique et une performance motrice, (2) si cette relation est affectée par la complexité de la tâche et/ou (3) par le format numérique. Au regard du mouvement, la littérature invite : (1) à ouvrir l'éventail des possibles en regard des seuls mouvements manuels et (2) à envisager plus avant le cas des mouvements à haute intensité.

Ces repères ont suscité deux ensembles d'expérimentations dans le cadre de la présente thèse. Ces expérimentations ont porté sur des sujets (206 au total) de sexe masculin, étudiants en Licence à la faculté de Santé Publique de l'Université Libanaise (Beyrouth, Liban).

Une première étude a examiné les effets de la lecture d'un nombre et de la soustraction mentale complexe (*i.e.* : un nombre à un chiffre à ôter à un nombre à deux chiffres), sur la performance d'un squat jump vertical à intensité maximale (hauteur de saut) et sur celle d'un pointage manuel à vitesse maximale (temps de réponse). Ces effets ont été mesurés dans deux séries expérimentales distinctes, l'une relative au saut, l'autre au pointage, avec en chaque cas deux expérimentations, l'une avec des nombres écrits en chiffres arabes, l'autre, avec des nombres écrits en toutes lettres. Les performances motrices mesurées ont été analysées en recourant à un modèle linéaire multi-niveaux à effets mixtes.

Concernant la lecture d'un nombre, les résultats ont seulement montré une amélioration très modérée (quoique statistiquement significative) de la hauteur de saut dans le cas des nombres écrits en toutes lettres. Au regard de la soustraction mentale, les résultats ont montré une nette amélioration de la performance en saut vertical ainsi qu'en pointage manuel, dans le seul cas des nombres en chiffres arabes.

Une deuxième étude a examiné les effets de divers types de calcul mental et de la comparaison de quantités sur la performance d'un mouvement de pointage manuel à vitesse maximale (temps de réponse). Trois expérimentations distinctes ont examiné, chacune, l'effet de la soustraction mentale complexe (*i.e.* : un nombre à un chiffre et un nombre à deux chiffres) et, respectivement, celui : (1) de l'addition mentale simple (*i.e.* : deux nombres à un chiffre) et de l'addition mentale complexe, (2) de la multiplication mentale simple et de la multiplication mentale complexe et (3) de la comparaison de deux nombres et de celle des quantités associées à deux ensembles de points. Les nombres étaient écrits en chiffres arabes. Les temps de réponse mesurés ont été analysés en recourant à un modèle linéaire multi-niveaux à effets mixtes.

Les résultats ont confirmé l'effet positif significatif de la soustraction mentale complexe sur le temps de réponse en pointage manuel et ont plus généralement avéré un tel effet positif de tous les calculs complexes ainsi qu'une absence d'effet des calculs simples. Les résultats ont aussi

montré un effet positif significatif de la comparaison de nombres sur la performance motrice et une absence d'effet de la comparaison d'ensembles de points.

En définitive, les résultats des deux séries d'études expérimentales indiquent, dans le cas d'un saut et d'un pointage à intensité maximale : (1) une absence d'effet ou un effet très modéré de la lecture d'un nombre sur la performance motrice, (2) une absence d'effet des calculs simples (addition, multiplication) sur la performance motrice, (3) des effets positifs très nets des calculs complexes (soustraction, addition et multiplication) et de la comparaison de nombres sur la performance motrice, dans le seul cas des nombres écrits en chiffres arabes (pas dans celui des calculs complexes avec nombres écrits en toutes lettres, ni dans celui de la comparaison des quantités associées à des ensembles de points).

Ces résultats suggèrent que la relation entre une tâche arithmétique et la performance d'un mouvement à haute intensité est affecté par le format numérique, le recours à un format en chiffres arabes conditionnant ici un effet positif net sur la performance motrice. Les résultats indiquent en outre que cette condition-ci n'est pas suffisante à cet effet-là. Ce dernier a en effet été observé seulement à la suite des tâches arithmétiques favorisant une manipulation mentale de quantités, c'est-à-dire le recours à des stratégies procédurales de solution, dans le cas des calculs les plus complexes (et pas seulement le recours à des résultats mémorisés), ou à la mise en place d'une relation entre deux quantités, dans le cas de la comparaison de nombres.

En regard de la littérature, il est envisageable que les effets mis en évidence des calculs mentaux complexes (soustraction, addition et multiplication) et de la comparaison de nombres, avec chiffres arabes, sur la performance motrice renvoient, en partie, à des processus distincts. Il est possible que le caractère usuel de ce format numérique et que le challenge lié à ces tâches arithmétiques aient induit un état émotionnel favorable à une performance motrice subséquente. Il est aussi concevable que, durant ces tâches arithmétiques, des mécanismes d'encodage et ou de représentation des nombres en mémoire de travail, spécifiques des chiffres arabes, aient influé sur la performance motrice. A tout le moins dans le cas de la soustraction et de l'addition, voire dans celui de la comparaison de nombres, il est également possible que des processus d'attention visuo-spatiale aient joué, centrant l'attention des sujets sur la trajectoire optimale du mouvement à produire. Les résultats obtenus sont, *in fine*, cohérents avec une mobilisation accrue, durant les tâches favorisant une manipulation mentale accrue des nombres et quantités, d'aires motrices cérébrales, influant possiblement sur la préparation du mouvement subséquent.

Abstract

Numbers and operations on numbers help shape our relationship to the environment to the point that they are a topic taught in school. Studies have also sought to understand the brain mechanisms responsible for numerical cognition or to clarify the neural bases of dyscalculia.

While common sense tends to associate numbers and operations on numbers to the realm of abstraction, these studies have suggested that mathematical representations may be rooted in bodily experiences and/or that numerical cognition and movement preparation may share similar cerebral mechanisms. The use of fingers to learn how to count or calculate might thus subsequently influence the cerebral mechanisms involved during numerical processing (e.g., number reading) or arithmetic performance (e.g., mental subtraction).

Behavioral studies have shown that finger gnosis is a predictor of arithmetic performance in children. Other studies have shown that the use of gestures or the manipulation of an abacus may favor, in children, the subsequent performance of calculations in the absence of actual movement. The development of numerical cognition could thus be influenced by motor and/or sensorimotor mechanisms and studies have also suggested that such mechanisms may remain influential in adults.

This was confirmed by neuroimaging studies showing an increased functional activation in the premotor cortex during numerical processing performed by adults in the absence of bodily movement. Other studies found increased functional activation of motor regions in the brain (especially of the premotor cortex) during arithmetical tasks realized by adults in the absence of overt movement. It was also found that such functional activation of motor regions is increased by complex calculations when compared to simpler calculations. This thus suggests that this activation is influenced by the involvement of procedural strategies to realize a calculation (and not only by the numerical treatment required).

A series of studies thus suggested the existence of a link between movement preparation and numerical processing or the realization of an arithmetical task. In addition other studies have suggested that spatial representations involved during numerical processing and/or mental calculation (i.e., addition and subtraction) and during the control of movement direction might require similar attentional mechanisms.

The behavioral studies and the neuroimaging studies evoked so far respectively showed the possible influence of movement upon the performance of numerical or arithmetical tasks and increased functional activation of motor regions in the brain during the performance of such tasks without actual movement. Fewer studies examined the possible influence of numerical or arithmetical tasks upon the performance of a subsequent movement. These studies have showed that both numerical and arithmetical tasks may influence motor performance. Such studies focused on finger and/or hand movements to be realized without requirement of intensity. To our knowledge only one study examined the influence of mental calculation (complex subtraction) on the performance of a movement other than manual (vertical jump) with maximal intensity. This study showed the positive influence of mental subtraction upon jump height.

Overall the studies examining a possible link between movement and both numerical and arithmetical tasks have used different numerical formats (numbers written in Arabic notation, numbers written as words, or numbers represented by dot ensembles). These studies did not examine the possible modulation, by the numerical format, of the relationship between a movement and a numerical or arithmetical task while several studies have suggested that the cerebral mechanisms involved in a numerical or arithmetical task might be modulated by the numerical format.

This analysis of the literature thus makes it possible to draw an outlook in which one perceives grey areas. It encourages, first, to deepen the study of the possible effect of a numerical or arithmetical task upon the performance of a subsequent movement. In this framework the literature leads to examine: (1) the part attributable to numerical processing in the possible relation between an arithmetical task and a motor performance, (2) if this relation is modulated by the complexity of the task and/or (3) by the numerical format. With regard to movement the literature invites: (1) to open up the range of possibilities beyond manual movements and (2) to examine further the case of high intensity movements.

These benchmarks gave rise to two sets of experiments in the context of this thesis. These experiments focused on male students (undergraduate; $n = 206$) at the Faculty of Public Health of the Lebanese University (Beirut, Lebanon).

A first study examined the respective effects of number reading and complex mental subtraction (i.e., a one-digit number to be removed from a two-digit number) on the performance of a vertical squat jump with maximum intensity (measured by the height of jump) and that of a manual-pointing movement with maximum velocity (measured by the response time). These effects were measured in two separate experimental series, one relating to the jump, the other to the pointing. In each case, two experiments were performed, one with numbers written in Arabic notation, the other with numbers written as words. The measured motor performances were analyzed using a linear multi-level mixed-effect model.

Regarding the reading of a number, the results only showed a moderate (although statistically significant) improvement in jump height, in the case of numbers written as words. With regard to mental subtraction, the results showed a clear-cut improvement of the performance in both vertical jump and manual pointing, in the only case of numbers in Arabic notation.

A second study examined the effects of various types of mental arithmetic and the comparison of quantities on the performance of a manual-pointing movement with maximum velocity (response time). Three separate experiments each examined the effect of complex mental subtraction (i.e., a one-digit number and a two-digit number) and, respectively, that of: (1) simple mental addition (i.e., two one-digit numbers) and complex mental addition, (2) simple mental multiplication and complex mental multiplication, and (3) the comparison of two one-digit numbers and the comparison of two dot ensembles. The numbers were written in Arabic notation. The measured response times were analyzed using a multi-level linear mixed-effect model.

The results confirmed the statistically significant effect of complex mental subtraction on manual-pointing response time. More generally the results showed such a positive effect of all complex calculations and no effect of simple calculations on manual-pointing response time. The results also showed that manual-pointing performance is favored by number comparison but not by the comparison of dot ensembles.

The results of the two series of experimental studies showed, in the case of a vertical jump and a manual-pointing movement with maximum intensity: (1) either no effect, or a moderate effect, of number reading on motor performance, (2) no effect of simple calculations (addition and multiplication) on motor performance, (3) a positive and clear-cut effect of more complex calculations (subtraction, addition, and multiplication) and of number comparison, with numbers written in Arabic notation, on motor performance (no effect of complex subtraction with numbers written as words and of the comparison of dot ensembles).

These results suggest that the relationship between an arithmetical task and the performance of a high-intensity movement is influenced by the numerical format. It was found that the use of Arabic digits (but not the use of numbers written as words or represented by dot sets) is a

condition to a positive effect of an arithmetical task upon motor performance. The results also showed that this condition is not sufficient. Motor performance was found to be improved only after arithmetical tasks (with Arabic digits) favoring a mental manipulation of quantities (i.e., to realize complex calculations or to establish a mathematical relation between two quantities). Motor performance was thus found to be improved by arithmetical tasks favoring the use of procedural strategies and not by arithmetical tasks favoring the use of retrieval strategies (of arithmetical facts).

With regard to the literature, the effects of the complex calculations (subtraction, addition and multiplication) and of number comparison, with Arabic notation, on motor performance may be explained by different mechanisms. It is possible that the usual character of this numerical format and the challenge related to these arithmetical tasks induced an emotional state favoring a subsequent motor performance. The effect of complex calculations and number comparison, with Arabic digits, on motor performance might also be linked to mechanisms of encoding and/or memorization specific to this numerical format. Attention to the optimal path of movement might also have been favored by the spatial representation of number used to realize complex calculation and, possibly, to compare numbers. The influence of complex calculation and of number comparison, with Arabic digits, on motor performance might also be driven by a possible involvement, during actual calculation and comparison, of motor regions in the brain.

Table des matières

PARTIE I. INTRODUCTION.....	p. 1
1. Tâches numériques et arithmétiques : influence des expériences (sensori)motrices.....	p. 3
1.1. <i>Le recours aux doigts dans les acquisitions numériques et arithmétiques.....</i>	p. 4
1.2. <i>Gnose des doigts et prédiction des performances numériques et arithmétiques.....</i>	p. 7
1.3. <i>Gestuelle et acquisitions mathématiques.....</i>	p. 9
1.4. <i>Expériences corporelles et cognition numérique : enfants et adultes.....</i>	p. 11
1.5. <i>Synthèse.....</i>	p. 12
2. Mouvement, traitement numérique, arithmétique et cerveau.....	p. 14
2.1. <i>Régions motrices cérébrales et cortex prémoteur.....</i>	p. 14
2.2. <i>Traitement numérique et cortex prémoteur.....</i>	p. 17
2.3. <i>Tâches arithmétiques et cortex prémoteur.....</i>	p. 20
2.4. <i>Synthèse.....</i>	p. 23
3. Représentation mentale des nombres, attention visuo-spatiale et mouvement.....	p. 25
3.1. <i>L'hypothèse d'une ligne numérique mentale.....</i>	p. 25
3.2. <i>Effet SNARC.....</i>	p. 28
3.3. <i>Traitement numérique, tâches arithmétiques et contrôle directionnel du mouvement.....</i>	p. 30
3.4. <i>Représentation spatiale des nombres et expériences motrices ou sensorimotrices.....</i>	p. 33
3.5. <i>Ouverture.....</i>	p. 36
4. Effet du traitement numérique ou d'une tâche arithmétique sur le mouvement.....	p. 38
4.1. <i>Effet du traitement numérique sur le mouvement.....</i>	p. 38
4.2. <i>Effet de tâches arithmétiques sur le mouvement.....</i>	p. 44
4.3. <i>Cas particulier des mouvements complexes à haute intensité.....</i>	p. 46
4.4. <i>Synthèse.....</i>	p. 47
5. Format numérique et modèles de la cognition numérique.....	p. 49
5.1. <i>Modèle de McCloskey (Abstract modular model).....</i>	p. 50
5.2. <i>Modèle de Campbell (Encoding-complex model).....</i>	p. 53
5.3. <i>Modèle de Dehaene (Triple-code model).....</i>	p. 55
5.4. <i>Format numérique et mouvement.....</i>	p. 59

6. Objet(s) d'étude	p. 62
6.1. <i>Relation entre mouvement et tâche numérique et/ou arithmétique : repères</i>	p. 62
6.2. <i>Relation entre mouvement et tâche numérique et/ou arithmétique : zones d'ombre</i>	p. 63
6.3. <i>Cap adopté dans la présente étude</i>	p. 65
<hr/>	
PARTIE II. MATERIELS ET METHODES	p. 68
1. Logique de travail	p. 69
1.1. <i>Séries expérimentales, expérimentations et groupes de sujets</i>	p. 70
1.2. <i>Design expérimental général</i>	p. 72
2. Tâches cognitives	p. 74
2.1. <i>Tâches cognitives de la Série 1</i>	p. 74
2.2. <i>Tâches cognitives de la Série 2</i>	p. 76
2.3. <i>Récapitulatif</i>	p. 78
3. Tâches motrices	p. 81
3.1. <i>Tâche de squat jump vertical</i>	p. 81
3.2. <i>Tâche de pointage manuel</i>	p. 83
4. Analyse statistique	p. 84
<hr/>	
PARTIE III. RESULTATS	p. 86
1. Expérimentations de contrôle	p. 87
2. Série 1	p. 89
2.1. <i>Effets de la soustraction mentale complexe sur la performance en squat jump vertical</i>	p. 89
2.2. <i>Effets de la soustraction mentale complexe sur la performance en pointage manuel</i>	p. 93
2.3. <i>Synthèse des résultats de la Série 1</i>	p. 96
3. Série 2	p. 98
3.1. <i>Effets de l'addition et de la multiplication sur la performance motrice</i>	p. 98
3.2. <i>Effet de la comparaison de quantités sur la performance motrice</i>	p. 101
3.3. <i>Synthèse des résultats de la Série 2</i>	p. 104
<hr/>	
PARTIE IV. DISCUSSION GENERALE	p. 106
1. Mise en perspective des résultats	p. 108
2. Le format numérique en tant que condition	p. 109
2.1. <i>L'hypothèse de l'encodage</i>	p. 110
2.2. <i>L'hypothèse de mécanismes de mémorisation spécifiques</i>	p. 112
2.3. <i>Une condition non suffisante</i>	p. 114

3. La manipulation mentale de quantités en tant qu'élément clé.....	p. 114
3.1. <i>Lecture de nombres et performance motrice.....</i>	p. 115
3.2. <i>Difficulté des tâches arithmétiques avec chiffres arabes et performance motrice.....</i>	p. 117
3.3. <i>Manipulation mentale de quantités et question des processus sous-jacents.....</i>	p. 118
4. La question de l'attention et du contrôle directionnel du mouvement.....	p. 120
4.1. <i>Représentation spatiale des nombres et mouvement.....</i>	p. 120
4.2. <i>Cas de la soustraction et de l'addition complexes.....</i>	p. 122
4.3. <i>Soustraction complexe, multiplication complexe et comparaison de nombres.....</i>	p. 124
5. Cognition numérique et processus cérébraux moteurs.....	p. 126
5.1. <i>Au plan comportemental.....</i>	p. 127
5.2. <i>Au regard des études en neuro-imagerie.....</i>	p. 129
5.3. <i>Stratégies procédurales et cortex prémoteur.....</i>	p. 130
V. SYNTHÈSE ET PERSPECTIVES.....	p. 132
REFERENCES.....	p. 140
PUBLICATIONS.....	p. 157
Publication 1.....	p. 158
Publication 2.....	p. 167
Publication 3.....	p. 198

Liste des Figures

PARTIE I - INTRODUCTION	
Figure 1 : Système chinois de comptage sur les doigts.....	p. 4
Figure 2 : Exemples de systèmes de comptage ancestraux.....	p. 5
Figure 3 : Exemple de calcul avec un boulier : $253 + 812$	p. 10
Figure 4 : Aperçu du cortex moteur.....	p. 15
Figure 5 : Modèle hypothétique de la connexion entre réseaux cérébraux cognitif et moteur.....	p. 16
Figure 6 : Aperçu des tâches d'estimation de quantités dans l'étude de Skagerlund et al. (2016).....	p. 19
Figure 7 : Tâches de discrimination des doigts et de calcul dans l'étude d'Andres et al. (2012).....	p. 21
Figure 8 : Exemples de formules à traiter dans l'étude de Friedrich et Friederici (2013).....	p. 22
Figure 9 : Positionnement de grandeurs sur une ligne bornée aux extrémités, selon l'âge.....	p. 26
Figure 10 : Effet SNARC : protocole et résultats.....	p. 28
Figure 11 : Effet d'une rotation latérale de la tête sur la génération aléatoire de nombres.....	p. 30
Figure 12 : Effet de la direction d'une marche à pieds sur la soustraction et l'addition mentales.....	p. 32
Figure 13 : Position des mains sur le clavier dans l'étude de Di Luca et al. (2008).....	p. 34
Figure 14 : Correspondances entre nombres et doigts dans l'étude de Di Luca et al. (2008).....	p. 35
Figure 15 : Dispositif expérimental de Rugani et al. (2017) et analyse du mouvement.....	p. 40
Figure 16 : Dispositif, protocole et résultats de l'étude de Lindemann et al. (2017).....	p. 42
Figure 17 : Exemple de résultats dans l'étude de Song et Nakayama (2008).....	p. 44
Figure 18 : Protocole expérimental de Pinhas et Fischer (2008).....	p. 45
Figure 19 : Modèle de la cognition numérique de McCloskey et collaborateurs.....	p. 50
Figure 20 : Représentation d'un jugement de parité dans le modèle de McCloskey.....	p. 52
Figure 21 : Représentation d'un jugement de parité dans le modèle de Campbell.....	p. 53
Figure 22 : Modèle de la cognition numérique de Dehaene.....	p. 56
Figure 23 : Représentation d'un jugement de parité dans le modèle de Dehaene.....	p. 57
Figure 24 : Modèle de Campbell et Epp (2004).....	p. 58
Figure 25 : Localisation anatomique des systèmes de codage dans le modèle de Dehaene.....	p. 60
PARTIE II – MATERIELS ET METHODES	
Figure 26 : Design des protocoles de contrôle.....	p. 72
Figure 27 : Design des protocoles expérimentaux.....	p. 73
Figure 28 : Squat jump vertical.....	p. 82
Figure 29 : Tâche de pointage manuel.....	p. 83

PARTIE III - RESULTATS

Figure 30 : Hauteurs de sauts par condition expérimentale (GE1 et GE2).....	p.	90
Figure 31 : Temps de réponse par condition expérimentale (GE3 et GE4).....	p.	94
Figure 32 : Temps de réponse par condition expérimentale (GE5 et GE6).....	p.	99
Figure 33 : Temps de réponse par condition expérimentale (expérimentations 7, n = 15).....	p.	102

PARTIE IV – DISCUSSION GENERALE

Figure 34 : L'encodage des inputs dans les modèles de la cognition numérique.....	p.	110
Figure 35 : Modèles de la cognition numérique et mémoire(s) durant les tâches arithmétiques.....	p.	112
Figure 36 : Aperçu du protocole expérimental de Li et al. (2018).....	p.	126

Liste des Tableaux

PARTIE II – MATERIELS ET METHODES	
Tableau 1 : Logique expérimentale.....	p. 70
Tableau 2 : Groupes de sujets.....	p. 72
Tableau 3 : Comparaison d'ensembles de points dans l'expérimentation 5.....	p. 78
Tableau 4 : Tâches cognitives par groupe et série expérimentale	p. 79
Tableau 5 : Indices de masse corporelle des sujets des groupes CG1, GE1 et GE2.....	p. 81
Tableau 6 : Scores (points) à l'inventaire d'Edinburgh	p. 83

PARTIE III – RESULTATS	
Tableau 7 : Performances du groupe CG1 en squat jump vertical	p. 88
Tableau 8 : Résultats des comparaisons multiples dans le groupe CG1.....	p. 88
Tableau 9 : Hauteurs de saut selon les conditions expérimentales (GE1 et 2).....	p. 90
Tableau 10 : Comparaisons multiples des hauteurs de sauts dans l'expérimentation 1 (n = 40).....	p. 91
Tableau 11 : Comparaisons multiples des hauteurs de sauts dans l'expérimentation 2 (n = 40).....	p. 92
Tableau 12 : Temps de réponse selon les conditions expérimentales (GE3 et GE4).....	p. 93
Tableau 13 : Comparaisons multiples des temps de réponse l'expérimentation 3 (n = 20).....	p. 94
Tableau 14 : Comparaisons multiples des temps de réponse dans l'expérimentation 4 (n = 20).....	p. 95
Tableau 15 : Temps de réponse dans les expérimentations 5 et 6.....	p. 99
Tableau 16 : Comparaisons multiples des temps de réponse dans l'expérimentation 5 (n = 15).....	p. 100
Tableau 17 : Comparaisons multiples des temps de réponse dans l'expérimentation 6 (n = 15).....	p. 101
Tableau 18 : Temps de réponse dans l'expérimentation 7.....	p. 102
Tableau 19 : Comparaisons multiples des temps de réponse dans l'expérimentation 7 (n = 15).....	p. 103

PARTIE I - INTRODUCTION

PARTIE I. INTRODUCTION

Il peut paraître surprenant d’engager un travail de thèse centré sur le mouvement humain dans ses relations avec le traitement numérique et/ou la performance arithmétique.

L’intérêt d’un travail d’élucidation des mécanismes sous-tendant la réussite des tâches numériques (*e.g.* : capacité à lire et comprendre un nombre présenté) et arithmétiques (*e.g.* : capacité à opérer sur les nombres), pour reprendre un distinguo suggéré par Arsalidou et Taylor (2011), semble en lui-même patent. Nombre d’activités requièrent par exemple l’effectuation de calculs mentaux. Ainsi une soustraction peut être utile pour anticiper la monnaie qui doit être rendue suite à un achat ou encore pour lire un rétro-planning, etc. Cet impact des nombres dans notre vie quotidienne a été jugé suffisamment important pour susciter un apprentissage spécifique dans le cadre scolaire (*e.g.* : Fuson, 1984). Rien d’étonnant, aussi, à ce que la recherche scientifique ait œuvré à clarifier les mécanismes cérébraux sous-tendant le traitement numérique ou la performance arithmétique (*e.g.* : Moeller, Willmes, & Klein, 2015) ou encore les soubassements cérébraux de la dyscalculie (*e.g.* : Butterworth, Varma, & Laurillard, 2011).

Il peut en revanche sembler, *a priori*, que ces mécanismes cérébraux n’aient guère à voir avec le mouvement. Le sens commun conforte en tout état de cause ce sentiment, celui-ci tendant à dissocier ce qui serait le fait de l’intellect, de l’esprit, et ce qui renverrait au physique, au corps. Pour autant, les travaux visant à comprendre comment les nombres sont mentalement représentés et manipulés ont suggéré que les représentations mathématiques pourraient s’ancrer dans les expériences corporelles des sujets (*e.g.* : Soylu, Lester, & Newman, 2018) et/ou que la cognition numérique et le mouvement pourraient mobiliser des mécanismes cérébraux en partie communs (*e.g.* : Andres, Seron, & Olivier, 2007).

Ainsi le travail ici présenté intéresse-t-il la possible relation entre mouvement et traitement numérique ou performance arithmétique, plus particulièrement sous l’angle de l’effet éventuel d’un traitement numérique ou d’une tâche arithmétique sur la performance de mouvements à haute intensité. Les chapitres qui suivent viseront dès lors à construire cet objet d’étude.

1. Tâches numériques et arithmétiques : influence des expériences (sensori)motrices

Plusieurs facteurs peuvent influencer sur le développement des habiletés mathématiques chez l'enfant. La construction de ces habiletés peut notamment être initialisée via des activités non-scolaires partagées avec l'entourage parental ou les pairs, facilitant et/ou renforçant l'accès à une éducation mathématique scolaire (e.g.: LeFevre et al., 2009). Plusieurs études ont ainsi montré que la pratique de jeux de société impliquant un recours aux nombres et/ou au calcul (jeu de l'oie, divers jeux de cartes, etc.) favorise la construction de compétences numériques et/ou arithmétiques, par exemple en ce qui concerne l'identification des nombres ou encore le comptage et la comparaison des quantités chez de jeunes enfants (Bjorklund, Hubertz, & Reubens, 2004; Ramani & Siegler, 2008; Starkey, Klein, & Wakeley, 2004). Dans ce type de jeux, les enfants associent bien souvent comptage ou calcul, éventuellement à haute voix, et mouvement, par exemple pour déplacer un pion d'un nombre de cases déterminé suite à un lancer de dé(s). La cooccurrence du comptage ou du calcul et d'un mouvement manuel invite dès lors ici à s'interroger sur l'éventualité d'un effet des expériences motrices et sensorimotrices sur les compétences numériques et arithmétiques des sujets.

En tout état de cause, si le sens commun associe généralement les mathématiques à des capacités cognitives de haut niveau, une série de travaux a concouru à suggérer que les représentations mathématiques pourraient être enracinées dans des mouvements corporels (locomotions et/ou mouvements segmentaires) précédemment expérimentés (e.g. : Soylu et al., 2018) et/ou que la cognition numérique et la préparation d'un mouvement pourraient être sous-tendus par des mécanismes cérébraux similaires (e.g. : Andres et al., 2007). Cette éventualité est notamment cohérente avec une idée phare des théories de la cognition incarnée selon laquelle toute représentation conceptuelle s'enracine dans l'expérience sensorimotrice du sujet (e.g. : Barsalou, 2008 ; 2010 ; Wiemers, Bekkering, & Lindemann, 2014). Selon Brouillet, Heurley, Martin, & Brouillet (2010, p. 134), ce courant de pensée défend que les processus cognitifs, y compris ceux parfois dits de haut-niveau (langage, mise en catégories, etc.), sont « *fondamentalement enracinés dans les états corporels présents et dans les systèmes sensori-moteurs du cerveau* ». Point de vue notamment partagé par Fischer (2017) pour ce qui concerne plus particulièrement la cognition numérique.

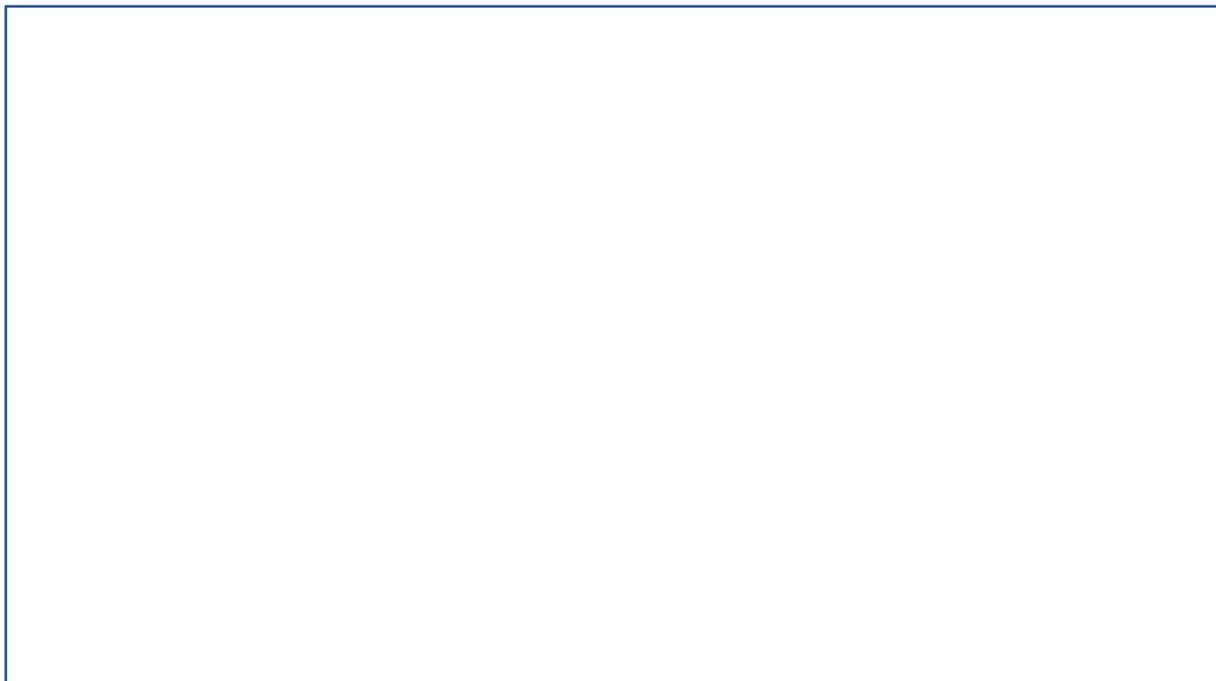
L'idée selon laquelle la cognition numérique n'est pas indépendante de processus sous-tendant la préparation voire la production du mouvement peut, en premier lieu, sembler accréditée par

l'usage relativement généralisé des doigts pour apprendre à compter et/ou calculer, ce qui sera envisagé ci-après.

1.1. Le recours aux doigts dans les acquisitions numériques et arithmétiques

Le recours aux doigts pour apprendre à compter, dénombrer ou effectuer des calculs simples apparaît relativement généralisé, par-delà des différences interculturelles, auxquelles peuvent venir s'ajouter des variations interindividuelles (*e.g.* : début du comptage à gauche ou bien à droite). Ainsi, alors que les européens ont recours aux doigts des deux mains pour représenter les nombres depuis un jusqu'à dix, les chinois utilisent une seule main (*e.g.* : Domahs, Moeller, Huber, Wilmes, & Nuerk, 2010), comme cela est illustré par la Figure 1.

Figure 1 – Système chinois de comptage sur les doigts

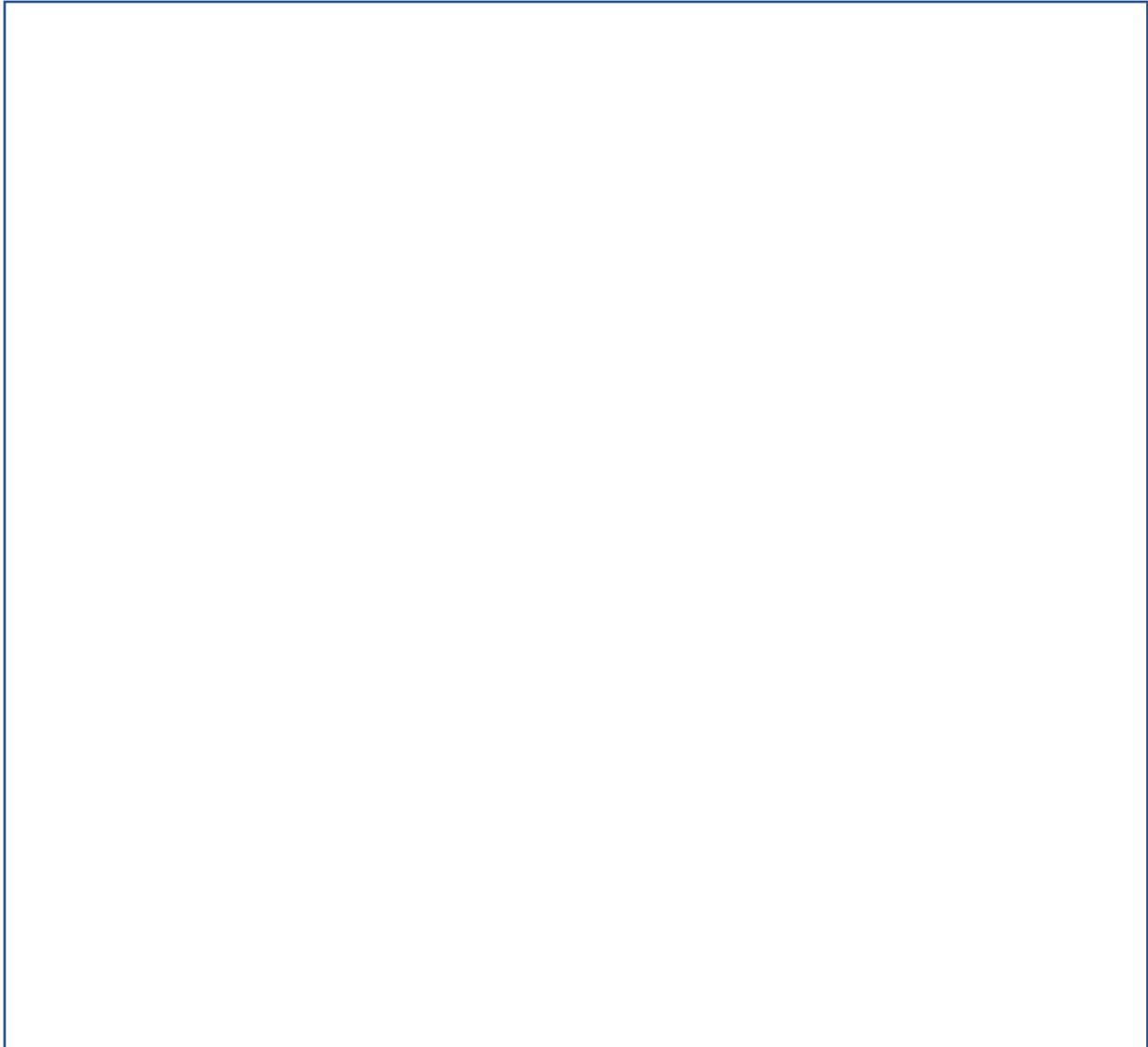


Dans le système de comptage chinois, les nombres depuis un jusqu'à cinq sont représentés de façon similaire à celle prévalant dans les cultures occidentales. En revanche, à partir de six, dans le système de comptage chinois, on continue d'utiliser une seule main. Le nombre dix peut être représenté par un croisement de l'index et du majeur ou par un croisement des index des deux mains. Il est également possible de représenter dix avec un poing fermé, cette configuration valant cependant aussi pour signifier zéro.

On recourt en tout état de cause aux doigts de très longue date pour accéder aux nombres, au comptage ou au calcul (Ifrah, 1981). Cela a par exemple été le cas dans l'Antiquité romaine ou grecque (*e.g.* : Lindemann, Alipour, & Fischer, 2011). Des systèmes de comptage sur les doigts

depuis un jusqu'à 9999 (Figure 2-A), voire jusqu'à un million en adjoignant des postures corporelles (Figure 2-B), ont ainsi été répertoriés aux XVe et XVIe siècles.

Figure 2 – Exemples de systèmes de comptage ancestraux



Si les occidentaux contemporains sont généralement habitués à représenter les nombres depuis un jusqu'à dix en recourant aux doigts des deux mains, les Romains disposaient d'un système de comptage élaboré permettant, tel qu'en a rendu compte Pacioli (1494), de compter sur les doigts des deux mains depuis un jusqu'à 9999 (Figure 2.A) : par exemple pour signifier dix, on plaçait l'ongle de l'index sur l'articulation médiane du pouce... En outre, à partir d'un système de ce type, certaines cultures ont mis en place des procédés de comptage qui mobilisent le corps au-delà des seuls doigts, comme en rend compte Ifrah (1981) en appui sur un écrit Persan du XVIe siècle (Figure 2.B) indiquant par exemple qu'on représentait un million en joignant les mains (doigts interpénétrés) au-dessus de la tête.

Si le recours aux doigts pour compter ou calculer a traversé le temps en dépit de variations dans ses modalités, c'est probablement parce qu'il a été jugé efficace, ce qui invite à considérer que

l'expérience sensorimotrice du comptage sur les doigts puisse offrir un point d'appui au développement des capacités numériques et arithmétiques (*e.g.* : Berteletti & Booth, 2015 ; Fischer, 2012 ; Wasner, Moeller, Fischer, & Nuerk, 2014).

Selon Guedin, Thevenot et Fayol (2017), il est aujourd'hui généralement admis que les enfants disposent, dès le plus jeune âge, de deux capacités pour traiter les quantités : (1) une capacité à discriminer une à quatre entités, dénommée *subitizing* en langue anglaise, vraisemblablement en appui sur la mémoire à court terme visuelle (*e.g.* : Piazza, Fumarola, Chinello, & Melcher, 2011) et (2) une capacité d'approximation de quantités plus importantes, souvent évaluée via des tâches de comparaison d'ensembles de points (*e.g.* : Dietrich, Huber, & Nuerk, 2016), qui s'affine au fil du temps tout en restant sur le registre de l'approximation. En sus de ces deux capacités de base, l'être humain dispose d'une capacité de discrimination reposant sur l'égalité, en prise avec des systèmes symboliques culturellement déterminés et avec le comptage. Dans ce cadre, les enfants se serviraient en premier lieu de leurs doigts pour pointer (désigner) des objets, éventuellement à dénombrer (Guedin et al., 2017). De telles actions motrices de désignation permettraient d'établir une correspondance terme à terme et d'associer ces actions avec un signifiant verbal, ce qui autoriserait le dénombrement, via l'association de chaque entité à un nombre.

Des configurations formées par les doigts sont également utilisées pour désigner des nombres et/ou compter des entités, lesquelles sont mémorisées et présentent des propriétés similaires à celles des chiffres et nombres correspondants (Guedin et al., 2017). Ainsi a-t-il été montré que des enfants perçoivent le nombre correspondant à une configuration conventionnelle usuelle des doigts (*e.g.* : trois représenté par l'extension du pouce, de l'index et du majeur, tandis que l'annulaire et l'auriculaire sont fléchis) plus vite qu'une configuration non conventionnelle (Di Luca & Pesenti, 2008). Ce recours aux doigts, avec des configurations et des logiques variant selon la culture ainsi qu'influencées par des facteurs structurels (*e.g.* : main dominante du sujet), combiné avec la verbalisation (dénomination des nombres), contribuerait ainsi à stabiliser la correspondance terme à terme, l'ordre des nombres et l'accès à la cardinalité.

Cet apprentissage multimodal, associant objets perçus, désignation des objets via les doigts et dénomination verbale des nombres, serait également de nature à offrir un point d'appui pour accéder à des opérations arithmétiques. Un apprentissage de ce type s'est en tout état de cause avéré fonctionnel pour sous-tendre des opérations arithmétiques dans le cas de la cognition robotique (De La Cruz, Di Nuovo, Di Nuovo, & Cangelosi, 2014). Chez l'enfant, l'usage des doigts pourrait également aider à construire des compétences arithmétiques (*e.g.* : addition) de

base (Moeller et al., 2011). Le recours aux doigts autorise en effet à simuler (physiquement) un calcul, notamment en représentant une quantité et en lui ôtant ou ajoutant une autre quantité, *e.g.* : à partir de sept doigts en extension, on peut fléchir deux doigts pour simuler la soustraction « sept moins deux ». Cela permettrait notamment peu à peu de représenter des quantités via les doigts, sans les compter, et d'opérer directement sur ces quantités (Guedin et al., 2017).

Le développement des capacités numériques de l'enfant en appui sur le pointage des objets dénombrés concourrait ainsi à expliquer l'existence d'un lien entre motricité (des mains et des doigts) et performance arithmétique (Van Rooijen, Verhoeven, Smits, Ketelaar, Becher, & Steenbergen, 2012). Les résultats de Domahs, Krinzinger, et Willmes (2008) concourent en outre à montrer que les enfants recourent, temporairement, à un modèle mental des doigts pour compter. De tels travaux suggèrent que les acquisitions numériques et arithmétiques sont susceptibles de s'ancrer dans l'expérience sensorimotrice des sujets, ce qui est confirmé par les travaux relatifs à la gnose des doigts en tant que prédicteur des performances arithmétiques des sujets.

1.2. Gnose des doigts et prédiction des performances numériques et arithmétiques

La gnose des doigts est la capacité à se représenter et différencier ses doigts (*e.g.* : Ardila, Concha, & Rosselli, 2000). Il a été rapporté que les enfants ayant une mauvaise gnose des doigts ont, en général, également des difficultés à réaliser des calculs arithmétiques (Marinthe, Fayol, & Barrouillet, 2001 ; Miller & Kynd, 2004). Le syndrome de Gerstmann, décrit dans les années 1940, rend ainsi compte de la cooccurrence d'une agnosie des doigts, d'une apraxie, d'une désorientation spatiale et d'une dyscalculie, suite à une lésion cérébrale (gyrus angulaire). Une version développementale de ce syndrome a par ailleurs été décrite dont l'étude a suggéré qu'un déficit au plan de la gnose des doigts est de nature à prédire de faibles capacités arithmétiques (*e.g.* : Soylu, Raymond, Gutierrez, & Newman, 2018). Dans le cas de la dyscalculie, autre syndrome développemental, il a en outre été suggéré que le développement inapproprié de l'usage des doigts peut induire des difficultés dans le traitement des nombres (Kaufmann, Pixner, & Göbel, 2011). La gnose des doigts renverrait ainsi à la motricité fine et sous-tendrait un comptage sur les doigts efficace, ce qui pourrait expliquer qu'elle constitue un prédicteur des performances arithmétiques futures chez les enfants (*e.g.* : Penner-Wilger, Waring, & Newton, 2014).

Plusieurs études ont en tout état de cause concouru à montrer que la mesure de la gnose des doigts est de nature à constituer un prédicteur des performances numériques ultérieures des enfants. Une étude de Noël (2005), conduite avec des enfants de 6-7 ans, a ainsi montré que le score à une tâche rendant compte de la gnose des doigts [détermination par le sujet du doigt ou des doigts touché(s), en dehors de son champ visuel, par l'expérimentateur] peut s'envisager en tant que prédicteur des performances dans diverses tâches numériques réalisées quinze mois plus tard : tâche de comparaison d'ensembles de points (performance mesurée par le taux d'erreur), tâche de comparaison de paires de nombres en chiffres arabes (performance mesurée par le temps de réponse), tâche d'addition de deux nombres compris entre un et cinq et tâche d'addition de nombres dont l'un est compris entre un et cinq et l'autre, entre six et neuf (performance mesurée par le temps de réponse et par le taux d'erreur, dans les deux cas). Une série d'études a par ailleurs concouru à indiquer que la relation entre gnose des doigts et performance arithmétique se met en place progressivement durant l'enfance (Neuwan, 2016; Reeve & Humberstone, 2011; Soylu et al., 2018; Wasner, Nuerk, Martignon, Roesch, & Moeller, 2016). Ainsi, Newman (2016) a-t-elle mis en évidence une relation entre gnose des doigts et performance en addition chez des enfants de 9 à 12 ans et n'a pas avéré cette relation chez des enfants de 5 à 7 ans. Le développement de la gnose des doigts aiderait en tout état de cause au calcul en favorisant la représentation et la manipulation mentales des quantités.

De tels résultats ont conduit à proposer, dans le cas des enfants dyscalculiques, un travail de la représentation des nombres en prise avec la mobilisation des doigts (Moeller et al., 2011). Gracia-Bafalluy et Noël (2008) ont en outre montré l'influence positive d'un entraînement de la discrimination des doigts chez des enfants de 7 à 8 ans tout à la fois sur la gnose des doigts et sur la performance d'une tâche de *subitization* (cf. § 1.1.), d'une tâche de comptage (nombre de doigts tendus sur des images photographiques de mains) et d'une tâche d'ordonnement de nombres.

En définitive, les travaux sur la gnose des doigts concourent à suggérer que des mécanismes cérébraux sensorimoteurs puissent sous-tendre la cognition numérique, à tout le moins sa mise en place (Domahs et al., 2010). Idée que viennent conforter les travaux intéressants d'autres parties du corps que les seuls doigts.

1.3. Gestuelle et acquisitions mathématiques

Les gestes déictiques, désignant des objets par le pointage ou encore en les soulevant pour les montrer, peuvent aider l'apprenant en créant des relations manifestes entre instructions verbales et environnement. Les gestes déictiques sous-tendent ainsi le développement du vocabulaire chez l'enfant (Özçalışkan, Adamson, & Dimitrova, 2016), tout comme on se souvient d'autant plus aisément d'un discours dont la teneur a été renforcée par des gestes signifiants (Driskell & Radtke, 2003). D'une manière plus générale, les gestes apparaissent de nature à favoriser l'apprentissage et le transfert de ce qui a été appris (Cook, Friedman, Duggan, Cui, & Popescu, 2017).

Les gestes sont également de nature à sous-tendre la production de représentations abstraites pertinentes en mathématiques (Goldin-Meadow & Beilock, 2010 ; Ping & Goldin-Meadow, 2010). Hypothèse que Goldin-Meadow, Cook et Mitchell (2009) ont expérimentée avec des enfants de 9-10 ans. Trois groupes de sujets ont été aléatoirement constitués et ont été entraînés à résoudre un problème arithmétique intégrant une égalité de sommes avec un terme manquant à trouver : $6 + 3 + 4 = _ + 4$ (le terme manquant étant indiqué ici par : $_$). Un groupe de sujets s'est exercé sans recourir à une quelconque gestuelle et avec pour seule indication la consigne suivante, spécifiant le but de la tâche et/ou l'intention à adopter pour réaliser la tâche : « *I want to make one side equal to the other side* ». Deux autres groupes de sujets se sont en outre entraînés en recourant à une gestuelle particulière. Dans un groupe, les sujets ont eu à utiliser deux doigts (index et majeur formant un V) pour désigner deux nombres dont la somme n'est pas égale à la valeur manquante (3 et 4), puis à pointer le terme manquant avec l'index en disant : « *I want to make one side equal to the other side* ». La gestuelle ici utilisée était considérée comme partiellement correcte dans le sens où elle attire l'attention sur le fait que deux nombres peuvent être regroupés en un seul via une addition (V constitué avec deux doigts) et dans le sens où elle souligne que deux côtés sont à prendre en compte dans l'égalité présentée. Dans l'autre groupe, la même formulation et les mêmes gestes étaient utilisés mais les deux nombres initialement pointés avec l'index et le majeur étaient ceux à ajouter pour obtenir le terme manquant de l'égalité (6 et 3), cette gestuelle étant considérée comme totalement correcte. Les élèves de chaque groupe ont ensuite bénéficié d'une même leçon, à partir d'une nouvelle égalité du type de celle-ci-dessus mentionnée (e.g. : $5 + 6 + 3 = _ + 3$), l'enseignant se cantonnant à indiquer la réponse correcte et à expliquer la stratégie d'équivalence à adopter ($5 + 6 + 3 = 14$ et $11 + 3 = 14$), sans recourir à une quelconque gestuelle. Les sujets se sont ensuite exercés sur un nouveau problème du même type en ayant à mobiliser la stratégie

travaillée en amont dans chaque groupe. Enfin, à l'issue de la leçon, les sujets de chaque groupe ont eu à résoudre six nouveaux problèmes du même type que ceux rencontrés ci-avant et ont eu à expliquer comment ils ont résolu chaque problème. Les résultats ont indiqué que le groupe ayant travaillé la gestuelle correcte a résolu correctement plus de problèmes que le groupe ayant travaillé la gestuelle partiellement correcte, lequel en a lui-même résolu plus que le groupe n'ayant travaillé aucune gestuelle. Cet effet est en outre apparu médié par l'intégration des informations émanant des gestes au répertoire verbal des sujets (idée de regroupement de nombres, non verbalisée en amont durant le protocole). De tels résultats suggèrent ainsi que le geste en lui-même est de nature à susciter des apprentissages en prise avec l'arithmétique.

D'autres travaux ont suggéré l'existence de relations étroites entre manipulation d'objets et calcul. Il a ainsi été montré que l'entraînement physique au calcul avec un boulier (Figure 3), suivi d'une simulation mentale de l'utilisation du boulier, est de nature à favoriser par la suite la réalisation de calculs mentaux complexes en l'absence de mouvements (Hatano & Osawa, 1983 ; Hanakawa et al., 1999).

Figure 3 – Exemple de calcul avec un boulier : $253 + 812$



Le boulier ici considéré (Figure 3.A) comprend quatre colonnes qui indiquent respectivement, depuis la gauche jusqu'à la droite, les valeurs des milliers, des centaines, des dizaines et des unités. Dans la partie inférieure du boulier (sous la barre horizontale), on a cinq éléments qu'on déplace vers le haut autant que nécessaire pour représenter une valeur ; à partir du moment où cinq éléments ont été déplacés, on les redescend et on descend l'un des deux éléments présents au-dessus de la barre horizontale qui signifie cinq, etc. On peut ainsi représenter une valeur, par exemple, dans le cas considéré (Figure 3.B), 253. Pour additionner 812 à 253, on débute par les unités de 812 (Figure 3.C), en déplaçant des éléments du boulier autant que nécessaire, puis, si besoin (Figure 3.D), en convertissant un ensemble de cinq éléments sous la barre horizontale en un seul élément au-dessus de la barre horizontale. On réitère la manœuvre pour les dizaines (Figure 3.E) et les centaines (Figures 3.F-G-H) et on obtient le résultat (*i.e.* : 1065). Cet exemple a été composé à partir de : <http://villemin.gerard.free.fr/Calcul/MultiAba.htm>

L'acquisition d'une habileté motrice apparaît ainsi susceptible d'étayer l'acquisition d'une habileté cognitive, ce qui pourrait tenir à ce que des mécanismes cérébraux impliqués dans le contrôle moteur peuvent également assumer des fonctions cognitives (Hanakawa et al., 2002). Point de vue étayé par les résultats de Brooks, Barner, Frank, et Goldin-Meadow (2018) intéressant la réalisation d'additions par des enfants ayant à recourir à un boulier mental (*i.e.* : sujets ayant à s'imaginer déplacer les éléments mobiles d'un boulier pour calculer). Dans le cas de sujets habitués à recourir au boulier mental, les résultats ont montré que la performance du calcul n'est impactée significativement ni par une absence de feedback visuel (yeux bandés), ni par une absence de feedback proprioceptif spécifique (mains à plat sur une table). La performance du calcul s'est en revanche avérée significativement détériorée par la réalisation d'un mouvement (frappe sur un clavier). Ces résultats suggèrent par conséquent que des processus cérébraux en jeu dans la planification-préparation du mouvement le sont aussi lors du recours au boulier mental.

S'il est avéré que les jeunes enfants accèdent initialement à des principes numériques et/ou arithmétiques de base en mobilisant leur corps, en particulier leurs doigts, la question de l'influence des expériences motrices et sensorimotrices sur la cognition numérique une fois l'enfance passée se pose, ce qui renvoie au point suivant.

1.4. Expériences corporelles et cognition numérique : enfants et adultes

Selon Moeller et al. (2011), les chercheurs spécialisés en éducation mathématique admettent généralement que les enfants initialisent leur apprentissage du calcul en mobilisant des stratégies de comptage sur les doigts (*e.g.* : $8 + 3 = 8 + 1 + 1 + 1$). Plusieurs chercheurs tendent cependant à souligner que si le recours au comptage sur les doigts perdure trop, il peut limiter à terme la compréhension de la numérosité, des opérations arithmétiques ou encore le recours à des règles de calcul efficaces, en particulier chez les élèves les plus en difficulté, alors même que le recours au seul comptage sur les doigts s'avère favoriser les erreurs de calcul (*e.g.* : Krauthausen & Scherer, 2001). Une centration trop exclusive et prolongée sur la seule stratégie de comptage sur les doigts pour calculer limiterait l'accès à des représentations numériques abstraites favorisant un calcul efficace (*e.g.* : Kaufmann & Wesselowski, 2006). Une centration exclusive sur des stratégies de comptage sur les doigts favoriserait ainsi une représentation des nombres en tant que séquence formée d'unités plutôt que d'entités plus larges (Moeller et al., 2011), ce qui limiterait le recours à des stratégies de calcul efficaces (*e.g.* :

pour calculer $8 + 7$, on peut considérer que $8 + 7 = 5 + 3 + 5 + 2$, donc que $8 + 7 = 5 + 5 + 3 + 2$, donc que $8 + 7 = 10 + 5 = 15$).

Si de telles analyses peuvent inviter à un abandon rapide du recours aux doigts en tant que médiateurs du calcul (*e.g.* : Jordan, Kaplan, Ramineni, & Locuniak, 2008 ; Yanuarta, 2017), ce point de vue ne fait cependant pas consensus chez les chercheurs en éducation (Moeller et al., 2011). Au demeurant, durant la réalisation d'un calcul, l'absence de recours délibéré aux doigts et de mouvement effectif n'empêche pas en soi la mobilisation de processus sensorimoteurs liés aux doigts (*e.g.* : Berteletti & Booth, 2015 ; Soylu et al., 2018).

Les résultats de Penner-Wilger et al. (2014) montrent en tout état de cause que la gnose des doigts est de nature à prédire la performance en calcul chez les adultes. Plusieurs études ont en outre montré que les habitudes de comptage sur les doigts sont de nature à influencer sur la performance de tâches arithmétiques, chez l'adulte, en l'absence de mouvement avéré. A titre d'exemple, on peut mentionner une étude de Domahs et al. (2010), dont les résultats ont été confirmés par ceux de Morissey, Liu, Kang, Hallett, et Wang (2016). Dans l'étude de Domahs et al. (2010), des adultes ont réalisé une tâche de comparaison de paires de nombres (un à neuf). Certains sujets (allemands) étaient habitués à compter depuis un jusqu'à dix sur les doigts des deux mains et d'autres (chinois), à utiliser des configurations symboliques des doigts d'une seule main pour compter depuis un jusqu'à neuf (Figure 1). Les temps de réponse des seuls sujets allemands se sont avérés significativement accrus lorsque l'un des deux nombres à comparer, au moins, aurait requis le recours aux deux mains pour être compté et/ou représenté.

Il a en outre été montré, dans le cas des adultes, qu'un mouvement concomitant au calcul est de nature à détériorer la performance d'additions et de soustractions mentales, que ce mouvement soit passif (déplacement d'une main relâchée, dans le sens des aiguilles d'une montre, par l'expérimentateur ; Imbo, Vandierendonck, & Fias, 2011) ou actif (mouvement délibéré de flexion successive des doigts d'une main ; Michaux, Masson, Pesenti, & Andres, 2013).

Un ensemble de résultats concourt ainsi à suggérer que le calcul et le mouvement puissent être sous-tendus par des processus cérébraux pour partie communs.

1.5. Synthèse

L'idée selon laquelle les représentations mathématiques s'enracineraient dans des mouvements corporels précédemment expérimentés apparaît cohérente avec le recours, observé de longue date dans diverses cultures, aux doigts (ou à d'autres segments corporels) pour

apprendre les nombres ou encore pour apprendre à dénombrer et/ou à réaliser des calculs simples. Cette idée est également accréditée par les travaux relatifs à la gnose des doigts qui montrent notamment que celle-ci constitue, chez l'enfant, un prédicteur de la performance arithmétique ou encore que son amélioration via un entraînement dédié va de pair avec une amélioration de la performance dans diverses tâches numériques ou arithmétiques. L'existence d'un lien entre mouvement et calcul, chez l'enfant, est par ailleurs suggérée par des travaux montrant que le recours à une gestuelle favorise l'apprentissage de la résolution d'un problème arithmétique ou que l'expérience de la manipulation d'un boulier pour calculer favorise la performance ultérieure de calculs mentaux. Si de tels travaux étayent l'idée que des processus moteurs et/ou sensorimoteurs sous-tendent le développement de la cognition numérique, d'autres études suggèrent que de tels processus restent influents dans la cognition numérique chez l'adulte. La gnose des doigts est ainsi susceptible de prédire la performance des adultes en calcul et leurs habitudes de comptages sur les doigts sont de nature à influencer sur leurs performances arithmétiques.

D'une manière plus générale, une série de travaux a suggéré que la préparation du mouvement et la réalisation de tâches arithmétiques pourraient mobiliser des processus cérébraux en partie similaires, ce qui invite notamment à s'intéresser aux travaux étudiant les mécanismes cérébraux en jeu durant le traitement numérique ou la réalisation d'une tâche arithmétique.

2. Mouvement, traitement numérique, arithmétique et cerveau

Un ensemble d'études comportementales a suggéré l'existence d'une relation entre mouvement et traitement numérique et/ou réalisation d'une tâche arithmétique.

Cette relation est accréditée par le recours, récurrent dans différentes cultures, aux doigts, voire à d'autres parties du corps, pour accéder aux nombres, apprendre à dénombrer ou à réaliser des opérations arithmétiques de base (*e.g.* : Previtalli, Rinaldi, & Girelli, 2011). En cohérence, le score à un test mesurant la gnose des doigts s'est avéré prédire la performance arithmétique durant l'enfance (*e.g.* : Newman, 2016). En outre, la mobilisation des doigts a été préconisée comme moyen de développer la gnose des doigts (Moeller et al., 2011).

Le mouvement est en tout état de cause apparu susceptible de favoriser l'apprentissage de problèmes arithmétiques. Le recours à une gestuelle ad hoc s'est par exemple révélé favoriser l'apprentissage de la résolution d'un problème d'addition avec un terme manquant (Goldin-Meadow et al., 2009). Une habitude de la manipulation physique des quantités lors d'additions effectuées avec un boulier s'est aussi avérée favoriser la performance d'additions, en l'absence de mouvement, via une éventuelle simulation mentale de l'utilisation du boulier (*e.g.* : Hatano & Osawa, 1983 ; Hanakawa et al., 1999). Cette habitude du calcul avec un boulier pourrait ainsi favoriser une mobilisation de mécanismes cérébraux en jeu dans la préparation du mouvement qui vaudrait aussi durant une addition mentale (*e.g.* : Brooks et al., 2018).

En ce sens, il pourrait en aller d'une mobilisation des régions cérébrales motrices, durant un traitement numérique ou durant la réalisation d'une tâche arithmétique, et particulièrement du cortex prémoteur compte tenu de son rôle dans la préparation du mouvement. L'examen de cette possibilité appelle à s'enquérir plus avant d'une éventuelle fonction cognitive des régions motrices cérébrales, en particulier du cortex prémoteur. Cet examen invite aussi à s'intéresser aux résultats d'études éclairant les mécanismes cérébraux en jeu lors d'un traitement numérique ou de la réalisation d'une tâche arithmétique.

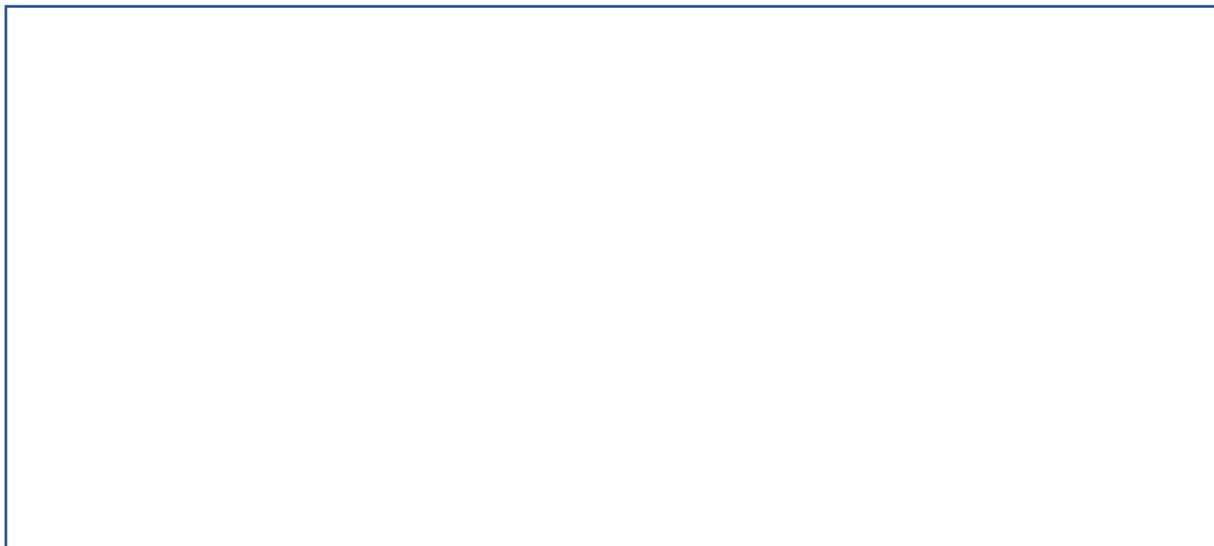
2.1. Régions motrices cérébrales et cortex prémoteur

Comme l'indiquent Hanakawa et al. (2002, p. 1159), il n'a originellement guère été envisagé, en neurosciences, que la capacité de l'humain à agir sur son environnement extérieur, notamment en manipulant des objets, puisse entretenir des liens fonctionnels étroits avec sa

capacité à œuvrer sur des contenus mentaux, notamment en opérant sur des informations en mémoire. Le cervelet et les ganglions de la base ont ainsi été initialement considérés comme étant exclusivement dédiés au contrôle moteur (Hanakawa et al., 2002). Il en va de même, selon Hanakawa (2011), des aires motrices cérébrales.

Encore convient-il de s'entendre sur ce qu'on désigne par aires motrices cérébrales. Comme l'indique Wise (2001), l'appellation « cortex moteur » renvoie soit à une unique aire, l'aire motrice primaire (aire M1), soit à un ensemble d'aires motrices cérébrales, dans le lobe frontal. Cette ambivalence tient possiblement à ce que les travaux originels sur le cortex moteur ont envisagé l'existence d'une région cérébrale unique censée sous-tendre le contrôle moteur. C'est au début des années 1900 que certains chercheurs ont envisagé une possible subdivision (*e.g.* : Campbell, 1905). Il en a été du distinguo entre les aires 4 et 6 de Brodman (1909), notamment repris par Fulton (1935) pour positionner le cortex prémoteur au sein de l'aire 6 de Brodman. Si la pertinence de ce distinguo a fait débat (*e.g.* : Penfield & Boldrey, 1937), l'idée de subdivision a fait son chemin au fil des décennies. On distingue désormais, au sein du lobe préfrontal, l'aire motrice primaire M1, ou aire 4 de Brodman, du cortex moteur « non primaire » (Hanakawa et al., 2002, p. 1157), coextensif de l'aire 6 de Brodman et qui intègre, d'une part, l'aire motrice supplémentaire, d'autre part, le cortex prémoteur (Figure 4).

Figure 4 – Aperçu du cortex moteur



Les lobes cérébraux sont indiqués Figure 4.A : au niveau du lobe frontal, on trouve notamment les aires de Brodman 4 (🌀) et 6 (🌀). L'aire de Brodman 4 correspond au cortex moteur primaire (M1) et l'aire de Brodman 6, au cortex moteur « non primaire », pour reprendre une formulation d'Hanakawa et al., 2002). Le cortex moteur se subdivise plus précisément, comme cela est indiqué Figure 4.B, en : cortex moteur primaire (🌀 ; aire de Brodman 4), aire motrice supplémentaire (🌀 ; au sein de l'aire de Brodman 6) et cortex prémoteur (🌀 ; au sein de l'aire de Brodman 6). Les schémas des Figures 4.A et 4.B sont respectivement tirés de :

- http://lecerveau.mcgill.ca/flash/d/d_06/d_06_cr/d_06_cr_mou/d_06_cr_mou.html
- http://lecerveau.mcgill.ca/flash/i/i_06/i_06_cr/i_06_cr_mou/i_06_cr_mou.html

En regard de la Figure 4, on pourrait encore envisager l'aire motrice du langage de Broca qui permet la production du langage parlé. On peut ainsi considérer que la Figure 4 renvoie aux mouvements segmentaires et déplacements corporels.

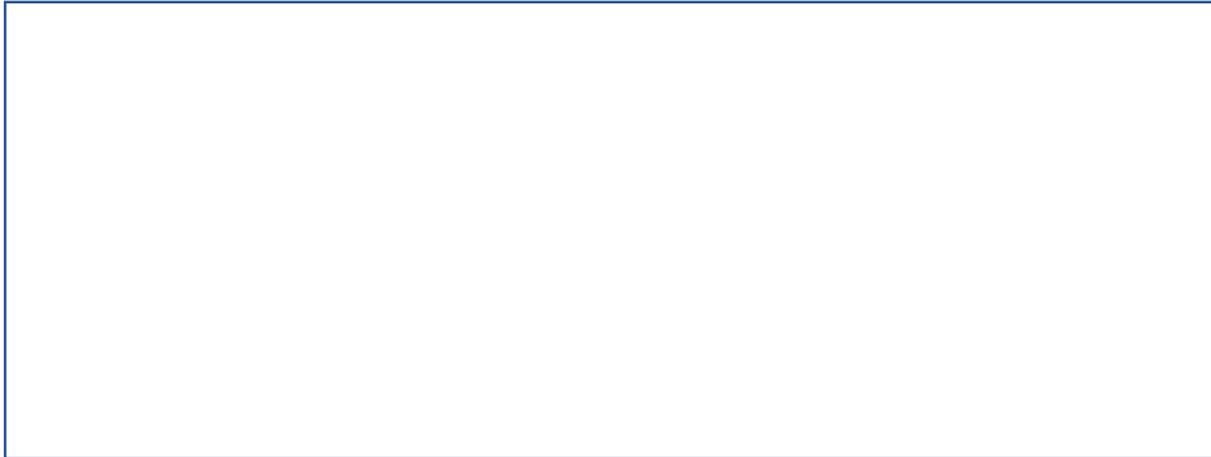
Il est bien établi que le cortex moteur primaire (M1) contrôle l'exécution de mouvements volontaires, certains neurones de M1 contrôlant notamment le mouvement via des outputs dirigés vers le tronc cérébral et la moelle épinière, avec des projections directes vers les motoneurones (Wise, 2001). M1 présente de ce point de vue une organisation topologique avec des secteurs dédiés au contrôle du mouvement de différentes parties du corps (Wise, 2001). L'aire motrice supplémentaire serait quant à elle responsable de la préparation (coordination) de mouvements complexes (*e.g.* : Chu & Black, 2012 ; Duffau, 2012 ; Pressman & Rosen, 2015) et pourrait notamment être impliquée dans le contrôle des coordinations bimanuelles (Wiesendanger, Wicki, & Rouiller, 1994). Enfin, selon Mihailoff et Haines (2018), le cortex prémoteur reçoit des inputs des aires sensorielle du cortex pariétal et projette vers M1, la corde spinale et la formation réticulaire, laquelle influe, via des fibres réticulospinales, sur des motoneurones innervant les muscles paravertébraux ainsi que ceux des segments proximaux. Ceci suggère donc que le cortex prémoteur, à l'instar de l'aire motrice supplémentaire, est impliqué dans la préparation du mouvement, notamment dans les ajustements posturaux requis pour réaliser un mouvement.

Si le rôle des régions motrices cérébrales dans le contrôle moteur a été mis en avant de longue date, ce n'est que relativement récemment qu'il a été envisagé qu'elles puissent avoir des fonctions cognitives (Hanakawa et al., 2002).

Ainsi, Craighero (2014) a-t-elle produit une revue de question soulignant que celles-ci jouent un rôle déterminant dans des habiletés cognitives complexes telles que le codage de l'espace ou la prédiction des actions d'autrui.

En amont, Hanakawa et al. (2002, p. 1165) ont produit des résultats suggérant que l'aire de Brodman 6 n'est pas simplement subdivisée en zones motrices et en zones cognitives mais que certaines zones de cette aire ont à la fois des fonctions motrices et cognitives. Hanakawa (2011) a par la suite produit une méta-analyse le conduisant plus précisément à pointer le cortex prémoteur rostral en tant qu'instance d'interaction entre les réseaux cérébraux cognitif et moteur, en l'absence de connexion directe connue entre le cortex préfrontal dorsolatéral et le cortex moteur primaire, connus pour leur rôle clé respectif dans le comportement cognitif et dans le comportement moteur (Figure 5).

Figure 5 – Modèle hypothétique de la connexion entre réseaux cérébraux cognitif et moteur



La Figure 5 présente un modèle hypothétique du rôle du cortex prémoteur rostral pour connecter les réseaux corticaux cognitif et moteur, selon Hanakawa (2011, p. 151). Dans ce modèle le réseau moteur (■), directement connecté à la corde spinale, n'est pas directement interconnecté avec le réseau cognitif (■) préfrontal, l'une des fonctions du réseau prémoteur rostral sous-cortical (■) étant d'autoriser cette connexion en fonction des données contextuelles.

Genon et al. (2017) ont par ailleurs effectué récemment une méta-analyse visant à distinguer les subdivisions fonctionnelles du cortex prémoteur dorsal droit dont les résultats ont révélé cinq subdivisions réparties au long d'un axe rostro-caudal et correspondant à un gradient cognitif-moteur, une zone centrale présentant un profil mixte (cognitif et moteur). Résultat au demeurant cohérent avec ceux de diverses études intéressant les régions cérébrales frontales et incluant le cortex prémoteur dorsal (Choi, Yeo, & Buckner, 2012; Orban et al., 2014 ; Yeo et al., 2011). Ainsi, selon Genon et al. (2017), la subdivision centrale pourrait jouer un rôle d'interface et d'intégration au sein du cortex prémoteur dorsal droit.

Sans qu'on puisse véritablement retirer de synthèse de ces travaux qui relèvent d'un champ de recherche du reste encore en chantier, on dispose d'éléments suggérant que le cortex prémoteur peut assumer des fonctions cognitives, voire constituer le siège d'interactions entre les réseaux cérébraux cognitif et moteur, ce qui semble cohérent avec l'idée d'une possible relation entre mouvement et traitement numérique ou réalisation d'une tâche arithmétique. Aussi semble-t-il logique d'examiner si les études en neurosciences relatives au traitement numérique ou à la réalisation d'une tâche arithmétique révèlent une implication significative du cortex prémoteur.

2.2. Traitement numérique et cortex prémoteur

L'existence d'une relation entre mouvement et traitement numérique est suggérée par une série d'études comportementales. Dans une étude d'Andres, Davare, Pesenti, Olivier, et Seron

(2004), les sujets ont ainsi réalisé une tâche de jugement de parité (nombres en format arabe, de 0 à 9) en fermant ou en ouvrant la main à partir d'une position intermédiaire (fermeture pour pair et ouverture pour impair ou bien ouverture pour pair et fermeture pour impair). Les résultats (électromyogrammes) ont montré que la fermeture de la main est initialisée plus rapidement dans le cas des petits nombres et que l'ouverture de la main est initialisée plus rapidement dans celui des grands nombres. En cohérence, Andres, Ostry, Nicol, et Plaus (2008) ont montré que l'ouverture d'une saisie à deux doigts est, en début de mouvement, plus ample lors de la visualisation d'un grand nombre (*i.e.* : 8 ou 9) que lors de celle d'un plus petit nombre (*i.e.* : 1 ou 2).

Des études recourant à la stimulation magnétique transcranienne ont par ailleurs examiné la possible implication des circuits moteurs de la main dans certaines tâches numériques.

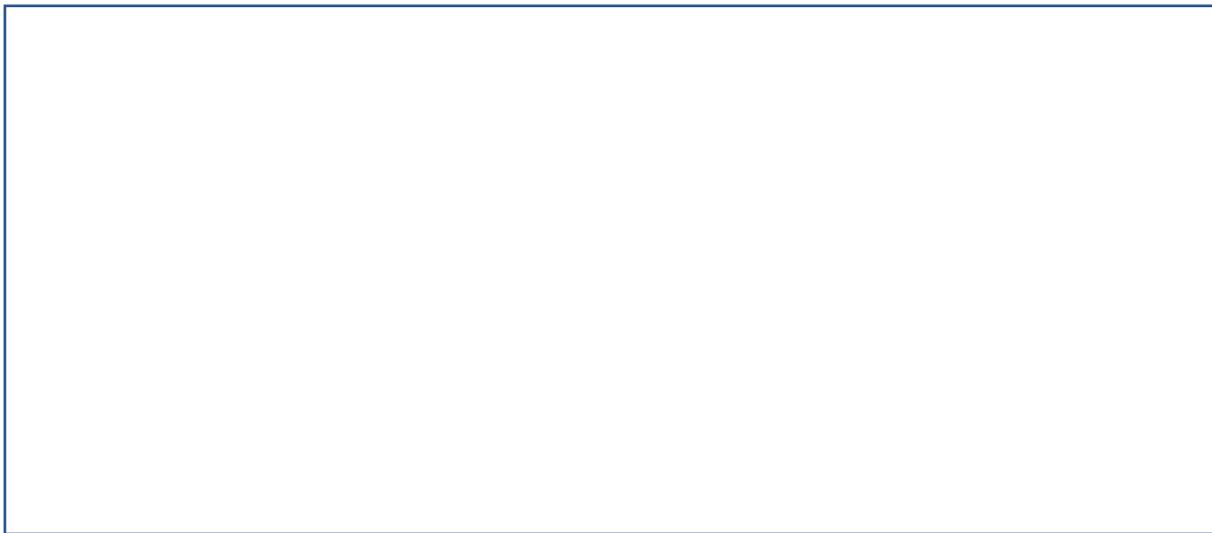
Andres et al. (2007) ont ainsi recouru à ce procédé pour examiner l'excitabilité corticospinale des muscles de la main, chez des sujets adultes, durant une tâche de comptage. Les résultats obtenus plaident en faveur d'une contribution spécifique des circuits moteurs de la main dans le comptage puisqu'un accroissement de l'excitabilité corticospinale a été trouvée, dans une même tâche de comptage, dans le cas des muscles de la main mais pas dans ceux du bras et du pied. Cette contribution s'est cependant avérée ne pas être spécifique du traitement numérique puisqu'un accroissement de l'excitabilité corticospinale a également été avéré lorsque le comptage était opéré en recourant à des lettres. Si les résultats d'Andres et al. (2007) suggèrent que l'implication des circuits moteurs de la main puisse valoir dans le cas général d'une mise en correspondance entre une série d'objets et les éléments de toute série ordonnée, ils avèrent en tout état de cause une contribution spécifique des circuits moteurs de la main au comptage.

Les résultats de Sato, Cattaneo, Rizzolatti et Gallese (2007) ont par ailleurs suggéré que les circuits moteurs de la main puissent influencer spécifiquement sur le traitement numérique. Les auteurs ont examiné les changements d'excitabilité des muscles de la main de sujets adultes droitiers, durant une tâche de jugement de parité à partir de nombres en chiffres arabes (de 1 à 9). Les résultats ont montré un accroissement de l'excitabilité des muscles de la main droite dans le cas des plus petits nombres (de 1 à 4) comparativement aux plus grands nombres (6 à 9). Ces résultats suggèrent ainsi une relation entre circuits moteurs de la main et représentation des nombres, possiblement liée aux habitudes de comptage (Sato et al., 2007).

Des études recourant à l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle ont en outre confirmé l'existence d'une relation entre mouvement et traitement numérique, notamment dans le cas de la main (en l'absence de mouvement effectif de celle-là).

Dans ce cadre, Skagerlund, Karlsson et Träff (2016) se sont intéressés aux mécanismes neurocognitifs sous-tendant l'estimation de grandeurs continues diverses par des sujets adultes : (1) estimation de la quantité correspondant à un ensemble de points (tâche numérique consistant à déterminer, parmi deux ensembles de points présentés successivement, lequel comprend le plus de points), (2) estimation de la longueur d'un segment de droite (tâche spatiale consistant à déterminer, parmi deux segments présentés successivement, lequel est le plus long) et (3) estimation d'une durée (tâche temporelle consistant à déterminer, parmi deux stimuli présentés successivement, lequel est resté visible le plus longtemps) (Figure 6).

Figure 6 – Aperçu des tâches d'estimation de quantités dans l'étude de Skagerlund et al. (2016)



Cette présentation schématique des tâches d'estimation de nombres de points, de longueurs de segments de droite et de temps de visualisation d'un stimulus émane de Skagerlund et al. (2016).

Les régions cérébrales dont l'activation fonctionnelle s'est révélée significativement accrue durant chaque tâche de l'expérimentation de Skagerlund et al. (2016) se sont avérées présenter des communautés, essentiellement latéralisées à droite et valant pour les trois tâches dont la tâche numérique, le cortex prémoteur (et l'aire motrice supplémentaire) comptant parmi ces communautés. Si de tels résultats peuvent suggérer que l'activation fonctionnelle accrue du cortex prémoteur avérée est le fait d'un système de traitement des quantités non spécifique aux nombres, ils valent, en tout état de cause, dans le cas particulier de la détermination de la quantité correspondant à un ensemble de points.

En outre, les résultats d'une étude de Tschentscher, Hauk, Fischer et Pulvermüller (2012) suggèrent qu'une implication du cortex prémoteur dans le traitement numérique puisse être spécifiquement liée aux habitudes de comptage sur les doigts qu'ont acquises les sujets. Tschentscher et al. (2012) ont ainsi confronté des sujets adultes à des séries de nombres écrits

en chiffres arabes (de 0 à 9) ou en toutes lettres (de zéro à neuf). Ces sujets avaient des habitudes diverses de comptage sur les doigts, les uns commençant à compter (petits nombres) avec la main gauche, les autres, avec la main droite. Les résultats ont montré une activation fonctionnelle significative du cortex prémoteur durant la visualisation des nombres, qui reflète les habitudes de comptage sur les doigts des sujets. Dans le cas des plus petits nombres (1 à 5 ; un à cinq), cette activation était en effet significativement accrue dans l'hémisphère controlatéral à la main que les sujets auraient préférentiellement utilisée pour initialiser un comptage effectif sur les doigts. Résultats qui, selon Tschentscher et al. (2012), peuvent s'expliquer par l'existence d'un réseau neural sous-tendant à la fois le traitement numérique et la préparation des mouvements des doigts et/ou par une réminiscence de mécanismes cérébraux activés lors du recours aux doigts durant l'apprentissage du comptage.

On dispose en définitive de résultats expérimentaux étayant l'existence d'une relation entre mouvement, en particulier dans le cas de la main et des doigts, et traitement numérique chez l'adulte : les résultats d'études recourant à la stimulation magnétique transcranienne indiquent ainsi une possible implication des circuits moteurs de la main durant un traitement numérique quand ceux d'études recourant à l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle montrent une implication accrue du cortex prémoteur durant un traitement numérique. Ces résultats peuvent sembler tenir pour partie (Andres et al., 2007 ; Sakerglund et al., 2016) à la mobilisation de systèmes non spécifiques des nombres (mise en correspondance entre objets et éléments d'une quelconque série ordonnée, système général de traitement des quantités). Néanmoins, certains résultats apparaissent aussi suggérer une influence spécifique des expériences motrices liées au comptage sur les doigts (Sato et al., 2007 ; Tschentscher et al., 2012) sur le traitement numérique. En particulier, ces études concourent à étayer l'idée d'une mobilisation du cortex prémoteur durant le traitement numérique, ce qui invite à s'enquérir d'une telle mobilisation durant la réalisation de tâches arithmétiques appelant à opérer sur les nombres.

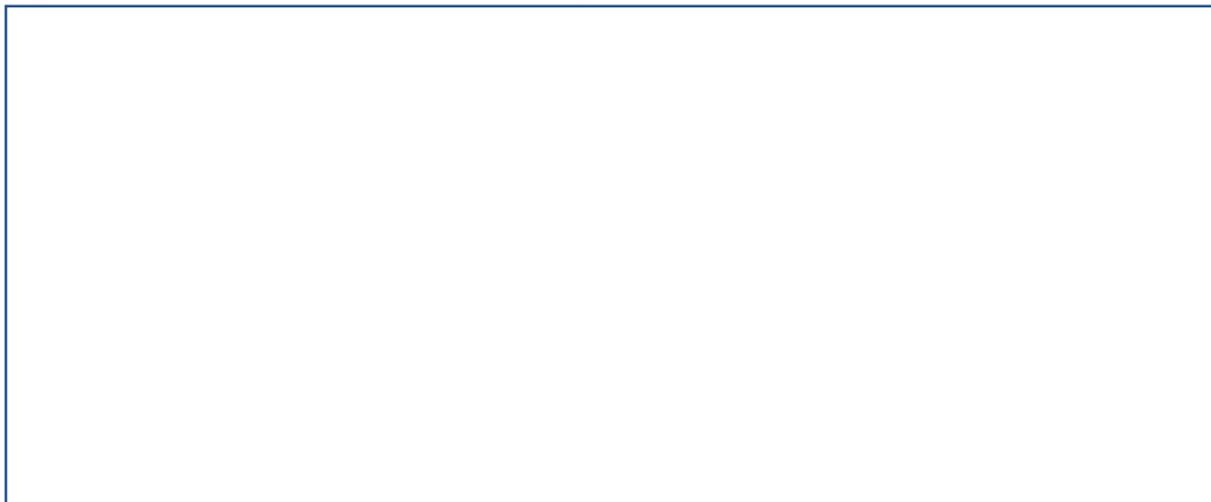
2.3. Tâches arithmétiques et cortex prémoteur

Plusieurs études ont montré l'existence d'un lien étroit entre les capacités de traitement numérique des sujets et les habiletés arithmétiques qu'ils maîtrisent (*e.g.* : Landerl, 2013). Une série de résultats expérimentaux étaye en outre l'idée d'une relation entre mouvement et traitement numérique chez l'adulte, en particulier au regard d'une implication du cortex prémoteur dans des tâches de traitement numérique. Il est dès lors envisageable que des études avèrent une telle implication du cortex prémoteur dans le cas de tâches arithmétiques.

Éventualité qu'on peut examiner à la lumière d'une série d'études recourant à l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle.

Au-delà du seul cas des sujets adultes, il convient de noter d'emblée que Berteletti et Booth (2015) ont trouvé une activation fonctionnelle significativement accrue des aires motrices cérébrales des doigts durant une tâche de soustraction mentale réalisée par des sujets de huit à treize ans, en l'absence de mouvement effectif. En outre, les résultats de cette étude ont montré une activation accrue des aires somato-sensorielles relatives aux doigts, suggérant le recours, durant les calculs, à des stratégies en prise avec la gnose des doigts (Berteletti & Booth, 2005, p. 8). En cohérence avec ce dernier résultat, une étude d'Andres, Michaux et Pesenti (2012), réalisée avec des sujets adultes, est également à signaler. Dans le cas de la soustraction et de la multiplication mentale, d'une part, de la discrimination des doigts, d'autre part (Figure 7), ces auteurs ont en effet mis en évidence des patterns d'activation fonctionnelle présentant un chevauchement au sein des aires pariétales.

Figure 7 – Tâches de discrimination des doigts et de calcul dans l'étude d'Andres et al. (2012)



Dans l'expérimentation d'Andres et al. (2012), les sujets devaient saisir deux blocs de bois différents, un dans chaque main, paume de la main positionnée vers le haut et pouce sur le côté du bloc ; dans chaque item de la tâche de discrimination des doigts, une image de la paume d'une main droite ou bien gauche était présentée, un doigt étant signalé en rouge, les sujets devant indiquer, en se reportant à leurs propres saisies mais sans regarder leurs mains, si ce doigt était ou non placé dans un trou du bloc idoine (Figure 7.A). Les sujets ont également réalisé des tâches de calcul mental (Figure 7.B). Dans chaque tâche, un seul nombre en format arabe (de 3 à 9) était présenté. Dans le cas des soustractions, les sujets devaient ôter le nombre présenté à 11 ou à 13, selon l'item. Dans le cas des multiplications, les sujets devaient multiplier le nombre présenté par 3 ou par 4 selon l'item. Les sujets répondaient oralement (réponses enregistrées). Les repères temporels relatifs à deux items successifs d'une tâche donnée sont fournis en complément (Figure 7.C).

Si des études suggèrent ainsi une possible implication des régions motrices et/ou somato-sensorielles cérébrales durant une tâche de calcul mental, d'autres travaux ont montré plus spécifiquement une activation fonctionnelle accrue du cortex prémoteur durant un calcul. Ainsi,

Hanakawa et al. (2002) ont mis en évidence une activation fonctionnelle accrue du cortex prémoteur dorsolatéral chez des sujets adultes réalisant des additions mentales en l'absence de mouvement. D'autres études ont en outre confirmé une implication du cortex prémoteur durant l'effectuation d'additions mentales chez des sujets formés au calcul à partir d'un boulier mental (Chen et al., 2006 ; Hanakawa, Honda, Okada, Fukuyama, & Shibasaki, 2003). Dans l'étude d'Hanakawa et al. (2002), les résultats ont en outre démontré que de telles activations, obtenues en l'absence de mouvement, chevauchent les régions cérébrales actives durant un mouvement complexe des doigts.

Dans le cas du traitement de la sémantique des expressions algébriques ou arithmétiques de formules mathématiques (Figure 8), par des sujets adultes universitaires, Friedrich et Friederici (2013) ont par ailleurs mis en évidence la mobilisation spécifique d'un réseau fronto-pariétal, intégrant le cortex prémoteur, avec plus particulièrement une activation accrue de la partie rostrale du cortex prémoteur dorsolatéral.

Figure 8 – Exemples de formules à traiter dans l'étude de Friedrich et Friederici (2013)

A – Expression algébrique	B – Expression arithmétique
$(x \cdot y)^n \cdot (a - b)$	$(7 \cdot 0 + 1) \cdot (3 \cdot 4 - 4 \cdot 3)$

Les expressions algébrique (Figure 8.A) et arithmétique (Figure 8.B) d'une même formule, utilisées par Friedrich et Friederici (2013) sont présentées. Les sujets devaient, pour chaque formule, déterminer si elle correspondait à une déclaration vraie ou bien fautive. Les formules utilisées intégraient des variables (a, b, x, y, z) ainsi que des constantes numériques (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9), des constantes algébriques (n, élément neutre et e, unité pour la multiplication), les symboles logiques \wedge et \vee (et ; ou), l'égalité =, les parenthèses droites et gauche, le symbole < (inférieur à) et les symboles fonctionnel + et \cdot (addition et multiplication).

On dispose ainsi d'une série d'études montrant la possible mobilisation des aires motrices cérébrales, voire des aires somato-sensorielles cérébrales, relatives aux doigts, durant une tâche arithmétique, chez l'enfant et l'adulte. Certaines études ont plus précisément concouru à montrer une implication du cortex prémoteur dorsolatéral, durant l'effectuation d'additions mentales ou le traitement de formules mathématiques par des adultes. De telles tâches arithmétiques supposent certes un traitement numérique (*e.g.* : lecture des nombres impliqués dans un calcul) en lui-même susceptible de mobiliser les aires motrices cérébrales et en particulier le cortex prémoteur (§ 2.2.). Il est cependant crédible que les demandes propres à une tâche arithmétique (opérations sur des nombres, analyse de formules, etc.) puissent en elles-mêmes requérir une mobilisation des aires motrices cérébrales. Ainsi Tschentscher et Hauk (2014) ont-ils produit des résultats, dans le cas de l'addition et de la multiplication mentale,

montrant une activation accrue des aires motrices cérébrales durant des calculs complexes, comparativement à des calculs plus simples. Il pourrait ainsi en aller de stratégies procédurales favorisées par les calculs complexes (*e.g.* : application des règles opératoires, etc.), les calculs simples favorisant le recours à des stratégies de recouvrement (*i.e.* : récupération de résultats mémorisés au fil des expériences) (Thevenot, Castel, Fanget, & Fayol, 2010 ; Tschentscher & Hauk, 2014).

2.4. Synthèse

Plusieurs études comportementales suggèrent l'existence d'une relation entre mouvement et traitement numérique ou performance arithmétique, au regard de la gnose des doigts, du recours à une gestuelle pour résoudre un problème mathématique ou à la manipulation de quantités via un boulier pour apprendre à calculer mentalement.

De ce point de vue, l'éventualité d'une mobilisation des régions cérébrales motrices, et en particulier du cortex prémoteur, apparaît envisageable à la lumière de travaux en neurosciences cognitives suggérant que les régions cérébrales motrices ont, outre un rôle déterminant dans le contrôle moteur, des fonctions cognitives. Des méta-analyses intéressant le cortex prémoteur suggèrent notamment que celui-ci puisse être subdivisé en zones assumant des fonctions cognitives et/ou motrices, voire qu'il puisse constituer un secteur d'interaction entre les réseaux cérébraux cognitif et moteur. Aussi est-il envisageable que des apprentissages relatifs aux nombres, au comptage ou au calcul impliquant la corporéité et le mouvement puissent influencer sur un traitement numérique ou une performance arithmétique en l'absence de mouvement.

En tout état de cause, des travaux recourant à la stimulation magnétique transcranienne ont montré une possible implication des circuits moteurs de la main durant un traitement numérique et des travaux recourant à l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle ont avéré une implication significative du cortex prémoteur durant un traitement numérique. Plusieurs études recourant à l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle ont aussi montré une implication des régions cérébrales motrices, voire sensorimotrices, durant différentes tâches arithmétiques (soustraction, addition et multiplication mentales, analyse des expressions algébriques ou arithmétiques de formules mathématiques). Plusieurs d'entre elles ont plus précisément avéré une activation fonctionnelle accrue du cortex prémoteur durant un calcul mental ou l'analyse d'une formule mathématique en l'absence de mouvement, chez l'adulte. Il est par ailleurs envisageable que ces résultats soient liés aux demandes propres des tâches arithmétiques, et pas

seulement au traitement numérique qu'elles impliquent, puisqu'il a été trouvé une activation fonctionnelle accrue des régions cérébrales motrices lors d'additions et de multiplications complexes, comparativement à des additions et multiplications plus simples.

En définitive, une série d'études, principalement en appui sur la neuro-imagerie fonctionnelle, vient confirmer l'existence d'un possible lien entre mouvement et traitement numérique ainsi que performance arithmétique. L'essentiel de ces travaux tend à éclairer cette relation dans le cas de la main et des doigts, au regard de communautés dans les mécanismes cérébraux impliqués, d'une part, dans la préparation du mouvement, d'autre part, dans le traitement numérique et/ou la performance arithmétique.

D'autres travaux, comportementalistes, invitent par ailleurs à envisager une éventuelle relation entre mouvement et traitement numérique ou performance arithmétique au-delà du seul cas de la main et des doigts, sous l'angle de mécanismes attentionnels communs au contrôle de la direction d'un mouvement et au traitement numérique ainsi qu'au calcul, en appui sur une représentation mentale des nombres qui serait spatialement organisée. Ces travaux seront envisagés ci-après.

3. Représentation mentale des nombres, attention visuo-spatiale et mouvement

Une série d'études a montré que le mouvement est susceptible d'interférer sur la performance concomitante d'une tâche arithmétique de calcul (§ 1.3. et 1.4. ; *e.g.* : Brooks et al., 2018 ; Imbo et al., 2011 ; Michaux et al., 2013). De tels résultats suggèrent l'existence d'une possible relation entre mouvement et calcul sous l'angle de mécanismes cérébraux qui seraient impliqués dans celui-ci comme dans celui-là. Des travaux (§ 2.) ont en cohérence notamment montré une activation fonctionnelle accrue des régions motrices cérébrales, et notamment du cortex prémoteur, lors d'un traitement numérique et/ou durant la réalisation de tâches arithmétiques.

D'autres études, comportementales, inscrites dans le prolongement de travaux anciens (Galton, 1880) indiquant que les nombres sont mentalement représentés sous forme de configurations spatialement structurées (Hubbard, Piazza, Pinel, & Dehaene, 2005), ont par ailleurs fourni un éclairage complémentaire quant aux éventuelles relations entre mouvement et traitement numérique, voire performance arithmétique. Les protocoles d'une partie de ces études ont intégré des mouvements effectifs, les résultats suggérant que le contrôle de la direction d'un mouvement et la réalisation d'une tâche arithmétique puissent être sous-tendus par des mécanismes d'attention visuo-spatiale similaires. Ces études seront considérées ci-après pour approfondir la question des liens entre mouvement et tâches numériques et/ou arithmétiques.

3.1. L'hypothèse d'une ligne numérique mentale

Dans le prolongement des travaux de Galton (1880), l'hypothèse d'une représentation mentale des nombres et quantités sur une ligne numérique mentale (*mental number line*) analogique a été émise par Moyer et Landauer (1967) ainsi que Restle (1970). L'idée est ici que les grandeurs numériques sont ordonnées mentalement de façon croissante sur une ligne, depuis la gauche vers la droite dans les cultures occidentales, *i.e.* : dans le cas de sujet habitués à un sens d'écriture et de lecture de gauche à droite (*e.g.* : Bonato, Zorzi, & Umiltà, 2012).

Cette hypothèse a notamment été étudiée via des tâches appelant à estimer la position d'un nombre sur un segment de droite dont les extrémités sont bornées par deux valeurs (*e.g.* : 0 et 100). Ce type de tâches reflète en somme les rapports entre grandeurs dans le système de représentation des sujets. Dans ce cadre, la distance entre la borne 0 et une grandeur donnée x

(e.g. : 30) devrait logiquement être deux fois plus grande que la distance entre 0 et la moitié de x . On aurait ainsi une relation linéaire entre grandeur estimée (positionnement sur la ligne) et grandeur réelle correspondante x , selon une fonction affine croissante : $f(x) = x$. Dans les faits, cette relation entre grandeur positionnée sur une ligne bornée et grandeur réelle semble de type logarithmique : $f(x) = k \cdot \ln(x)$, k étant ici une constante, \ln étant le logarithme népérien du nombre x (Young & Opfer, 2011). Si cette relation tend à se linéariser localement au fil de l'ontogenèse (Figure 9), Young et Opfer (2011) ont produit une synthèse défendant que celle-ci demeure globalement de type logarithmique chez l'adulte.

Figure 9 – Positionnement de grandeurs sur une ligne bornée aux extrémités, selon l'âge



Dans les Figures 9.A, B et C, présentées par Young et Opfer (2011) les valeurs à positionner sur une ligne bornée par des valeurs aux extrémités (e.g. : Figure 9.A : 0-100) sont indiquées en abscisse (*Actual value*) et les valeurs positionnées sur cette ligne bornée sont indiquées en ordonnée (*Median estimate*). Les données des Figures 9.A, 9.B et 9.C, fonction de l'âge des sujets (croissant de A à C), émanent respectivement de Siegler et Booth (2004), Opfer et Thompson (2008) et Thompson et Opfer (2010).

L'idée de ligne numérique mentale a été initialement étayée par des résultats expérimentaux mettant en évidence un effet de distance et un effet de taille, retrouvés dans le cas de diverses grandeurs continues (e.g. : lumière, son), des nombres en notation symbolique (e.g. : chiffres arabes) mais aussi dans le cas de quantités représentées de façon non symbolique (De Hevia, Vallar, & Girelli, 2008). Au regard de l'effet de distance, les sujets apparaissent d'autant plus rapides et précis pour comparer deux nombres que l'écart entre ces nombres est grand. Au regard de l'effet de taille, pour un écart inter nombres donné, la comparaison des nombres est plus rapide et précise lorsqu'il s'agit de petits nombres que de grands nombres.

L'hypothèse d'une telle relation entre nombres et espace a suscité une diversité de paradigmes expérimentaux. Certaines études ont utilisé une tâche consistant à déterminer le milieu d'un segment linéaire horizontalement orienté et comportant des indications numériques qui se sont avérées biaiser les réponses. Ainsi, dans une étude de Fischer (2001), la tâche consistait à découper (manuellement), en deux parties égales, des lignes composées de chiffres (e.g. : lignes

de 2 ou lignes de 9). Les résultats ont montré que les sujets découpaient les segments en portions inégales, la partie gauche étant moins longue que la droite quand la ligne était composée de 2 et la partie gauche, plus longue que la partie droite quand la ligne était composée de 9. Les résultats de Fischer (2001) ont en outre été confirmés par ceux de Calabria et Rosetti (2005), ceux-là ayant utilisé des lignes composées des chiffres, écrits en français, DEUX et NEUF, pour limiter les disparités d'apparence des stimuli. De tels résultats suggèrent que deux nombres attirent automatiquement l'attention sur une direction de l'espace, vers la gauche pour le plus petit d'entre eux et vers la droite pour le plus grand, ce qui est cohérent avec l'hypothèse d'une représentation des nombres sur une ligne mentale numérique.

D'autres paradigmes expérimentaux ont conduit à des résultats avérant une telle influence des nombres sur l'attention spatiale des sujets. Il en va notamment d'une étude de Fischer, Castel, Dodd et Pratt (2003). Dans cette étude, les sujets étaient placés face à un écran d'ordinateur au centre duquel il leur était présenté un nombre à un chiffre (chiffres arabes : 1, 2, 8 ou bien 9). De part et d'autre du point central de l'écran (à gauche et à droite, donc) étaient disposées deux cellules carrées indiquant les possibles localisations d'un stimulus à venir (*i.e.* : un cercle apparaissant dans l'un des deux carrés). Les sujets étaient conscients de ce que le nombre présenté au centre de l'écran ne fournissait aucune indication quant au carré en lequel le cercle allait apparaître. Ce nombre était affiché au centre de l'écran pendant 300ms puis disparaissait et, suite à un délai aléatoire, un cercle apparaissait dans l'une des deux cellules carrées. Dès qu'ils détectaient la présence du cercle, les sujets devaient répondre en appuyant sur la barre d'espace d'un clavier avec leur main dominante. Les résultats ont suggéré que la visualisation d'un nombre (ici 1, 2, 8 ou 9) induit une centration de l'attention sur une zone de l'espace congruente avec la position relative de ce nombre sur une ligne numérique mentale (Fischer et al., 2003, p. 556), la présentation des nombres 1 et 2 favorisant une réponse rapide aux stimuli apparaissant à gauche de l'écran (comparativement aux nombres 8 et 9) et celle des nombres 8 et 9, favorisant une réponse rapide aux stimuli apparaissant à droite (comparativement aux nombres 1 et 2).

Plusieurs paradigmes expérimentaux ont ainsi fourni des résultats étayant l'hypothèse d'un recours à une ligne mentale numérique pour représenter les nombres, orientée de la gauche vers la droite dans les cultures occidentales. Cette hypothèse a également été étayée par des études recourant à des tâches de classification numérique. En ce cadre, l'effet SNARC (*Spatial Numerical Association of Response Codes*) constitue l'une des démonstrations patentes des relations entre nombres et espace.

3.2. Effet SNARC

L'effet SNARC a originellement été observé par Dehaene, Bossini et Giraux (1993) lors de l'étude des temps de réponse de sujets adultes français réalisant une tâche de spécification du caractère pair ou bien impair de nombres (de zéro à neuf ; Figure 10).

Figure 10 – Effet SNARC : protocole et résultats



Les sujets se voyaient présenter un nombre (entre un et neuf) sur un écran et devaient juger ce nombre en tant que pair ou bien impair, le plus vite possible (Figure 10.A, extraite de De Hevia et al., 2008). Les réponses relatives aux nombres les plus grands se sont avérées plus rapides lorsqu'elles étaient à donner depuis le côté droit de l'espace (main droite sur la Figure 10.A) et les réponses relatives aux nombres les plus petits se sont avérées plus rapides quand elles étaient à fournir depuis le côté gauche de l'espace (main gauche sur la Figure 10.A). Le graphe Figure 10.B (tiré d'Hubbard et al., 2005) rend compte des différences des temps de réponse donnés par la main gauche et des temps de réponse donnés par la main droite selon les nombres à catégoriser comme pairs ou impairs.

L'effet SNARC rend ainsi originellement compte de ce que des sujets français réagissent manuellement plus rapidement à de petits nombres (comparativement à des plus grands nombres) depuis le côté gauche de l'espace (Figure 10.A) et plus rapidement à de grands nombres (comparativement à de plus petits nombres) depuis le côté droit de l'espace (Figure 10.A). Cet effet est apparu lié aux grandeurs relatives en présence : ainsi lorsque les nombres à traiter étaient compris entre zéro et cinq, les nombres quatre et cinq ont favorisé des temps de réponse plus rapides depuis le côté droit et lorsque les nombres à traiter étaient compris entre quatre et neuf, les nombres quatre et cinq ont favorisé des temps de réponse plus rapides depuis le côté gauche (en chaque cas, comparativement aux autres nombres à traiter ; Dehaene et al., 1993). L'effet SNARC a en outre été repéré quand les nombres étaient écrits en chiffres arabes comme quand ils l'étaient en toutes lettres (Dehaene et al., 1993). Cet effet s'est aussi avéré indépendant du fait que les sujets soient droitiers ou gauchers et a été observé quand ils répondaient en ayant les mains croisées (Dehaene et al., 1993). L'effet SNARC a aussi été avéré dans le cas de nombres à deux chiffres (Zhou, Chen, Chen, & Dong, 2008).

Cet effet s'est avéré culturellement dépendant, la littérature attestant généralement (e.g. : De Hevia et al., 2008) d'une influence des habitudes installées quant au sens de lecture (depuis la

gauche vers la droite vs depuis la droite vers la gauche) ou quant à la logique de présentation des nombres (horizontale, verticale). Dehaene et al. (1993) ont ainsi étudié l'effet SNARC chez des sujets iraniens (habitué à un sens de lecture de droite à gauche) dont certains étaient arrivés en France de longue date (*i.e.* : avaient pris l'habitude d'un sens de lecture de gauche à droite) et d'autres avaient quitté l'Iran récemment (et/ou avaient appris une langue avec sens de lecture de gauche à droite récemment). En ce qui concerne les sujets habitués à un sens de lecture de gauche à droite, les résultats ont montré un effet SNARC identique à celui de sujets français dans une tâche de détermination du caractère pair ou bien impair de nombres présentés, *i.e.* : réponses manuelles plus rapides depuis le côté gauche du sujet pour les plus petits nombres de la série présentée et réponses plus rapide depuis le côté droit pour les plus grands nombres. En revanche, dans le cas des sujets non habitués à un sens de lecture de gauche à droite, cet effet est apparu moindre, voire inversé. D'autres travaux ont confirmé ces résultats, notamment dans le cas de sujets libanais habitués à un sens de lecture de la droite vers la gauche (Zebian, 2005). Plusieurs études ont en tout état de cause confirmé l'effet SNARC. Les revues de De Hevia et al. (2008) ainsi qu'Hubbard et al. (2005) soulignent ainsi que l'effet SNARC a été avéré avec différentes modalités de présentation des stimuli numériques : nombres écrits en chiffres arabes comme en toutes lettres (Fias, 2001), présentés visuellement comme en mode audio (Nuerk, Wood, & Gilmes, 2005), quantités représentées par des ensembles de points (Nuerk et al., 2005), etc. Il a également été avéré (Hubbard et al., 2005) que l'effet SNARC est de nature à survenir dans le cas de tâches intégrant des réponses bi-manuelles (*e.g.* : Dehaene et al., 1993 ; Figure 10) mais aussi dans des tâches où les sujets répondaient en pointant avec une seule main un bouton situé sur la gauche ou bien la droite (Fischer, 2003) ou encore via des saccades visuelles (Schwartz & Keuss, 2004). En définitive, comme l'indique la méta-analyse de Wood, Willmes, Nuerk, et Fischer (2008), l'effet SNARC concourt à suggérer l'existence d'une représentation visuo-spatiale abstraite (*i.e.* : valant que les nombres à considérer soient présentés en chiffres arabes, en toutes lettres, etc., que les quantités soient exprimées via des ensembles de points, etc.) des nombres sur une ligne numérique mentale. Représentation qui serait en outre indépendante des effecteurs utilisés pour indiquer les réponses dans les tâches qu'elle implique (Hubbard et al., 2005).

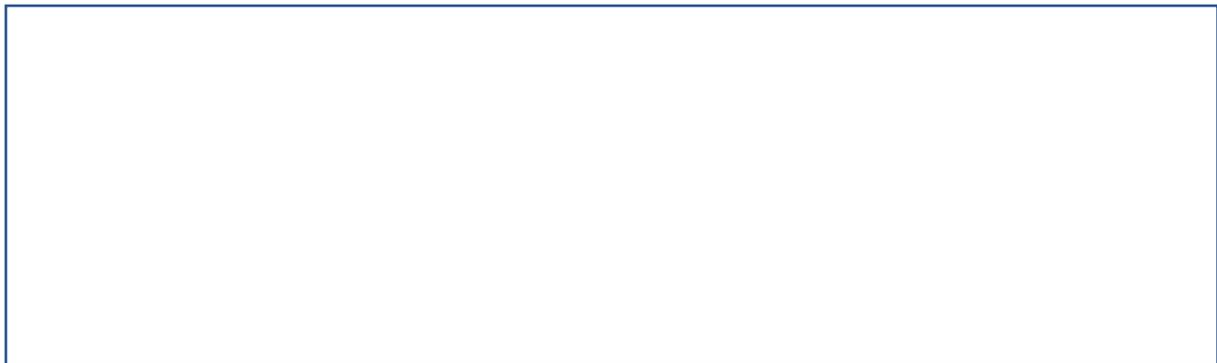
L'idée de ligne numérique mentale, activée durant le traitement des nombres, suggère des fixations et des changements de fixation de l'attention spatialement orientés (selon une direction horizontale gauche-droite ou droite-gauche ou selon une direction verticale bas-haut ou haut-bas). Les travaux relatifs à une telle représentation des nombres et quantités suggèrent

en outre que ces phénomènes attentionnels sont de nature à impacter l'attention portée à l'espace physique. Par ailleurs, il a été suggéré que l'activation d'une telle ligne numérique mentale durant des calculs tels que l'addition et la soustraction mentales pourrait également susciter des changements de focus attentionnel, respectivement dirigés vers la droite et vers la gauche dans les cultures occidentales (Knops, Dehaene, Berteletti, & Zorzi, 2014). Il pourrait ainsi en aller de relations entre le contrôle attentionnel de la direction de mouvements effectifs et le traitement numérique ou la performance de tâches arithmétiques.

3.3. Traitement numérique, tâches arithmétiques et contrôle directionnel du mouvement

Alors que des études avaient montré que la perception des nombres est de nature à influencer sur l'attention spatiale des sujets (*e.g.* : Fischer et al., 2003), d'autres études ont examiné l'influence de mouvements latéraux ou verticaux sur la production aléatoire concomitante de nombres. Ces études ont avéré que le mouvement produit est de nature à influencer sur les nombres générés. Loetscher, Schwartz, Schubiger, et Brugger (2008) ont ainsi étudié les effets de mouvements latéraux de la tête (vers la gauche ou bien vers la droite) sur la production aléatoire de nombres compris entre un et trente (Figure 11).

Figure 11 – Effet d'une rotation latérale de la tête sur la génération aléatoire de nombres



Le protocole de Loetscher et al. (2008) est ici présenté en appui sur le schéma produit par les auteurs (Figure 11.A). Des sujets droitiers ont eu à énoncer des nombres compris entre un et trente selon une dynamique la plus aléatoire possible. Les sujets ont effectué cette tâche à deux reprises (ordre contrebalancé au sein du groupe de sujets) : (1) en conservant la tête fixe, orientée vers l'avant (référence) et (2) en ayant à tourner la tête de façon récurrente de gauche à droite puis de droite à gauche, etc. (Figure 11.A). Les expérimentateurs ont ainsi collecté 80 réponses (nombres générés) par tâche (40 lorsque la tête tournait vers la gauche et 40 quand elle tournait vers la droite). La moitié des sujets a aussi eu pour consigne d'imaginer une règle graduée avec 30 unités, cela étant censé faciliter la génération de nombres, tandis que l'autre moitié ne bénéficiait pas de cette aide. Les résultats (Figure 11.B) ont montré que les sujets ont significativement produit plus de petits nombres (*i.e.* : nombres inférieurs à 16) que cela n'aurait été le cas lors d'un tirage au sort lorsque leur tête était fixe (ce résultat étant cohérent avec la littérature, *e.g.* : Loetscher & Brugger, 2007) et lorsqu'elle tournait vers la gauche mais pas lorsqu'elle tournait vers la droite. Plus de petits nombres ont en outre été produits lorsque la tête tournait vers la gauche que quand la tête était fixe. Le recours à l'image d'une règle graduée (*ruler vs no ruler*, Figure 11.B) s'est également avéré accentuer les effets observés dans cette production de nombres.

Les résultats de Loetscher et al. (2008) ont ainsi avéré une influence du sens de rotation de la tête sur la production aléatoire de nombres. Ils suggèrent ainsi un effet de compatibilité entre direction du mouvement et possible représentation des nombres selon une ligne numérique mentale orientée depuis la gauche vers la droite.

Ces résultats ont par la suite été confirmés dans le cas de mouvements, d'une part, de type gauche-droite, d'autre part, de type bas-haut. Winter et Matlock (2013) ont ainsi étudié, via un protocole similaire à celui de Loetscher et al. (2008), l'effet de mouvements latéraux (gauche-droite-gauche, etc.) et de mouvement verticaux (bas-haut-bas, etc.) de la tête sur la production aléatoire de nombres. Leurs résultats corroborent ceux de Loetscher et al. (2008) dans le cas des mouvements latéraux et montrent en outre un effet des mouvement verticaux du même type (les mouvements vers le bas favorisant la génération aléatoire de petits nombres et les mouvements vers le haut, celle de grands nombres), ce dernier effet étant plus prononcé que le premier. Les résultats de Winter et Matlock (2013) ont en outre avéré une corrélation entre l'effet lié aux mouvements latéraux et l'effet lié aux mouvements verticaux, suggérant qu'ils sont sous-tendus par des mécanismes cérébraux au moins en partie similaires.

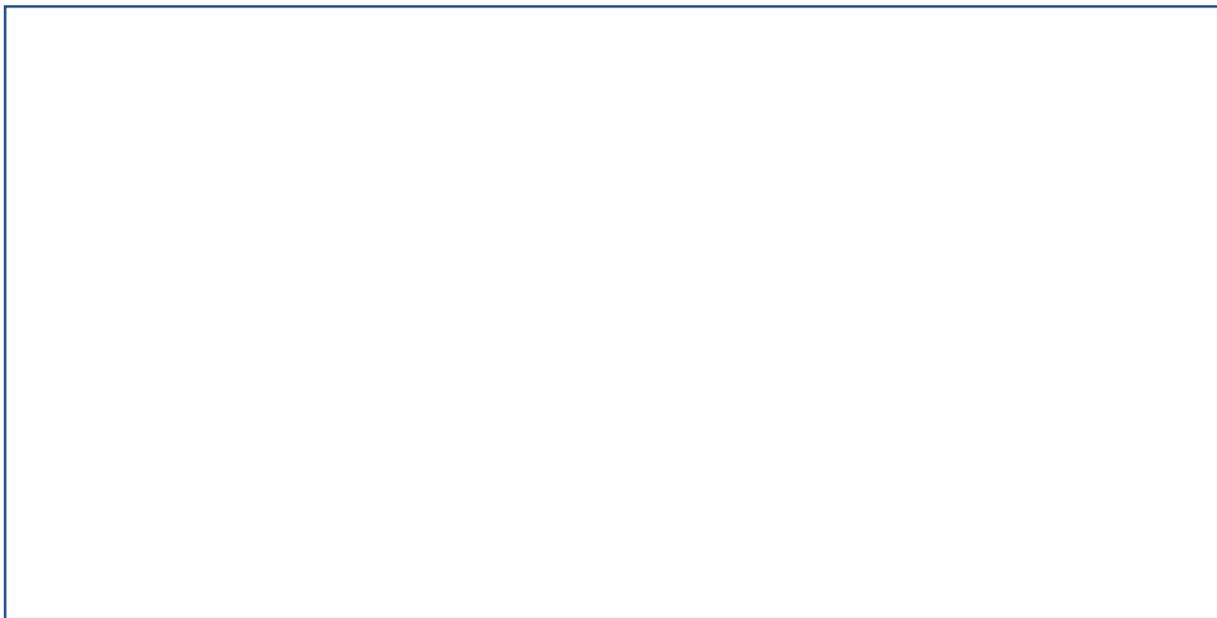
Dans la même logique, Hartmann, Grabherr, et Mast (2012) ont étudié l'effet d'un déplacement passif du corps des sujets, d'une part, latéralement, d'autre part, verticalement, sur la production aléatoire de nombres. Les mouvements vers la gauche, comme vers le bas, se sont avérés à nouveau favoriser significativement la production de petits nombres et les mouvements vers la droite ou vers le haut, celle de grands nombres. Cette étude a en outre montré que la détection de déplacements passifs vers la gauche est de nature à être favorisée par la présentation audio de petits nombres et la détection de déplacements vers la droite, par la présentation audio de grands nombres. Ces résultats corroborent donc, dans le cas de déplacements passifs du corps en sa globalité, ceux obtenus par Loetscher et al. (2008) ainsi que Winter et Matlock (2013) avec des mouvements actifs de la tête. Une série de résultats expérimentaux suggère ainsi que le contrôle de la direction d'un mouvement actif, tout comme la perception de la direction d'un mouvement, puisse renvoyer à des mécanismes attentionnels similaires à ceux impliqués dans la représentation mentale des nombres durant une tâche numérique.

Le contrôle de la direction d'un mouvement semble également mobiliser des mécanismes attentionnels requis par certaines tâches arithmétiques. Wiemers et al. (2014) ont ainsi avéré un effet de compatibilité entre la direction d'un mouvement du bras et la performance d'additions mentales ainsi que celle de soustractions mentales. Leurs résultats montrent que la performance en soustraction est détériorée par des mouvements concomitants vers la droite, comme par des

mouvements vers le haut, et que la performance en addition est détériorée par des mouvements concomitants vers la gauche, comme par des mouvements vers le bas.

Ce type de résultats a également été rapporté dans le cas de mouvements du corps dans sa globalité. Les résultats de Lugli, Baroni, Anelli, Borghi, et Nicoletti (2013) ont ainsi montré un effet du déplacement passif du corps en sa globalité (via un élévateur) sur la performance d'additions et de soustractions mentales concomitantes à ce déplacement, un déplacement vers le bas se révélant favoriser la performance des soustractions et un déplacement vers le haut, celle des additions. De tels effets n'ont certes pas été repérés par ces auteurs quand les calculs étaient effectués après un déplacement (vertical) passif du corps ou pendant un déplacement actif (marche dans des escaliers). Cependant, les résultats d'Anelli, Lugli, Baroni, Borghi, et Nicoletti (2014) rendent compte d'un effet de compatibilité entre direction d'une marche à pieds effective (avec un virage à gauche vs à droite) et la performance concomitante d'additions et de soustractions mentales (Figure 12).

Figure 12 – Effet de la direction d'une marche à pieds sur la soustraction et l'addition mentales



Au début de l'expérimentation (Figure 12.A), le sujet expérimental et l'expérimentateur marchaient côté à côté (côté déterminé aléatoirement), en ligne droite. L'expérimentateur indiquait ensuite verbalement : (1) un nombre (e.g. : 342), (2) une opération arithmétique à appliquer (e.g. : + 3), (3) une direction à emprunter (i.e. : à droite, comme sur la Figure 12.A, ou bien à gauche). Après un signal de départ (« Go »), le sujet prenait la direction indiquée et continuait à marcher pendant 22 s en répétant le nombre initial (342) puis en indiquant le résultat de l'opération (+ 3) à effectuer mentalement (i.e. : 348), puis celui de l'opération suivante (i.e. : le résultat de 348 + 3), etc., jusqu'au signal de fin. Les nombres moyens de calculs corrects en condition congruente (i.e. : soustraction avec marche à gauche et addition avec marche à droite) et en condition non congruente (soustraction avec marche à droite et addition avec marche à gauche) sont indiqués Figure 12.B (les barres indiquent l'erreur standard de la moyenne).

Cet effet (Figure 12.B) a été repéré en comparant les performances sur l'ensemble des conditions congruentes (soustraction avec marche à gauche et addition avec marche à droite) et des conditions non congruentes (soustraction avec marche à droite et addition avec marche à gauche). En effectuant des comparaisons par opération, la performance (nombre de calculs exacts) en condition congruente s'est néanmoins avérée significativement supérieure à la performance en condition non congruente dans le seul cas de l'addition.

Une série de résultats expérimentaux suggère en tout état de cause un lien possible entre mouvement et traitement des nombres ou calcul sous l'angle de mécanismes attentionnels qui sous-tendraient tout à la fois le contrôle de la direction d'un mouvement et le traitement numérique ou le calcul à partir d'une représentation spatiale des nombres.

3.4. Représentation spatiale des nombres et expériences motrices ou sensorimotrices

L'hypothèse d'une ligne mentale numérique a suscité une série de travaux étayant l'idée d'une représentation spatiale des nombres, lesquels seraient mentalement organisés en ordre croissant sur une ligne, le sens de classement dépendant de la culture d'appartenance, *e.g.* : depuis la gauche vers la droite ou depuis le bas vers le haut. Il serait pris appui sur une telle représentation pour réaliser diverses tâches numériques ou arithmétiques. Il en irait dès lors d'une centration de l'attention sur ce repère spatialement structuré, ce qui mobiliserait des mécanismes communs avec ceux qui sous-tendent le contrôle de la direction d'un mouvement. Cela pourrait par exemple expliquer qu'un mouvement du bras vers la droite est de nature à détériorer la performance d'une soustraction mentale concomitante, dans le cas de sujets européens, comme l'ont montré Wiemers et al. (2014).

La représentation mentale, spatialement organisée, des nombres qu'élabore un sujet tiendrait, outre à sa culture d'appartenance (sens de lecture et d'écriture), à une diversité de facteurs contextuels (De Hevia et al., 2008). Le fait d'habituer un sujet à se représenter les nombres sur une horloge à aiguilles qui lui fait face est ainsi de nature à susciter des effets SNARC inversés (sujets occidentaux) avec réponses plus rapides depuis le côté droit pour les plus petits nombres et réponses plus rapides depuis le côté gauche pour les plus grands nombres (Bächtold, Baumüller, & Brugger, 1998). La représentation élaborée modulerait en tout état de cause la relation éventuelle entre traitement numérique ou tâche arithmétique et mouvement.

L'effet SNARC (§ 3.2.) a en cohérence été repéré chez des sujets français, dans des tâches de classification numérique requérant une réponse manuelle (*e.g.* : Dehaene et al., 1993). D'autres études ont cependant suggéré que les expériences motrices et/ou sensorimotrices d'un sujet

peuvent influencer sur la représentation spatiale des nombres qu'il privilégie. Di Luca, Granà, Semenza, Seron, et Pesenti (2008) ont produits des résultats indiquant cette possible influence. Dans cette étude, les sujets (étudiants italiens) ont eu à répondre à la présentation visuelle d'une série de nombres écrits en format arabe (un seul nombre, de 1 à 10, à chaque présentation), en appuyant sur les touches d'un clavier selon des associations prédéterminées entre nombres et doigts. Les sujets répondaient à partir d'un positionnement de leurs dix doigts sur le clavier précisé Figure 13.

Figure 13 – Position des mains sur le clavier dans l'étude de Di Luca et al. (2008)

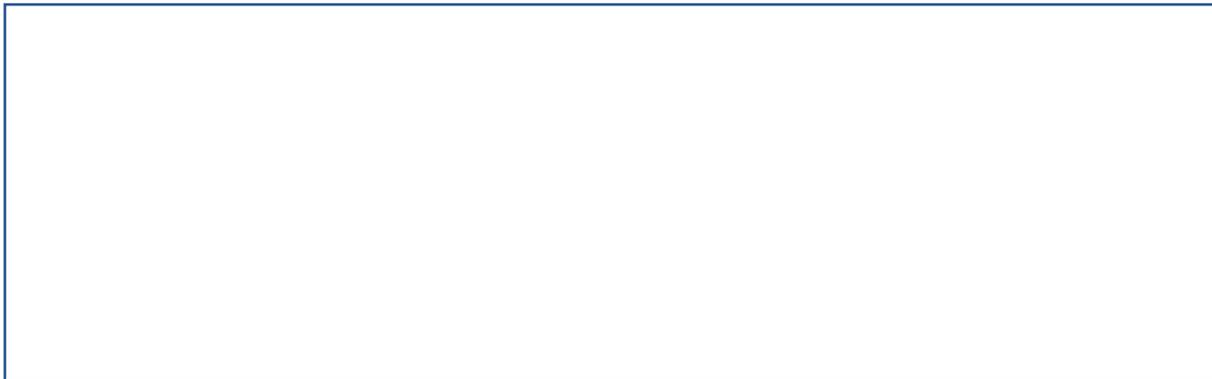


Les cinq touches de la partie gauche du clavier indiquées par un disque noir correspondent aux doigts de la main gauche et les cinq touches de la partie droite indiquées par un disque noir, aux doigts de la main droite. Dans chaque cas, p = petit doigt, a = annulaire, m = majeur, i = index et P = pouce (image produite à partir de Di Luca et al, 2008).

Différentes associations entre doigts et nombres ont été considérées dans l'étude de Di Luca et al. (2008), auxquelles les sujets se sont exercés, en chaque cas en appui sur un dessin indiquant la correspondance à respecter entre nombre et doigts. L'une d'elles était dénommée « *SNARC-congruent* » par Di Luca et al. (2008, p. 1650), dans le sens où la correspondance entre doigts et nombres (Figure 14.A) renvoyait à une disposition spatiale des nombres depuis le petit doigt de la main gauche (un) jusqu'au petit doigt de la main droite (dix). Cette disposition est ainsi congruente avec celle caractérisant la représentation mentale des nombres mobilisée *par défaut* (De Hevia et al., 2008) par les sujets occidentaux. Une autre correspondance entre doigts et nombres, dénommée « *Italian counting* », était celle à laquelle les sujets expérimentaux avaient été habitués depuis leur enfance. Ces sujets (adultes) avaient en effet suivi leur scolarité en Italie et avaient acquis de ce fait l'habitude singulière de compter depuis un jusqu'à cinq à partir du pouce de la main droite et jusqu'au petit doigt de cette main et, de six à dix, du pouce de la

main gauche jusqu'au petit doigt de cette même main (Figure 14.B.). Cette correspondance entre nombres et doigts renvoie ainsi à une disposition spatiale des nombres qui n'est pas « *SNARC-congruent* » au sens de Di Luca et al. (2008). Cette configuration « *Italian counting* » n'est pas pour autant l'opposée de la configuration « *SNARC-Congruent* », également envisagée par Di Luca et al. (2008) en tant que configuration « *SNARC-Incongruent* » (Figure 14.C.).

Figure 14 – Correspondances entre nombres et doigts dans l'étude de Di Luca et al. (2008)



Di Luca et al. (2008) ont envisagé les configurations des correspondances entre nombres (de 1 à 10 en format arabe) et doigts (des deux mains) selon leur congruence avec une disposition des nombres en ordre croissant de gauche à droite (disposition censée correspondre à la ligne numérique activée par défaut, dans les cultures occidentales, pour se représenter mentalement les nombres). Les auteurs ont envisagé que cette congruence puisse exister ou non pour les nombres de 1 à 5 (S = *small numbers*) et de 6 à 10 (L = *large numbers*). Par conséquent, ces auteurs ont envisagé que celle-ci puisse exister ou non au niveau de la main gauche (*Hand / left*) et de la main droite (*Hand / right*). Se dégagent ainsi trois options : (A) congruence totale (*SNARC-Congruent*), (B) congruence partielle [avec plusieurs possibles, celui présenté ici, « *Italian counting* » renvoyant à une congruence dans le seul cas des nombres de 1 à 5 (S), au niveau de la main droite (*Hand / right*)] et (C) une absence totale de congruence (*SNARC-Incongruent*).

Les résultats de Di Luca et al. (2008) ont montré que les sujets étaient plus performants pour répondre lorsqu'ils avaient à se reporter à la correspondance « *Italian counting* » que quand ils devaient se reporter à la correspondance « *SNARC-Congruent* ». Cet avantage a en outre été avéré que les repères fournis pour opérer la correspondance entre nombres et doigts soient fournis via des dessins de mains vues de dessus ou bien vues de dessous. Ces résultats suggèrent ainsi que les stratégies de comptage sur les doigts sont de nature à influencer sur la manière dont les nombres sont préférentiellement représentés et traités mentalement.

En cohérence, les résultats de Badets, Bouquet, Ric, et Pesenti (2012) ont suggéré une possible influence de processus sensorimoteurs dans la représentation mentale des nombres. Une influence des quantités associées aux nombres sur l'ouverture et/ou la fermeture d'une saisie manuelle ou digitale ayant été avérée (Andres et al., 2004 ; Andres et al., 2008), l'étude de Badets et al. (2012) a examiné l'influence de la vidéo d'une main en train de se refermer sur la

génération aléatoire de nombres compris entre un et dix. Les résultats ont montré que la vidéo d'une main réelle a suscité une production significativement accrue de petits nombres quand aucun effet de la vidéo d'une main artificielle sur la génération de nombres n'a été décelé. Seule l'observation d'une main réelle se refermant semble avoir évoqué l'idée de petite quantité et impacté de ce fait la génération de nombres, ce qui suggère une possible influence de processus sensorimoteurs dans la représentation mentale des nombres (Badets et al., 2012).

3.5. Ouverture

L'hypothèse d'une représentation analogique des nombres selon une ligne numérique mentale les classant par ordre croissant a été accréditée par une série de travaux : en particulier, un effet SNARC a été avéré à plusieurs reprises dans des tâches de classification numérique (*e.g.* : jugement de parité) avec réponse manuelle gauche et droite (De Hevia et al., 2008). De tels travaux ont ainsi suggéré un possible rôle déterminant de l'attention visuo-spatiale dans le traitement numérique et dans la réalisation de certaines tâches arithmétiques (*e.g.* : addition et soustraction mentale). Il a de fait été vérifié expérimentalement que le traitement numérique est de nature à impacter l'attention portée à l'espace physique. Il a aussi été montré que des mouvements latéraux ou verticaux de segments corporels ou du corps en sa globalité sont de nature à interférer avec le traitement numérique ainsi qu'avec la réalisation d'additions ou de soustractions mentales. L'hypothèse du recours à une ligne numérique mentale pour représenter les nombres, les traiter et effectuer certaines tâches arithmétiques a ainsi suscité des travaux suggérant que la réalisation de tâches numériques et/ou arithmétiques puisse requérir des processus attentionnels également mobilisés dans le contrôle de la direction d'un mouvement.

Si, dans les cultures occidentales, les nombres peuvent être représentés par défaut (De Hevia et al., 2008) en ordre croissant depuis la gauche vers la droite sur une ligne numérique mentale durant la réalisation de tâches numériques ou arithmétiques, il a été montré que la représentation mentale des nombres peut être modulée par des acquis culturellement façonnés, notamment via l'apprentissage du comptage sur les doigts ou encore de gestes associés à des grandeurs. De tels acquis peuvent ainsi conduire à se représenter les nombres selon un ordonnancement autre que croissant depuis la gauche vers la droite (Fischer et al., 2003). Une série de travaux a en tout état de cause suggéré que des processus sensorimoteurs et/ou des processus impliqués dans la préparation du mouvement puissent jouer dans la représentation numérique et le traitement des nombres (*e.g.* : Hubbard et al., 2005).

Ainsi, d'une part, la représentation mentale des nombres lors d'un traitement numérique ou d'une tâche arithmétique et le contrôle de la direction d'un mouvement sont susceptibles de mobiliser des mécanismes d'attention visuo-spatiale similaires. D'autre part, la représentation mentale des nombres semble en elle-même de nature à dépendre de mécanismes cérébraux sensori-moteurs et/ou moteurs sous-tendant, par exemple, une stratégie usuelle de comptage sur les doigts. En définitive, on peut envisager que la relation éventuelle entre un mouvement et une tâche numérique ou arithmétique tient à des mécanismes d'attention visuo-spatiale communs à celui-ci et à celle-là et/ou aux expériences motrices ou sensori-motrices ayant soutenu l'accès aux nombres, à leur représentation ou encore aux opérations sur les nombres.

Les travaux étayant ces analyses ont, à ce stade de l'exposé, essentiellement examiné l'effet du mouvement sur un traitement numérique ou une tâche arithmétique qui sont concomitants ou subséquents à celui-ci. Il convient dès lors de se centrer désormais sur les études intéressant l'effet éventuel d'un traitement numérique ou une tâche arithmétique sur le mouvement.

4. Effet du traitement numérique ou d'une tâche arithmétique sur le mouvement

Si un ensemble de résultats expérimentaux concourt à étayer l'idée d'une relation entre mouvement et traitement numérique ou performance arithmétique, l'essentiel de ces résultats intéresse l'effet du mouvement sur le traitement numérique ou la performance arithmétique. Ainsi dispose-t-on de plusieurs résultats indiquant que la gnose des doigts est de nature à prédire la performance arithmétique (*e.g.* : Newman, 2016), que le mouvement peut faciliter une performance arithmétique subséquente (*e.g.* : Goldin-Meadow et al., 2009 ; Brooks et al., 2018) ou que les habitudes de comptage sur les doigts peuvent influencer sur la performance arithmétique (*e.g.* : Dohmas et al., 2010). On dispose également de travaux indiquant que les aires motrices, voire somato-sensorielles, cérébrales peuvent être mobilisées significativement, en l'absence de mouvement effectif, durant un traitement numérique (*e.g.* : Tschentscher et al., 2012) ou une performance arithmétique (*e.g.* : Hanakawa et al., 2002). Des résultats suggèrent enfin que mouvement et traitement numérique (*e.g.* : Loetscher et al., 2008) ou performance arithmétique (*e.g.* : Wiemers et al., 2014) puissent mobiliser des processus d'attention visuo-spatiale similaires, ces résultats intéressant l'influence d'un mouvement sur une tâche numérique ou arithmétique, ceux-ci étant concomitants.

L'effet réciproque du traitement numérique ou d'une tâche arithmétique sur le mouvement a quant à lui été moins étudié, à fortiori dans le cas d'une performance motrice subséquente à un traitement numérique ou à une tâche arithmétique. On est cependant en présence d'un pool de résultats éclairant cet effet, lesquels seront ci-après considérés.

4.1. Effet du traitement numérique sur le mouvement

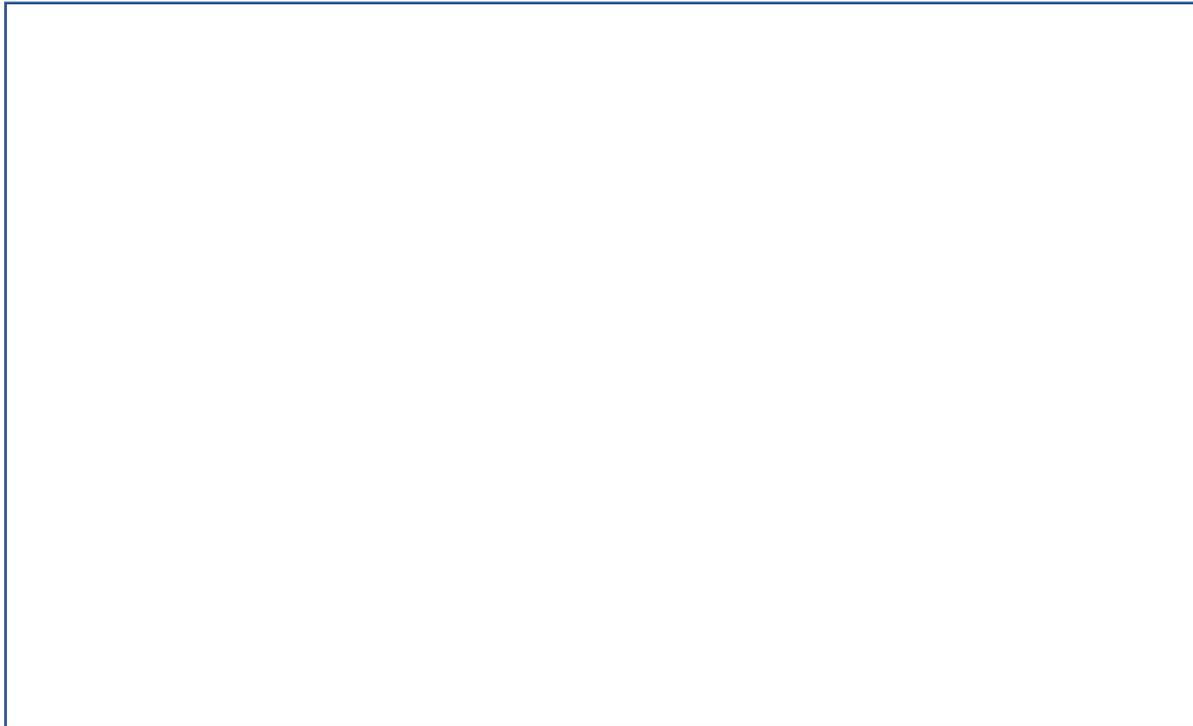
Certains travaux en prise avec l'hypothèse d'une ligne mentale numérique (§ 3.2 et 3.3.) ont fourni des indications quant à un effet du traitement numérique sur le mouvement. Ainsi les travaux relatifs à l'effet SNARC (§ 3.2.) ont montré, dans le cas de sujets occidentaux habitués à un sens de lecture-écriture de gauche à droite, que la présentation d'un petit nombre suscite une réponse motrice depuis la gauche plus rapide qu'un plus grand nombre et que celle d'un grand nombre suscite une réponse motrice depuis la droite plus rapide qu'un plus petit nombre. Si ce phénomène semble indépendant de l'effecteur en jeu (Hubbard et al., 2005), il n'en demeure pas moins que de tels résultats indiquent un effet du traitement numérique sur le mouvement.

Dans cette logique, Daar et Pratt (2008) ont en outre produit des résultats montrant que l'effet SNARC affecte non seulement la rapidité d'initialisation d'une réponse motrice mais aussi la sélection de la réponse elle-même. Les sujets expérimentaux disposaient de deux touches de clavier, l'une à la gauche du sujet, l'autre, à sa droite, pour répondre à la présentation de nombres. Ils pouvaient choisir la touche à leur convenance (confort de frappe). Les résultats ont montré que les petits nombres ont suscité significativement plus de frappes gauches que droites et les plus grands nombres, plus de frappes droites que gauches, ce qui indique une influence du traitement numérique sur le choix de la réponse motrice produite.

Rugani, Betti, Ceccarini et Sartori (2017) ont par la suite produit des résultats cohérents avec ceux de Daar et Pratt (2008), dans le cas d'un tir de précision opéré avec l'index dans un ballon (dispositif expérimental présenté Figure 15). Rugani et al. (2017) ont présenté trois types de stimuli à des sujets adultes : (1) des stimuli indiquant une direction de tir, < pour gauche et > pour droite, (2) des nombres en format arabe, 2 ou bien 8 et (3) les mêmes nombres en format non symbolique (ensembles de points). Les sujets plaçaient l'index dans une petite chaussure et devaient shooter en direction d'une mini-cage de football. Une cage était placée à gauche et une autre à droite. Un écran placé entre les deux cages, en face de l'index du sujet, présentait les stimuli. Lorsqu'un stimulus < ou > était présenté, les sujets devaient shooter dans la direction indiquée par le stimulus. En revanche, quand un stimulus numérique était présenté, les sujets avaient le choix de la cage à viser. Les résultats ont montré que le nombre 2 comme son pendant en format non symbolique, a suscité plus de shoots à gauche que cela n'aurait été le cas aléatoirement, alors que le nombre 8, comme son pendant non symbolique, n'a pas occasionné plus de tirs à gauche que cela aurait été aléatoirement le cas. Ainsi, comme dans l'étude de Daar et Pratt (2008), les résultats de Rugani et al. (2017) indiquent une influence du traitement numérique sur le choix de la réponse motrice produite.

L'étude de Rugani et al. (2017) a en outre produit des résultats quant à la cinématique des tirs réalisés qui éclairent l'influence du traitement numérique sur la réalisation-même de la réponse motrice choisie (Figure 15). Le mouvement a été analysé selon deux phases : la première depuis l'initialisation du mouvement de l'index jusqu'à l'instant de son écart latéral maximal par rapport à une ligne médiane passant par la position initiale du doigt (phase de préparation du tir), la seconde depuis cet instant-là jusqu'à la fin du mouvement, *i.e.* : l'instant où le ballon quitte le doigt (phase de finalisation du tir).

Figure 15 – Dispositif expérimental de Rugani et al. (2017) et analyse du mouvement



Trois types de stimuli (Figure 15.A) ont été utilisés dans l'expérimentation de Rugani et al. (2017) : (1) symboles indiquant une direction, < pour gauche et > pour droite, (2) deux nombres écrits en chiffres arabes, 2 et 8, (3) deux nombres présentés en écriture non symbolique, *i.e.* : ensemble de deux points et ensemble de huit points. Durant l'expérimentation, les sujets étaient assis face à une table, poignet de la main gauche reposant sur leur jambe gauche et main droite en position sur la table (*starting point*, Figure 15.B), l'index étant introduit dans une petite chaussure en plastique (3cm de longueur et 1,5 cm de largeur). Une balle (*ball*, Figure 15.B, 2,3 cm de diamètre) était placée devant la chaussure (à 2 cm du bout de la chaussure). En position initiale, les sujets devaient maintenir leur poignet droit sur un support favorisant une posture confortable (*wrist pad*, Figure 15.B). Deux mini-cages (buts) de football étaient placées à 50 cm de la chaussure, respectivement à gauche et à droite de celle-là (Figure 15.B). Un moniteur de 24 pouces (Figure 15.B) dont l'écran était au niveau des yeux des sujets permettait de présenter les stimuli. Les sujets devaient tirer vers un but, à leur propre rythme, une fois un stimulus présenté. Durant un temps d'entraînement, les sujets se sont exercés à tirer dans la direction indiquée par < et > (Figure 15.A). Durant l'expérimentation, il en était de même pour 60% des essais. Dans les 40% restants, les sujets tiraient dans une direction de leur choix, après présentation d'un nombre en chiffre arabe ou représenté par un ensemble de points (Figure 15.A). L'analyse de la cinématique du mouvement (Figure 15.C) a distingué une phase de préparation du tir (P), *i.e.* : temps entre le début du mouvement et l'écart latéral maximum par rapport à la position initiale (*trajectory deviation*, Figure 15.C), et une phase de finalisation (F), *i.e.* : temps entre la fin de P et la fin du mouvement (Figure 15. C). Dans le cas des tirs à gauche, comme dans celui des tirs à droite, une référence a été constituée, à partir de 10 tirs, respectivement opérés suite à la présentation du stimulus < et du stimulus >. Dans le cas des tirs à gauche après présentation du chiffre arabe 2, comme dans celui des tirs à droite après présentation du stimulus 8 (tracés en **bleu**, Figure 15.C), la phase P s'est avérée significativement plus longue et la phase F, significativement plus courte, que dans la condition repère (tracés en **rouge**, Figure 15.C).

Dans l'étude de Rugani et al. (2017), un tir de référence à gauche et un tir de référence à droite ont été élaborés à partir de 10 tirs suite au stimulus < et de 10 tirs suite au stimulus >, respectivement. En regard de cette référence, aucune différence significative n'a été repérée dans le cas des tirs après présentation de nombres en format non symbolique. En revanche, dans le cas des nombres en format arabe (Figure 15.C), les résultats ont montré, dans le cas des

tirs à gauche après présentation du petit nombre 2, un temps de préparation plus long (donc un temps de finalisation plus court) que dans le tir référence correspondant, le même phénomène étant repéré dans le cas des tirs à droite après présentation du grand nombre 8. Ainsi les résultats de Rugani et al. (2017) suggèrent-ils, dans le cas des nombres en chiffres arabes, que le traitement numérique influe sur le choix de la réponse motrice mais aussi sur la réalisation effective.

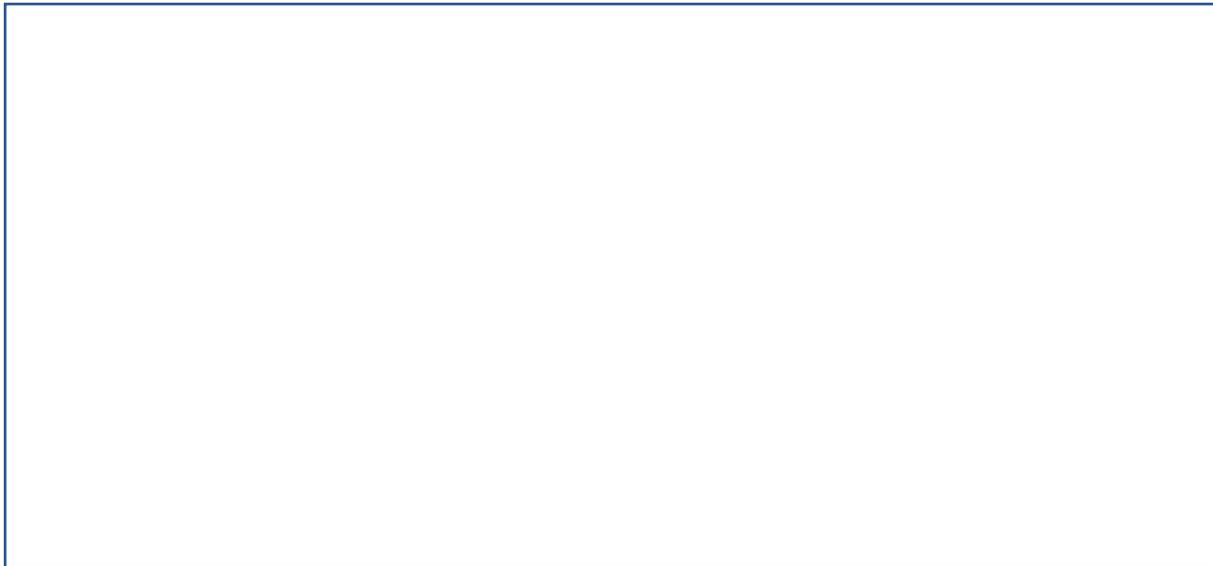
Cette possible influence du traitement numérique sur la structure du mouvement est au demeurant cohérente avec les résultats d'Andres et al. (2008) montrant que dans une tâche de saisie d'un objet avec deux doigts (pouce et index), la quantité associée à un nombre inscrit sur la face visible de l'objet influe sur la cinématique du mouvement. Les résultats ont en effet montré qu'en début de mouvement, l'ouverture de la saisie est plus grande lors de la visualisation d'un grand nombre (*i.e.* : 8 ou 9) que lors de celle d'un plus petit nombre (*i.e.* : 1 ou 2). La saisie s'est ensuite avérée évoluer pour devenir conforme à la taille de l'objet à l'approche de celui-là, ce résultat suggérant une influence de la grandeur des nombres (*i.e.* : de la quantité associée à un nombre) sur la planification et/ou la préparation du mouvement de saisie.

Si les résultats de Daar et Pratt (2008) et de Rugani et al. (2017) suggèrent une possible influence du traitement numérique sur un mouvement subséquent, en prise avec la spatialité et plus précisément avec une représentation mentale spatialement organisée des nombres, cette implication de la spatialité dans les résultats d'Andres et al. (2008) peut cependant sembler moins évidente. Les résultats de Lindemann, Abolafia, Girardi et Bekkering (2007) confirment en tout état de cause une possible influence du traitement numérique sur le mouvement tout en suggérant que cette influence tient à des codes cognitifs communs au sein d'un système général de traitement des quantités.

Lindemann et al. (2007) ont confronté des sujets adultes (étudiants en université) à une tâche de jugement de parité (nombres utilisés écrits en chiffres arabes : 1, 3, 5, 8 ou 9) à laquelle ils répondaient manuellement (sans contrôle visuel sur le mouvement, Figure 16.A) à partir d'une structure de bois composée d'un cylindre de 6 cm de diamètre et 7 cm de haut surmonté par un cylindre de 0,7 cm de diamètre et 1,5 cm de haut. Dans une première expérimentation, les sujets devaient répondre en saisissant le petit cylindre à deux doigts ou le gros cylindre à pleine main (association entre parité et type de saisie contrebalancée dans l'expérimentation). Les résultats ont montré une influence du traitement numérique sur le temps de réaction (Figure 16.B.1), le mouvement étant initialisé plus précocement dans le cas des petits nombres (< 5) que dans celui

des grands nombres (> 5) dans le cas de la saisie du petit cylindre, l'effet inverse étant aussi avéré dans le cas de la saisie du gros cylindre. En outre, l'ouverture maximale de la saisie s'est avérée accrue dans le cas des grands nombres. L'éventuel impact d'un sur-apprentissage gestuel dans ces résultats a été contrôlé dans une deuxième expérimentation, via le recours à une même saisie quel que soit le cylindre à saisir (Figure 16.B.2). L'impact d'un éventuel effet SNARC vertical a quant à lui été contrôlé dans une troisième expérimentation, en laquelle les sujets ne devaient pas opérer de saisie mais seulement effectuer un pointage (Figure 16.B.3). Or, les résultats de cette dernière expérimentation n'ont avéré aucun effet du traitement numérique sur la cinématique du pointage.

Figure 16 – Dispositif, protocole et résultats de l'étude de Lindemann et al. (2017)



Les sujets (étudiants en université) étaient assis face à un écran d'ordinateur (Figure 16.A). A l'écran, un chiffre (format arabe) parmi cinq possibles (1, 2, 5, 8 ou 9) était présenté à des fins de jugement de parité. Les sujets devaient répondre via un objet composé d'un cylindre large (6 cm de diamètre et 7 cm de haut) surmonté par un cylindre étroit (0,7 cm de diamètre et 1,5 cm de haut). Cet objet était placé sur le côté droit du sujet et un écran opaque (44 cm de haut sur 45 cm de large) permettait au sujet d'atteindre confortablement le « double cylindre » mais empêchait un contrôle visuel. Dans l'expérimentation 1 (Figure 16.B.1) les sujets devaient indiquer au plus vite la parité de l'objet via une saisie (par exemple, saisie du petit cylindre à deux doigts en cas de nombre pair et saisie à pleine main du gros cylindre en cas de nombre impair). Les résultats (Figure 16.B.1) ont indiqué que dans le cas de la saisie à du petit cylindre (à deux doigts), le mouvement était initialisé significativement plus précocement (durée entre la présentation du stimulus et le début du mouvement, *reaction time*) que dans celui des grands nombres et que cette différence était inversée dans le cas de la saisie du gros cylindre (à pleine main). En complément, les résultats ont montré que l'ouverture maximale de la saisie était accrue lors de la présentation des grands nombres. Afin de contrôler une influence de gestes relevant d'un sur-apprentissage, l'expérimentation 2 (Figure 16.B.2) a reproduit la précédente en imposant une saisie à deux doigts (pince pouce-index) tant dans le cas du petit cylindre que dans celui de gros cylindre. Les résultats ont reproduit ceux de l'expérimentation 1 dans le cas de la saisie du petit cylindre et ont indiqué une tendance à l'effet inverse, dans le cas du gros cylindre. Enfin, pour contrôler l'influence un éventuel effet SNARC vertical dans les résultats, une expérimentation 3 (Figure 16.B.3) a été mise en place. Les sujets ont eu ici à répondre sans opérer de saisie, simplement en pointant la partie du cylindre associée au caractère pair ou impair du nombre présenté. Les résultats n'ont en ce cas pas avéré d'influence statistiquement significative du traitement numérique sur la cinématique du pointage.

Les résultats de Lindemann et al. (2007) concourent ainsi à avérer l'existence d'un lien étroit entre traitement numérique et contrôle moteur. Dans cette étude, l'influence du traitement numérique sur le mouvement s'est avérée requérir l'intention de saisir, puisqu'il n'a pas été trouvé d'effet du même traitement numérique sur un mouvement de pointage. Les résultats obtenus ne semblent ainsi pas liés à une représentation mentale spatialement organisée des nombres mais renverraient plutôt à un système général de traitement des quantités valant pour le traitement numérique comme pour la préfiguration d'une action motrice (Lindemann et al., 2007, p. 1407), idée cohérente avec les résultats de Skagerlund et al. (2016) (§ 2.2.).

Par ailleurs les résultats de Namdar et Ganel (2017) viennent confirmer une possible influence d'un traitement numérique sur un mouvement subséquent tout en questionnant les mécanismes du contrôle moteur en jeu, quand plusieurs études suggèrent que cette influence vaut au niveau de la planification et/ou de la préparation du mouvement (Andres et al., 2008 ; Daar & Pratt, 2008 ; Rugani et al., 2017 ; Lindemann et al., 2007). Namdar et Ganel (2017) ont demandé à des sujets adultes d'effectuer un mouvement de saisie suite à la courte présentation, visuelle ou auditive, d'un petit nombre (1 ou 2) ainsi que suite à celle d'un grand nombre (8 ou 9). Ce, dans deux conditions distinctes : avec contrôle visuo-moteur du mouvement réalisé et sans que ce contrôle ne soit possible. Or, les résultats ont indiqué une influence de la quantité associée à un nombre sur l'ouverture de la saisie dans le seul cas où les sujets bénéficiaient d'une possibilité de contrôlé visuel. Ces résultats suggèrent ainsi une possible influence du traitement numérique sur des mécanismes autres qu'antérieurs à l'initialisation du mouvement.

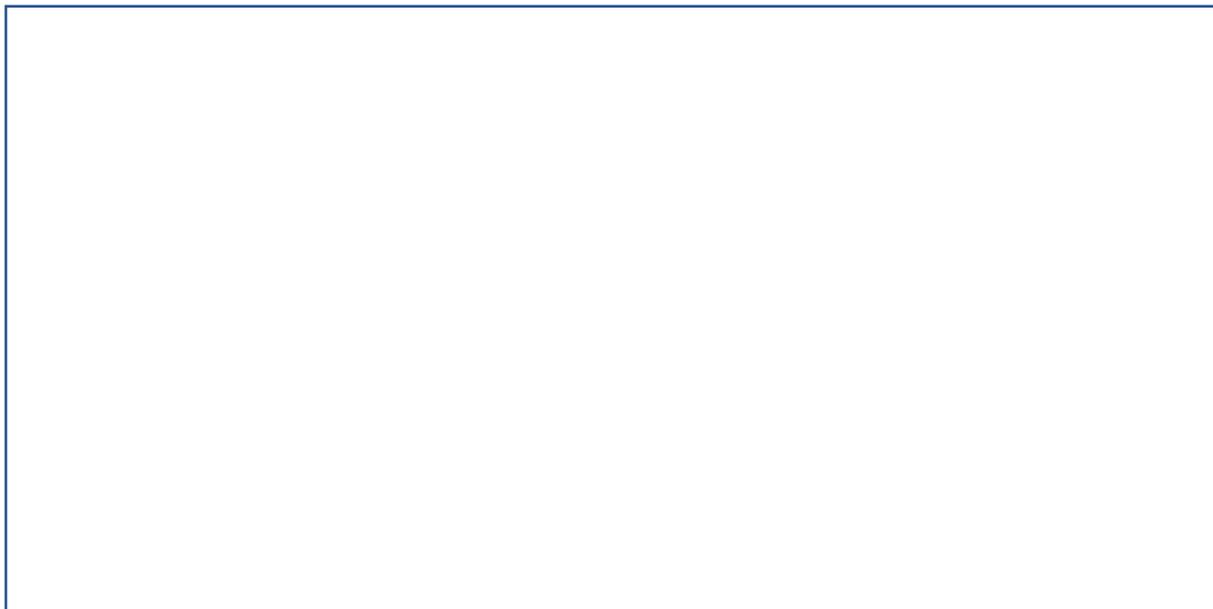
En définitive, une série d'études confirme une possible influence du traitement numérique sur le mouvement, à tout le moins chez l'adulte et dans le cas de mouvement des doigts, d'une main et/ou d'un membre supérieur. Ces études fournissent certes des indications hétérogènes quant à la source de cette influence, suggérant, selon le cas, qu'elle puisse tenir à une représentation mentale des nombres spatialement organisée et aux mécanismes attentionnels impliqués ou à la mise en jeu d'un système général de traitement des quantités, qu'elle puisse valoir au plan de la planification et/ou de la préparation du mouvement ou à celui de la régulation visuelle de son exécution. Si les divers résultats en présence renvoient à des protocoles distincts rendant délicate toute synthèse, ils confirment néanmoins l'existence d'une relation entre traitement numérique et mouvement, sous l'angle de l'effet du traitement numérique sur un mouvement subséquent. Il convient, en complément, d'envisager les études éclairant un possible effet de la performance arithmétique sur le mouvement, ce qui renvoie au point suivant.

4.2. Effet de tâches arithmétiques sur le mouvement

Si quelques études ont fourni des résultats intéressants l'effet d'une tâche arithmétique sur un mouvement, celles-ci ont essentiellement visé à valider l'hypothèse d'une représentation mentale spatialement organisée des nombres (idée de ligne numérique mentale), dans le cas de mouvements de la main et/ou du membre supérieur. Ces études ont par ailleurs l'intérêt de prendre en compte une diversité de tâches arithmétique, la contrepartie étant que leur nombre relativement réduit ne favorise guère une généralisation des résultats.

Dans une étude de Song et Nakayama (2008), les sujets (adultes) ont eu à réaliser une tâche de comparaison de nombres. Les sujets devaient comparer des nombres (format arabe) à un nombre de référence. Pour répondre, ils devaient, à partir d'une position initiale médiane, répondre en pointant manuellement l'une des trois cases présentées sur un écran (Figure 17). Si le nombre présenté était égal à 5, ils devaient pointer la case centrale sur l'écran, si le nombre était inférieur à 5, ils devaient pointer la case de gauche et s'il était supérieur à 5, celle de droite. L'analyse des trajectoires du mouvement a montré que plus l'écart entre le nombre présenté et le nombre de référence était important plus la trajectoire déviait latéralement, à gauche si celui-ci était plus petit que la référence, à droite s'il était plus grand, ce qu'illustre la Figure 17 dans le cas de la comparaison des nombres 1, 2, 3, 4 et 5 avec le nombre de référence 5.

Figure 17 – Exemple de résultats dans l'étude de Song et Nakayama (2008)

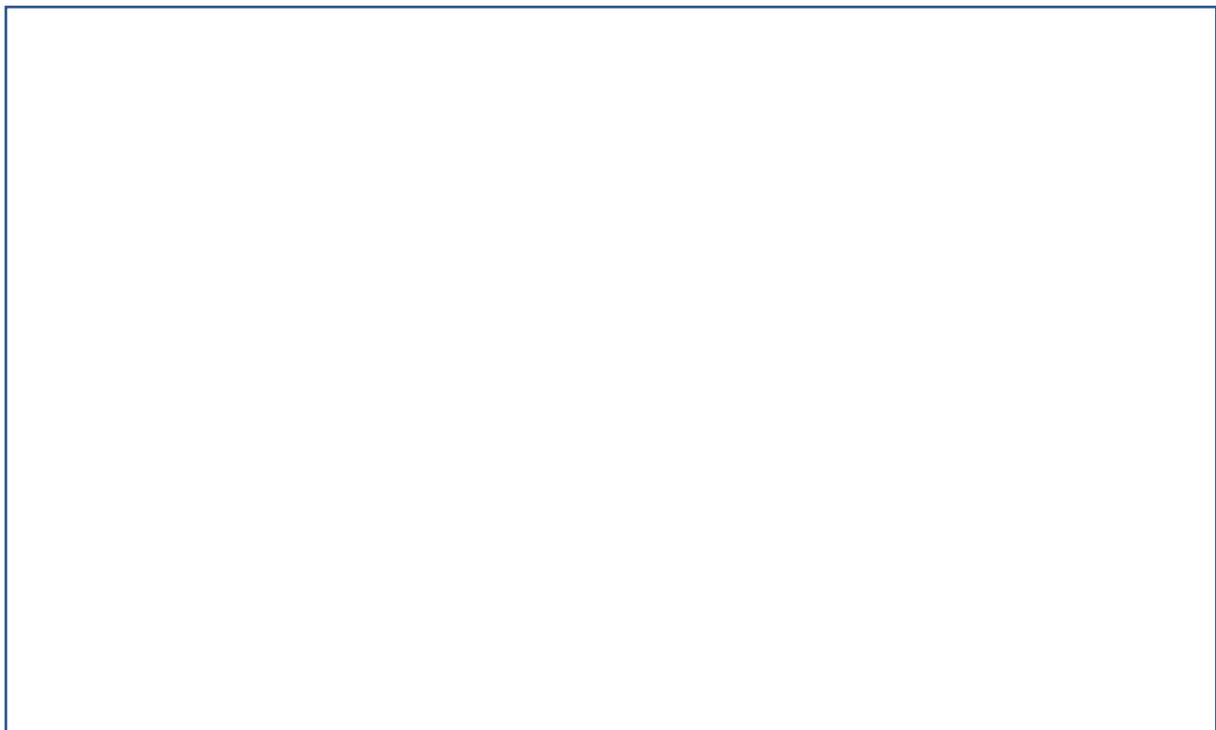


Trajectoire des mouvements de pointage repérés lors de la comparaison des nombres 1, 2, 3, 4 et 5 (chiffres arabes) au nombre de référence 5. Plus l'écart entre le nombre présenté et la référence 5 est grand, plus la trajectoire dévie vers la gauche, la case de gauche indiquant que celui-ci est inférieur à 5, la case de droite valant pour un nombre qui serait supérieur à 5.

Song et Nakayama (2008) ont interprété leurs résultats en tant que validant l'idée que les gradeurs numériques sur les cibles présentées à l'écran sont spatialement encodées et que l'ordre des nombres et leur proximité plus ou moins grande sont mentalement représentés de façon spatialement organisée, en cohérence avec l'hypothèse d'une ligne mentale numérique. Dans un sens, on peut considérer que cette représentation spatiale a piloté la spécification de la cible effectivement visée par le mouvement.

Dans la même logique, Pinhas et Fischer (2008) se sont intéressés au cas de la soustraction et de l'addition mentales, en demandant à des sujets de pointer le résultat de leurs calculs sur une ligne numérique visuellement présentée sur un écran tactile (Figure 18).

Figure 18 – Protocole expérimental de Pinhas et Fischer (2008)



Étapes des tâches de calcul mental (soustraction, dans l'exemple ici fourni, ou addition) dans l'expérimentation de Pinhas et Fischer (2008) telles que schématisées par ces auteurs.

Les résultats de Pinhas et Fischer (2008) ont montré un biais vers la gauche dans la localisation par pointage manuel des réponses aux soustractions sur la ligne numérique fournie et un biais vers la droite dans celle des réponses aux additions. Les résultats ultérieurs de Pinhas, Shaki et Fischer (2014) ont en outre montré que les signes opératoires « - » et « + » sont en eux-mêmes de nature à susciter de tels biais.

Marghetis, Núñez et Bergen (2006) ont effectué une étude du même type, en laquelle il était demandé aux sujets (adultes) d'effectuer des additions et des soustractions de nombres à un chiffre et de sélectionner la réponse exacte parmi des possibles présentés dans les coins de la partie haute d'un écran d'ordinateur. Tandis que les sujets sélectionnaient leur réponse via le maniement d'une souris, le déplacement de la souris a été enregistré, les résultats montrant à nouveau des biais spatiaux, vers la gauche dans le cas de la soustraction et vers la droite dans le cas de l'addition.

Ainsi quelques études ont montré une influence d'une tâche arithmétique (comparaison de quantités, addition et soustraction mentales), chez l'adulte, sur le mouvement, ces études suggérant une influence de processus attentionnels en prise avec le recours à une ligne mentale numérique sur le contrôle directionnel d'un mouvement de pointage.

4.3. Cas particulier des mouvements complexes à haute intensité

Les études considérées en l'état, qu'elles aient rapport au traitement numérique ou à des tâches arithmétiques, ont pour point commun de cibler des mouvements impliquant la main et/ou le membre supérieur sans exigence forte quant à l'intensité du mouvement à produire. Ainsi, dans l'étude de Rugani et al. (2017), les sujets devaient produire un tir de précision, avec l'index droit, à leur propre rythme. Seule l'étude Lindemann et al. (2007) intégrait une consigne demandant aux sujets de réaliser une saisie manuelle le plus vite possible : « *The participant's task was to indicate as soon as possible the parity status of the presented Arabic digit (i.e., even vs. odd) by means of the practiced motor responses* » (Linderman et al., 2007, p. 1403). Pour autant, même dans ce dernier cas, la performance motrice en termes de résultat chronométrique n'a pas été prise en compte dans la production des résultats, centrés sur le temps de réaction (temps d'initialisation du mouvement) et sur l'ouverture maximale de la saisie.

En somme, aucune des études jusqu'ici considérées n'a envisagé le cas de mouvements à haute intensité, à fortiori celui de mouvements à intensité maximale. A notre connaissance, une seule étude (Rabahi, Fargier, Clouzeau, Rifai Sarraj, & Massarelli, 2013) a fourni des résultats quant à l'influence du calcul mental sur un mouvement complexe de squat jump vertical réalisé à intensité maximale. Cette étude intéressait principalement l'éventuel effet de verbes d'action sur la performance d'un squat jump vertical réalisé par de jeunes adultes. Les résultats ont ainsi montré que la hauteur de saut est accrue après la lecture (silencieuse ou à haute voix) et l'écoute du verbe d'action « Saute » (à la seconde personne de l'impératif), désignant spécifiquement

l'action de saut à réaliser subséquemment. Dans cette étude, différents verbes d'action étaient utilisés en tant que contrôles (*e.g.* : « Lèche », « Rêve », « Tiáo » pour saute en chinois, langue que ne parlaient pas les sujets, etc.). Une tâche de soustraction mentale complexe (*e.g.* : Thevenot et al., 2010) avec des nombres écrits en chiffres arabes était également utilisée en tant que contrôle. Or, les résultats ont montré que la soustraction mentale améliore significativement la hauteur de saut ; ce, presque autant que la lecture du verbe d'action « Saute » et alors même qu'aucun effet sur la hauteur de saut n'a été repéré après la lecture d'autres verbes d'action comme « Lèche », « Rêve » ou « Tiáo ».

Ainsi, même si l'étude de Rabahi et al. (2013) appelle confirmation, on dispose d'un résultat indiquant une influence d'une tâche arithmétique (soustraction mentale complexe) sur la performance d'un squat jump vertical, mesurée par la hauteur de saut.

4.4. Synthèse

En définitive, si nombre d'études suggèrent l'existence d'un lien entre mouvement et traitement numérique ou performance arithmétique, chez l'adulte, les études examinant un possible effet du traitement numérique ou d'une tâche arithmétique sur un mouvement subséquent sont en moindre nombre.

En ce cadre, une série d'études montre l'effet possible d'un traitement numérique sur le mouvement, via d'éventuels mécanismes d'attention visuo-spatiale qui seraient impliqués par une représentation mentale spatialement organisée des nombres durant le traitement numérique et par le contrôle de la direction du mouvement ou encore via des mécanismes cérébraux impliqués dans un possible système général de traitement des quantités (valant au-delà du seul cas des nombres). Les résultats de ces études suggèrent que ces hypothétiques mécanismes pourraient jouer au plan de la planification et/ou préparation du mouvement ou encore lors de la régulation visuelle de son effectuation.

Les études intéressant l'effet de la réalisation d'une tâche arithmétique sur le mouvement sont par ailleurs plus rares que les précédentes. Elles suggèrent également l'existence d'un lien entre mouvement et tâches arithmétiques, lequel est essentiellement envisagé en ce cadre sous l'angle de mécanismes attentionnels visuo-spatiaux mobilisés dans la tâche arithmétique comme dans le contrôle directionnel du mouvement.

Si ces résultats confortent dans l'idée d'un lien entre mouvement et traitement numérique et/ou performance arithmétique, il convient de souligner, cependant, que l'examen de ce lien appelle

un travail de généralisation et d'approfondissement, invitant de ce fait à faire preuve de mesure dans les conclusions, à ce stade de l'analyse.

En effet, l'essentiel des études s'est centré sur des mouvements des doigts, de la main et/ou du membre supérieur, même si quelques études, intéressant des déplacements passifs ou actifs du corps dans sa globalité sous l'angle des processus attentionnels en jeu, ont suggéré une possible généralisation des résultats. Les mouvements à haute intensité, qu'ils soient manuels ou qu'ils consistent en une locomotion, constituent en tout état de cause ici un point quasiment aveugle, que les résultats de Rabahi et al. (2013) invitent à éclairer plus avant. Par ailleurs, cet éclairage appelle à élargir la focale pour envisager une diversité des possibles au regard du traitement numérique et des tâches arithmétiques. L'étude de Rabahi et al. (2013) fournit en effet des résultats dans le seul cas de la soustraction mentale complexe (*e.g.* : Thevenot, et al., 2010). Cela invite logiquement, à minima, à s'intéresser à l'effet d'autres tâches arithmétiques sur la performance d'un mouvement à haute intensité, à la part prise par le traitement numérique dans l'éventuel effet d'une tâche arithmétique sur cette performance motrice ainsi qu'à l'affectation éventuelle de cette performance-là par le niveau de complexité de cette tâche-ci.

En tout état de cause, il convient de noter que les études considérées ici ont intégré des stimuli numériques présentés dans des formats divers : nombres écrits en chiffres arabes (en majorité, *e.g.* : Pinhas et Fischer, 2008), nombres écrits en toutes lettres (*e.g.* : Tschentscher et al., 2012) et nombres présentés sous une forme non symbolique, par des ensembles de points (*e.g.* : Rugani et al., 2017). Or, si l'étude de la relation entre mouvement et traitement numérique ou performance arithmétique n'a pas été systématisée au regard d'un éventuel rôle du format numérique, les résultats de Rugani et al. (2017) suggèrent que le format numérique puisse ne pas être neutre dans cette relation. Un ensemble de travaux visant à modéliser la représentation et la manipulation mentale des nombres prend plus spécifiquement en compte la question du format numérique, aussi seront-ils examinés au point suivant.

5. Format numérique et modèles de la cognition numérique

Différentes modalités peuvent être utilisées pour représenter un nombre. Chacun connaît divers modes d'écriture symboliques des nombres, en chiffres arabes (*e.g.* : 10), en chiffres romains (*e.g.* : X), etc. Chacun a également lu et écrit des nombres en toutes lettres (*e.g.* : dix). Encore peut-on représenter un nombre en recourant à une écriture non symbolique (*e.g.* via un ensemble points : ●●●●●●●●●●). En apparence, il n'y a pas de différence majeure, si on est habitué aux systèmes de notation correspondants, à déterminer, par exemple, quel nombre est le plus grand entre 3 et 5, trois et cinq ou ●●● et ●●●●●. Le format numérique utilisé peut ainsi paraître renvoyer à un choix conventionnel sans incidence forte sur le traitement numérique ou sur les tâches arithmétiques.

Les études précédemment considérées qui concourent à montrer l'existence d'une relation entre mouvement et traitement numérique ou performance arithmétique renvoient en tout état de cause à des protocoles expérimentaux en lesquels divers formats numériques ont été utilisés. La présentation verbale, la présentation visuelle de nombres écrits en toutes lettres, en chiffres arabes ou sous forme non symbolique, en particulier via un ensemble de points, constituent ainsi des modalités utilisées dans ces protocoles. L'examen du « poids » du format numérique dans la relation entre mouvement et traitement numérique ou performance arithmétique n'a en revanche, à notre connaissance, pas été systématisé.

Plusieurs études se sont, de fait, centrées sur un seul format numérique. Par exemple, Sato et al. (2007) ont utilisé exclusivement des nombres en chiffres arabes quand Skagerlund et al. (2016) ont eu exclusivement recours à des ensembles de points. Certaines études ont néanmoins utilisé deux formats numériques distincts, dont les résultats suggèrent que le format numérique peut moduler la relation entre mouvement et réalisation d'une tâche numérique ou arithmétique. Tschentscher et al. (2012) ont certes avéré une activation fonctionnelle significativement accrue du cortex prémoteur lors de la présentation visuelle de nombres écrits en chiffres arabes comme en toutes lettres. Cependant, Rugani et al. (2017) ont montré que si la visualisation d'un nombre écrit en format arabe influe sur la cinématique d'un mouvement de l'index, il n'en est rien lorsque ce même nombre est présenté en écriture non symbolique (ensembles de points).

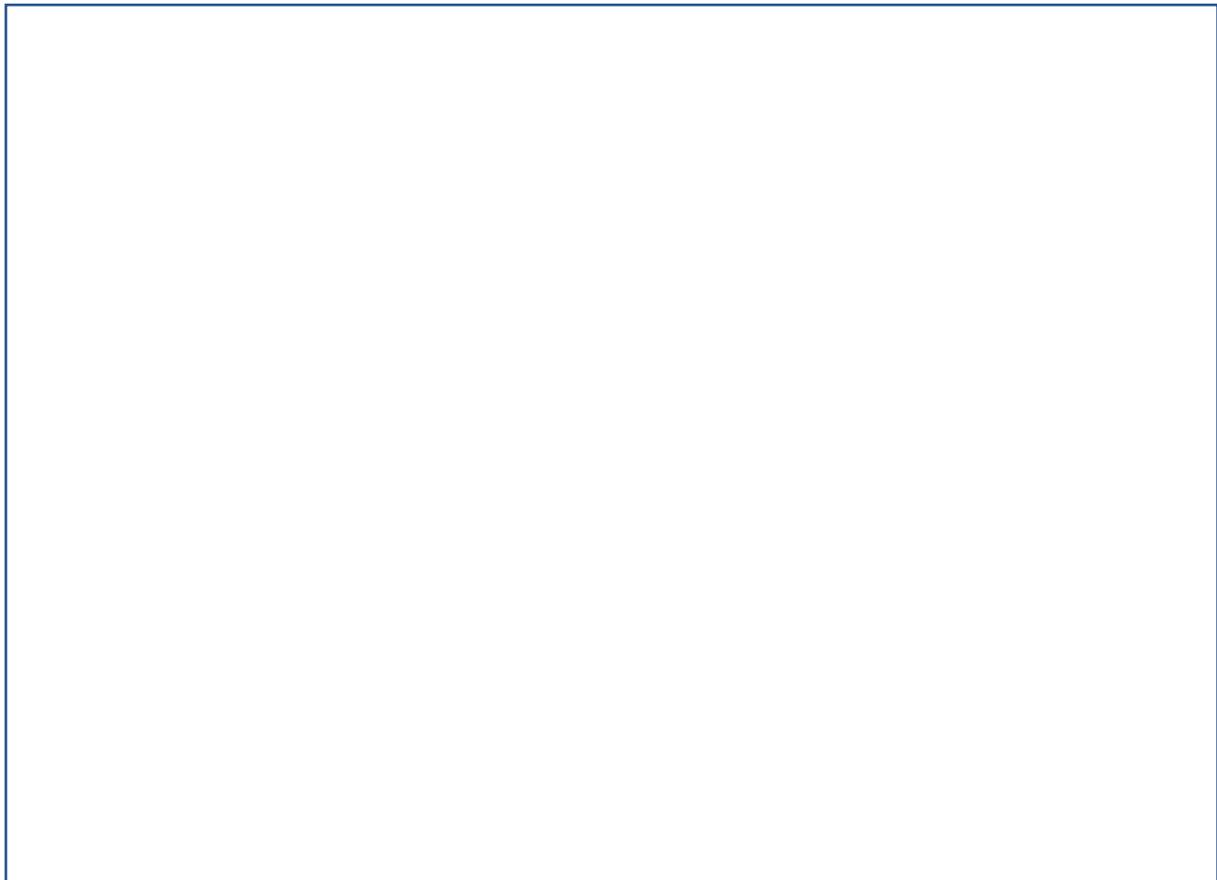
Ainsi semble-t-il de mise d'envisager si et dans quelle mesure la relation entre un mouvement et une tâche numérique ou arithmétique est affectée par le format numérique. On dispose précisément de travaux qui ont suscité des modèles rendant compte de la manière dont les nombres sont mentalement représentés et manipulés, en lesquels le format numérique a une

importance majeure. Ces modèles renvoient certes à des divergences quant au statut du format numérique. Ils concourent cependant à suggérer que des mécanismes cérébraux distinctifs, selon le format numérique, puissent être mobilisés pour effectuer un traitement numérique ou une tâche arithmétique. Aussi seront-ils considérés ci-après.

5.1. Modèle de McCloskey (Abstract modular model)

Dans modèle élaboré par McCloskey, Caramaza, et Basili (1985), la compréhension des nombres et la production numérique sont sous-tendues par des mécanismes indépendants (Figure 19).

Figure 19 – Modèle de la cognition numérique de McCloskey et collaborateurs



Représentation schématique des principaux composants du modèle du traitement numérique et du calcul sur les nombres tel qu'il a été proposé par McCloskey et al. (1985).

Les mécanismes responsables de la compréhension numérique sont ici censés convertir les inputs numériques (*e.g.* : 8×3 ou *eight times three* dans la Figure 19) en une représentation sémantique interne (« *internal semantic representation* » ; McCloskey, 1992) pour être utilisés

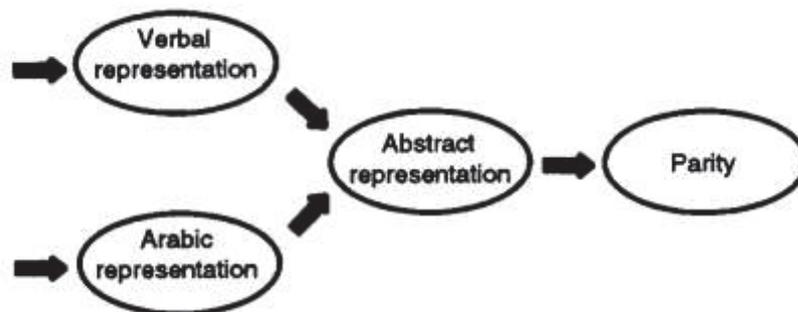
subséquentement, par exemple pour effectuer un calcul. Cette représentation sémantique interne est censée rendre compte de façon abstraite des quantités en présence, quel que soit le format numérique initialement utilisé pour les présenter en termes d'inputs. Ainsi, selon McCloskey (1992), la compréhension du nombre 5030 (en chiffres arabes) est supposée susciter une représentation formalisée qu'on peut présenter comme suit : $\{5\}10EXP3, \{3\}10EXP1$. Dans cette représentation les chiffres entre les signes $\{ \}$ indiquent la représentation des quantités et $10EXPn$, rend compte d'une puissance de 10, avec par exemple $10EXP3$ qui désigne mille. Si cette présentation vise d'abord à distinguer les inputs numériques de la représentation abstraite qu'ils suscitent dans ce modèle, on a ici plus fondamentalement l'idée que la représentation abstraite produite spécifie des quantités et les associe à des puissances de 10 (idée d'un système ayant pour base 10, en somme). Les inputs numériques sont censés susciter, une fois représentés abstraitement et selon leurs caractéristiques (opération demandée, etc.), un traitement via une mémoire des faits arithmétique (*e.g.* : table de multiplication apprise, résultats d'opérations réalisées par le passé, etc.) et/ou l'application de procédures de calcul. Cela induit une sortie dans un format abstrait qui doit dès lors, logiquement, faire appel à une retraduction dans un format numérique donné, via des mécanismes spécifiques de production (Figure 19). Dans ce modèle, sont ainsi distingués des mécanismes de compréhension, d'une part, et de production numérique, d'autre part, avec en chaque cas deux composantes, respectivement spécifiques des chiffres arabes et des chiffres écrits en toutes lettres (Figure 19). En chaque cas, des mécanismes de traitement lexical et syntaxique sont en outre intégrés ainsi que des mécanismes de production verbale ou écrite.

Selon ce modèle, les nombres seraient ainsi encodés, par des mécanismes dépendant de leur format numérique, en un format abstrait unique ; les signes opératoires activeraient des résultats mémorisés et/ou des procédures de calcul et les résultats du traitement des nombres ou du calcul seraient à leur tour traduits dans un langage autorisant leur communication. La pertinence de ce modèle a été considérée en regard de divers sujets atteints de lésions cérébrales. McCloskey (1992) se reporte ainsi au cas, rapporté par Benson et Denkla (1969), d'un patient atteint d'une lésion cérébrale au niveau de l'hémisphère gauche pour étayer l'idée de mécanismes de production (traduction en langage conventionnel, *e.g.* : en chiffres arabes) d'une réponse (*e.g.* : résultat d'une opération à calculer) à partir d'une représentation numérique abstraite. Ce patient répondait par exemple de façon erronée à l'opération $5 + 4 = ?$, répondant oralement « huit » ou répondant par écrit « 5 » alors qu'il sélectionnait pertinemment la réponse « 9 » lorsqu'on lui présentait une liste à choix-multiples. Le sujet était ainsi entravé dans sa production des

réponses mais pas dans la compréhension des stimuli numérique, ni dans le recouvrement des faits arithmétiques (voire dans l'application de règles opératoires). Observation qui suggère l'existence de systèmes de compréhension et de production numériques distincts comme le suppose le modèle de McCloskey. L'examen d'autres études de cas a par ailleurs conduit à des conclusions accréditant, comme le propose ce modèle, l'existence de mécanismes distincts : (1) de traitement lexical et syntaxique des nombres [étude de Singer et Low (1933)], (2) de traitement des symboles opératoires [étude de Ferrero et Botello (1980)], (3) de recouvrement des faits arithmétiques mémorisés et d'exécution de procédures de calcul [études de Warrington (1982) et de Sokol, McCloskey, Cohen, & Aliminosa (1991)].

En définitive, une série de travaux a pu être portée au crédit du modèle de McCloskey (pour une revue : McCloskey, 1992), modèle qui est par exemple l'un de ceux permettant de rendre hypothétiquement compte d'un jugement de parité (spécification du caractère pair ou bien impair d'un nombre) comme l'ont schématisé Dehaene et al. (1993) (Figure 20).

Figure 20 – Représentation d'un jugement de parité dans le modèle de McCloskey



La Figure 20 constitue, selon Dehaene et al. (1993), une représentation fonctionnelle d'un jugement de parité (détermination du caractère pair ou bien impair d'un nombre) à partir du modèle de McCloskey. Il serait notamment possible d'ajouter, en relation avec la représentation abstraite des nombres, les mécanismes de recouvrement des faits arithmétiques.

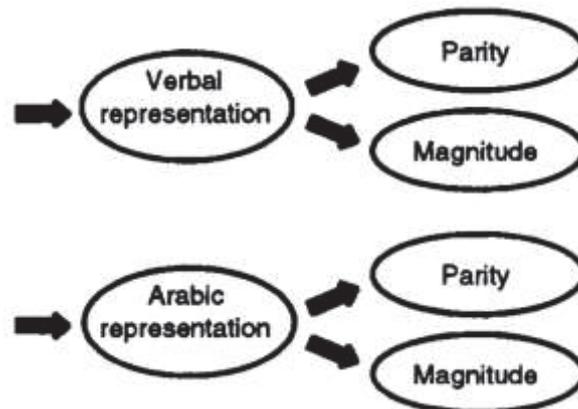
Si le modèle de McCloskey est étayé par plusieurs études de cas, McCloskey (1992) a souligné que les soubassements cérébraux correspondants restent à investiguer. Par ailleurs, ce modèle a pour clé de voûte l'idée que les faits arithmétiques et les procédures de calcul sont activés en appui sur une représentation abstraite des nombres (*Abstract modular model*), quel que soit le format numérique de leur présentation factuelle. Sur cette base, un système d'encodage selon le format numérique est de fait requis, de même que l'est un système de production numérique destiné à communiquer à partir du traitement des nombres ou du calcul. Or, l'existence même

de ce module responsable d'une représentation numérique abstraite a été mise en question, de façon radicale, via le modèle de Campbell présenté ci-après.

5.2. *Modèle de Campbell (Encoding-complex model)*

Présentant leur modèle de la cognition numérique, Campbell et Clark (1988) positionnent d'emblée celui-ci par contraste avec le modèle de McCloskey. Le modèle de Campbell (Campbell & Clark, 1988 ; Clark & Campbell, 1991) suppose en effet : (1) que le traitement des nombres s'opère exclusivement en appui sur des représentations spécifiques des stimuli numériques (phonologiques, visuelles, etc.), (2) que les systèmes de codage distincts qui en découlent sont interconnectés et peuvent, chacun, susciter de nouvelles représentations au sein de ce système et (3) que ces différents encodages et systèmes de représentation spécifiques peuvent chacun sous-tendre la compréhension et la production numérique ainsi que se prêter à l'application de faits arithmétique mémorisés et/ou de procédures de calcul. Pour le contraster avec le modèle de McCloskey, Dehaene et al. (1993) ont également schématisé le modèle de Campbell tel qu'on peut hypothétiquement en user pour rendre fonctionnellement compte d'un jugement de parité (Figure 21).

Figure 21 – Représentation d'un jugement de parité dans le modèle de Campbell



Représentation fonctionnelle, selon Dehaene et al. (1993), d'un jugement de parité (détermination du caractère pair ou bien impair d'un nombre) à partir du modèle de Campbell.

Deux différences essentielles avec le modèle de McCloskey sont ainsi mises en avant comme le laisse transparaître un comparatif entre les Figures 20 et 21. En premier lieu, le format numérique des inputs appelle, dans le modèle de McCloskey, des mécanismes de conversion en une représentation numérique abstraite, à partir de laquelle s'opèrent traitement numérique

et calculs quand, dans le modèle de Campbell, le traitement numérique et le calcul sont effectués à partir d'une représentation spécifique des inputs numériques. En second lieu, si le modèle de McCloskey suppose par conséquent qu'un ensemble de mécanismes, respectivement relatifs au recours aux faits arithmétiques mémorisés et aux procédures de calcul, vaut quelle que soit le format numérique des inputs, le modèle de Campbell suggère l'existence de modalités de traitement numérique et de calcul spécifiques du format numérique des inputs (*e.g.* : Clark & Campbell, 1991). Aussi Campbell et Clark (1988) soulignent-ils que leur modèle est cohérent avec les propositions d'autres auteurs suggérant que les liens entre nombres et procédures de traitement numérique ou de calcul sont spécifiques du format numérique selon lequel les nombres sont présentés (*e.g.* : Loggie & Baddeley, 1987) ou encore que les processus de calcul diffèrent selon ce format numérique (*e.g.* : Gonzales & Kolers, 1982).

Reprenant le cas d'un sujet souffrant d'une lésion cérébrale, porté par McCloskey, Sokol, et Goodman (1986) au crédit du modèle de McCloskey, Campbell et Clark (1988) mettent ainsi notamment en avant des erreurs de réponse (*e.g.* : 4 en lieu de place de 7 ou encore 8 en lieu de place de 5) suggérant que les mots désignant des chiffres visuellement proches ont une probabilité accrue d'être confondus. Campbell et Clark (1988) soulignent dès lors qu'en regard de cette constatation, si on suppose, comme indiqué par McCloskey et al. (1988), que le système d'encodage des nombres du sujet concerné était en ordre de fonctionnement, alors on peine à comprendre en quoi la similarité visuelle des stimuli numériques pourrait impacter de façon régulière la traduction d'une représentation abstraite en un énoncé verbal. Ce phénomène s'accommode mieux, aux yeux de Campbell et Clark (1988), d'un modèle supposant que les inputs numériques sont traités, ou font l'objet de calculs, selon la spécificité de leur format numérique.

Si le modèle de Campbell est étayé par des cas cliniques et par des résultats expérimentaux (*e.g.* : Bernardo, 2001 ; Campbell, Parker, & Doetzel, 2004 ; Sczüks & Csépe, 2004 ; Myers & Sczüks, 2015), il convient de souligner que McCloskey (1992) s'est également attaché à l'analyse critique des arguments en faveur du modèle de Campbell.

Campbell et Clark (1988) mettent ainsi au crédit de leur modèle les études de Gonzales et Kolers (1982 ; 1987) avérant des temps de réponse fonction du format numérique, dans une tâche de validation de résultats d'additions avec chiffres arabes, romains ou à la fois arabes et romains (*e.g.* : $3 + 4 = 7$; $6 + 2 = 9$; $\text{III} + \text{IV} = \text{VII}$; $\text{VI} + \text{II} = \text{IX}$; $3 + \text{IV} = \text{VII}$; $\text{III} + 4 = 7$). Les résultats de Gonzales et Kolers (1982 ; 1987), avérant des temps de réponse plus rapides avec les chiffres arabes qu'avec les chiffres romains, indiquent, selon Campbell et Clark (1988), que

les mécanismes de traitement des nombres et de calcul qui sont mobilisés dans le cas des chiffres arabes sont différents de ceux mobilisés dans le cas des chiffres romains. Analyse qui n'agrée pas McCloskey et ses collaborateurs (Sokol et al., 1991), qui notent que les résultats de Gonzales et Kolers (1982 ; 1987) peuvent aussi s'envisager en termes de traduction en un format abstrait plus rapide dans le cas des chiffres arabes que dans le cas des chiffres romains. Dans la même logique, McCloskey (1992) s'attache par exemple à montrer que des études citées par Gonzales et Kolers (1982 ; 1987) pour étayer l'idée que le traitement numérique et le calcul renvoient à des mécanismes spécifiques du format numérique (nombres exprimés en deux langues parlées chez des sujets bilingues ; Marsh & Maki, 1976 ; McClain & Hunag, 1982) peuvent tout aussi bien être portés au crédit du modèle de Campbell qu'à celui du modèle de McCloskey.

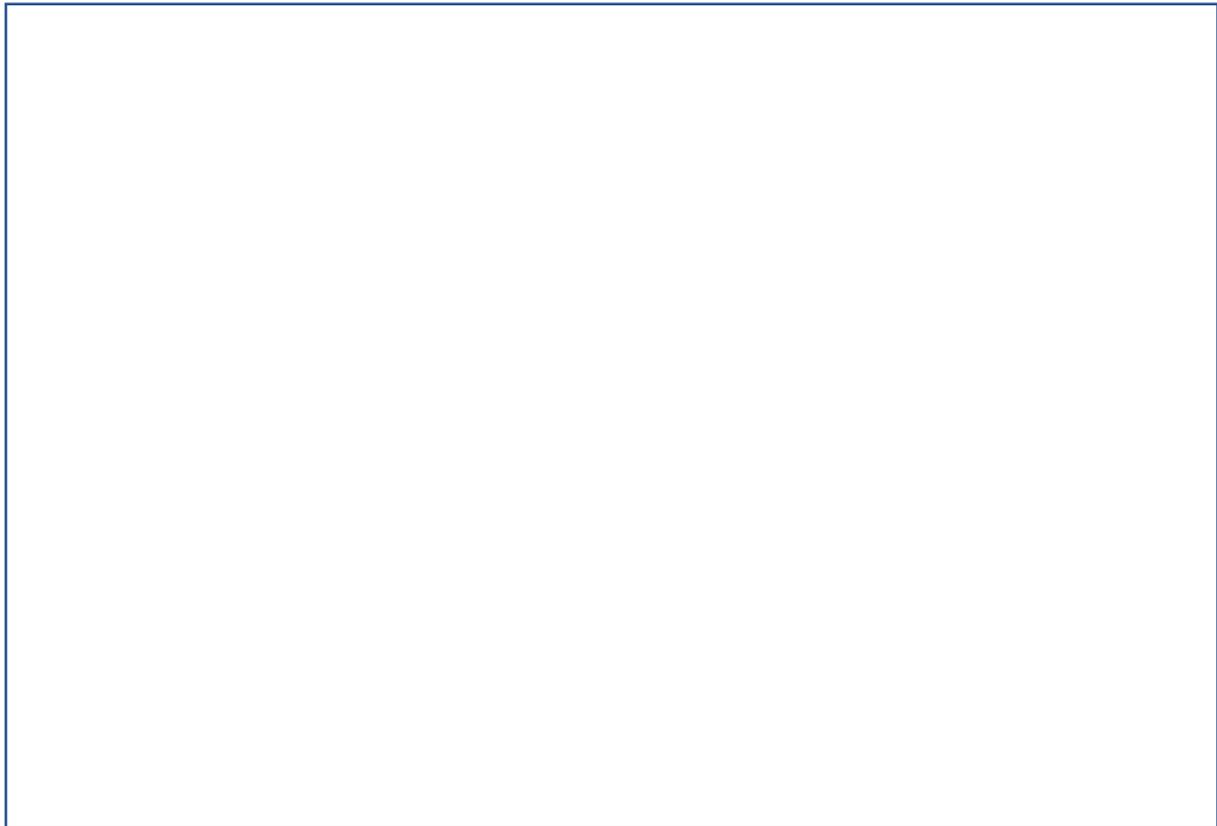
En définitive, les modèles de McCloskey et de Campbell s'opposent radicalement sans que des arguments définitifs, dans le débat qui les met en tension, ne puissent conduire à trancher pour l'un ou bien l'autre, d'autant que si les mécanismes cérébraux qui sous-tendraient le modèle de McCloskey demeurent en question, il en va de même de ceux qui sous-tendraient le modèle de Campbell.

En regard de cette opposition de vues, le modèle développé par Dehaene et ses collaborateurs peut en tout état de cause s'envisager comme un modèle intermédiaire.

5.3. *Modèle de Dehaene (Triple-code model)*

Le modèle de la cognition numérique émanant de Dehaene et de ses collaborateurs est dénommé « modèle du triple code » (Figure 22) car il propose que les nombres peuvent être mentalement représentés selon trois codes (*e.g.* : Dehaene, 1992) : (1) un code verbal-auditif qui renvoie aux processus généraux du langage au niveau duquel les nombres sont mentalement représentés et manipulés sous forme d'une séquence de mots, (2) un code arabe-visuel dans lequel les nombres sont mentalement manipulés sous forme de chiffres arabes spatialement structurés et (3) un code analogique des quantités, représentées de façon analogique et abstraite sur une ligne mentale numérique. Chacune de ces représentations est en outre interfacée par des procédures d'input et d'output spécifiques du format numérique correspondant (Dehaene, 1992). Par ailleurs, il est ici considéré que chaque procédure numérique (dans une tâche numérique donnée) requiert un format spécifique d'input (les étapes de réalisation d'une tâche pouvant requérir plusieurs transcodages).

Figure 22 – Modèle de la cognition numérique de Dehaene



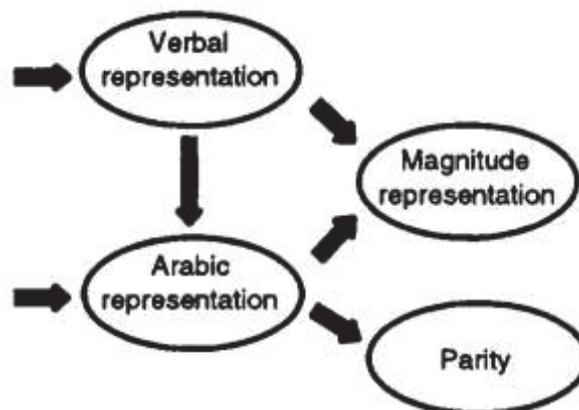
Le modèle du triple code, tel que le présente Dehaene (1992), intègre trois modules de représentation (octogones dans la Figure 22) : verbal-auditif, arabe-visuel et analogique quant aux quantités. Chacun est associé (flèches larges en pointillés) à des processus spécifiques d'input et/ou d'output. Des processus de traduction d'une représentation à l'autre existent (flèches étroites en continu). La coexistence des processus de traduction C/D et C'/D'est ici envisagée de façon spéculative et Dehaene (1992) note qu'il pourrait exister uniquement les processus C/D. Les bulles correspondent à des essais de mise en relation entre un type de représentation numérique et un type de procédure numérique (comptage, jugement de parité, etc.).

Dans le modèle de Dehaene, on a, d'une part, un codage dédié aux nombres en chiffres arabes et un autre, aux nombres écrits en toutes lettres, d'autre part, un codage des nombres sous forme de représentation abstraite. Dans ce sens, comme le note Dehaene (1992, p. 30), le modèle du triple-code constitue un essai de conciliation des points de vue respectifs de Campbell et de McCloskey. L'idée de codages respectivement spécifiques des nombres en chiffres arabes et des nombres écrits en toutes lettres est en phase avec le modèle de Campbell quand celle de codage des nombres sous forme de représentation abstraite l'est avec le modèle de McCloskey. Par ailleurs, en cohérence avec le modèle de Campbell, dans le modèle de Dehaene, les trois codages considérés sont interconnectés et peuvent coopérer. Il existe une possibilité de transcodage direct entre format arabe et format en toutes lettres qui vaut lorsqu'une compréhension, une analyse en appui sur la signification des nombres n'est pas requise (e.g. : pour restituer verbalement le résultat de l'opération 3×2 , appris en amont), toute tâche

requérant un effort cognitif délibéré sur les nombres impliqués appelant un encodage sous forme abstraite (e.g. : Nieder & Dehaene, 2009). On peut ainsi envisager qu'un calcul en chiffres arabes, dont le résultat n'est pas connu à priori, suscite un encodage spécifique de ce format, un temps d'analyse appelant un transcodage sous forme abstraite et des étapes de calcul renvoyant à des résultats mémorisés, donc à un recours au format en toutes lettres, etc.

Le recours à un codage et, éventuellement, un ou plusieurs transcodages, est ici censé valoir à hauteur des procédures requises par la tâche numérique ou arithmétique à accomplir. Ainsi Dehaene (1992) suppose-t-il, par exemple, que lors d'une comparaison de nombres, chaque input de type arabe-visuel est transformé en une représentation de la quantité correspondante (format abstrait) avant que la comparaison soit effectuée. Par ailleurs, l'accès au caractère pair ou impair d'un nombre est censé renvoyer exclusivement au module arabe-visuel (Dehaene, 1992). Dehaene et al. (1993) ont ainsi fourni une schématisation fonctionnelle d'un jugement de parité selon le modèle de Dehaene (Figure 23) qui se distingue de celles renvoyant aux modèles de McCloskey (Figure 20) et de Campbell (Figure 21). En effet, à la différence d'une tâche de comparaison de quantité, on prend ici appui spécifiquement sur un codage arabe, ce qui n'est pas le cas dans le modèle de McCloskey. Ce codage arabe requiert en outre impérativement un transcodage si les nombres sont initialement écrits en toutes lettres, ce qui constitue une différence avec le modèle de Campbell.

Figure 23 – Représentation d'un jugement de parité dans le modèle de Dehaene

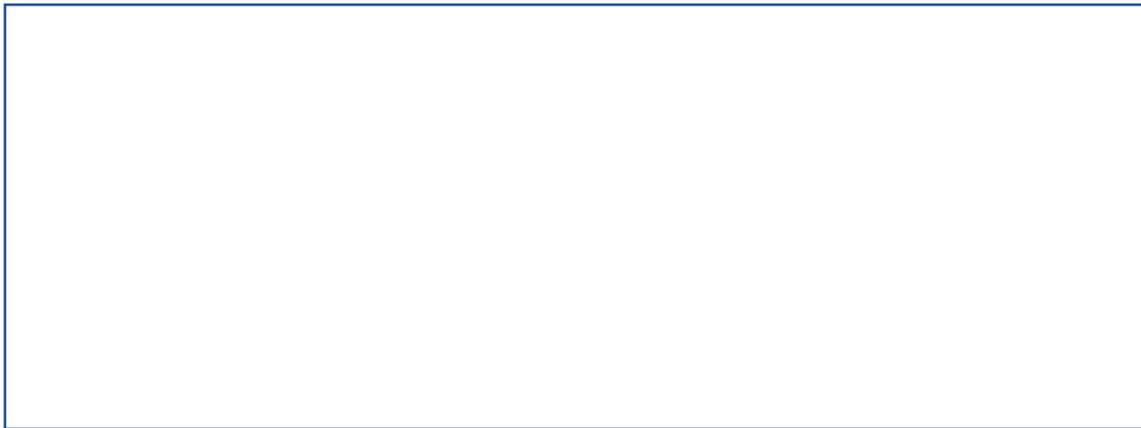


Représentation fonctionnelle, selon Dehaene et al. (1993), d'un jugement de parité (détermination du caractère pair ou bien impair d'un nombre) à partir du modèle de Dehaene.

Si le modèle de Dehaene peut s'envisager en tant qu'essai de conciliation entre les modèles, précédemment présentés (§ 5.1. et 5.2.) de McCloskey et de Campbell, on ne peut pour autant considérer que la synthèse produite est définitive et/ou règle définitivement l'opposition des

points de vues pilotant ces deux derniers modèles. Ainsi Campbell et Epp (2004) ont-ils produit une version renouvelée du modèle initial de Campbell (§ 5.2.) dont rend compte la Figure 24 dans le cas de sujets qui seraient bilingues (chinois et anglais) en ayant pour première langue le chinois.

Figure 24 – Modèle de Campbell et Epp (2004)



L'*Encoding-Complex Model* renouvelé, tel que le présentent Campbell et Epp (2004), comprend cinq systèmes de codage, compte tenu du fait qu'il envisage le cas de sujets bilingues (chinois et anglais), relatifs à : (1) un code arabe visuel, (2) un code mandarin visuel, (3) un code verbal anglais, (4) un code verbal chinois et (5) un code relatif aux quantités. Ce code a notamment un rôle-clé d'interface dans ce modèle dans le sens où il permet un transcodage entre les codes visuels et verbaux. L1 et L2 désignent ici, respectivement, la première langue des sujets considérés (chinois) et la deuxième (anglais). Dans ce modèle, les codes arabe et mandarin sont impliqués dans les processus sollicités par les inputs ou outputs dans le format correspondant. Ces codages sont censés autoriser un recours aux faits arithmétiques mémorisés (*e.g.* : tables de multiplication) lesquels renvoient aux codes verbaux. Les codes visuels sont également censés autoriser un recouvrement de processus dans un code dédié aux quantités. Les flèches bidirectionnelles représentent les voies d'encodage-recouvrement d'un code à l'autre. La couleur des flèches, noire ou bien grise, indique la force des interactions entre un encodage et un recouvrement, laquelle est censée varier en fonction de l'expérience spécifique d'une tâche.

En regard du modèle initial de Campbell (§ 5.2.), celui de Campbell et Epp (2004, p. 233) présente une évolution le rapprochant de celui de Dehaene (1992) en ce qu'il distingue un code, distinct de celui relatif aux codes symboliques ou verbaux, offrant notamment une interface entre les codes symboliques et verbaux. On est ainsi en présence, avec les propositions de Dehaene (1992) et de Campbell et Epp (2004), de deux modèles supposant l'existence de trois grands types de codage distincts, l'un dédié aux notations symboliques, l'autre aux formats verbaux et le troisième, aux quantités. En regard de l'opposition de vues sous-tendant les modèles de McCloskey (§ 5.1.) et le modèle initial de Campbell (§ 5.2.), le temps de la synthèse ne semble cependant pas encore venu. En effet, comme le notent Campbell et Epp (2004, p. 233), l'hypothèse d'interactions encodage-recouvrement spécifiques du format numérique et de la tâche à accomplir, qui seraient essentiellement fonction de l'expérience de la tâche et du format, renvoie à une différence théorique fondamentale avec le modèle de Dehaene.

En définitive, si les travaux visant à modéliser la manière dont les nombres sont mentalement représentés et manipulés valent encore sur fond de débats théoriques non définitivement tranchés voire non stabilisés, les diverses tentatives de modélisation s'avèrent faire grand cas du format numérique, suggérant que celui-là détermine pour partie les mécanismes mobilisés pour réaliser une tâche numérique ou arithmétique.

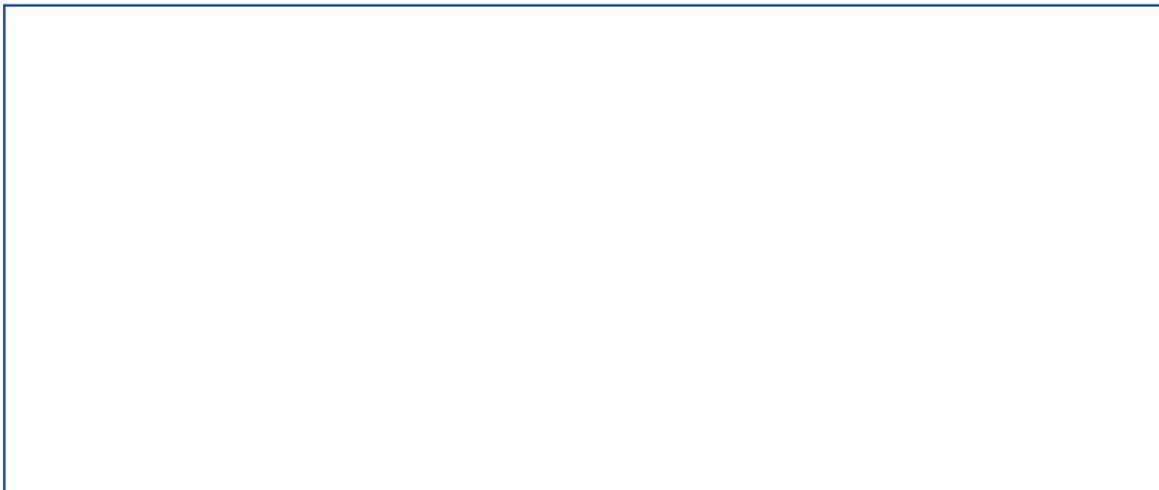
5.4. Format numérique et mouvement

Il convient en premier lieu de noter qu'il serait malvenu de prétendre avec épuisé, via un examen des modèles de McCloskey, de Campbell, de Dehaene, voire de Campbell et Epp, le pool de modèles visant à rendre compte de la représentation mentale des nombres et de leur manipulation mentale disponibles dans la littérature. Si l'examen présenté a porté sur les modèles les plus fréquemment mentionnés dans la littérature (*e.g.* : Myers & Scücz, 2015), d'autres possibles pourraient être envisagés. Ainsi Noël et Seron (1993) ont-ils proposé un modèle tenant à l'hypothèse du code préférentiel (*preferred entry code hypothesis*) en lequel un input numérique est censé être encodé en un format spécifique de cet input puis, éventuellement, transcodé dans le code préférentiel du sujet, si le code induit par l'input numérique n'est pas celui-là. Pour autant, en dépit des particularités d'un tel modèle, on retrouve ici des éléments du débat ci-avant envisagés : (1) idées de codage spécifique du format numérique d'un input et/ou de codage abstrait indépendant de ce format-ci et (2) absence de transcodage ou bien possibilité de transcodage contrainte par la procédure numérique requise par une tâche ou bien par l'expérience qu'a le sujet du type de tâche et de format numérique.

Dans le cadre de la présente étude, ces débats ont l'intérêt de suggérer que le format numérique d'un input est de nature à susciter des mécanismes d'encodage qui lui sont spécifiques. Le modèle de McCloskey postule ainsi une modalité de représentation abstraite unique dans laquelle est encodé tout input numérique de nature à s'opérer via des mécanismes d'encodage fonction du format numérique de l'input. Les modèles de Campbell, Dehaene, Campbell et Epp ou encore de Noël et Seron suggèrent en outre que les représentations mentales que suscitent les nombres en chiffres arabes et les nombres écrits en toutes lettres requièrent des mécanismes d'encodage distinctifs. Ces quatre modèles suggèrent en outre, et notamment, l'existence de représentations mentales (donc d'une mémorisation) spécifiques du format numérique, à partir de laquelle une tâche numérique ou arithmétique est effectuée.

Cet ensemble de constatations suggère qu'un format numérique d'input puisse appeler des mécanismes cérébraux d'encodage, de représentation-mémorisation, voire de transcodage, qui seraient pour partie spécifiques de ce format. Si la question des mécanismes cérébraux en jeu dans l'essentiel des modèles considérés ici reste ouverte, le modèle de Dehaene s'accompagne en outre de précisions quant à ces mécanismes. Ainsi, dans ce modèle, les codes relatifs aux formats arabique, verbal et relatif aux quantités sont respectivement sous-tendus par des mécanismes localisés (Myers & Sczűcs, 2015) : (1) au sein des aires cérébrales occipito temporales ventrales inférieures droite et gauche (2) au sein de l'aire péri-sylvienne gauche et (3) au niveau du sulcus intrapariétal droit et gauche, particulièrement au niveau du sulcus intrapariétal horizontal. La Figure 25 rend compte des sièges anatomiques des systèmes de codage correspondants à partir de Dehaene et Cohen (1995).

Figure 25 – Localisation anatomique des systèmes de codage dans le modèle de Dehaene



Localisation anatomique des trois systèmes de représentation des nombres sur une vue externe des deux hémisphères cérébraux selon Dehaene et Cohen (1995, p. 87-88).

(1) Les deux hémisphères sont le site de procédures d'identification visuelle, le système visuel de l'hémisphère gauche étant à même de supporter la reconnaissance de tout nombre à un ou plusieurs chiffres ou encore écrit en toutes lettres et suscitant une représentation spécifique des nombres en chiffres arabes (*visual number form*) ou bien une représentation verbale (*visual word form*). Des aires homologues sont présentes dans l'hémisphère droit, dont le potentiel représentationnel serait plus limité, en particulier dans le cas des nombres écrits en toutes lettres.

(2) Dans le seul hémisphère gauche, au sein des aires du langage, se trouve le siège de la représentation des séquences de mots correspondant à des nombres écrits en toutes lettres et de procédures d'identification et de production verbale des nombres.

(3) Les deux hémisphères sont aussi à même de susciter une représentation analogique des quantités et des procédures autorisant à comparer des quantités, dont le siège se situe au niveau d'aires corticales à proximité de la jonction pariéto-occipito-temporale. Dans ce cadre, le recouvrement des faits arithmétiques (*e.g.* : multiplication simple dont le résultat est donné dans une table de multiplication apprise) renvoie au niveau (2) ci-dessus. Les procédures de calcul plus complexes (nombres à plusieurs chiffres, etc.) renvoient à une coordination des niveaux (1) et (2) ci-dessus. Au sein de chaque hémisphère, les représentations sont interconnectées. Les représentations visuelles, comme celles relatives aux quantités, des deux hémisphères le sont également.

On peut ainsi supposer, par-delà les incertitudes que réfractent les modèles en présence, que le format numérique ne soit pas neutre quant aux mécanismes cérébraux impliqués dans une tâche numérique ou arithmétique. En ce sens, il est envisageable que le format numérique puisse jouer dans la relation entre mouvement et traitement numérique ou performance arithmétique, comme le suggèrent les résultats de Rugani et al. (2017).

Ainsi, un ensemble de travaux suggère l'existence d'une relation entre mouvement et traitement numérique ou réalisation d'une tâche arithmétique. Ces travaux indiquent que le mouvement est susceptible d'influer sur la performance d'une tâche numérique ou arithmétique, voire que le traitement numérique et/ou la réalisation d'une tâche arithmétique peu(ven)t influencer sur une performance motrice. Les travaux modélisant la manière dont les nombres sont mentalement représentés et manipulés concourent en outre à suggérer que le format des inputs numériques est de nature à susciter la mobilisation de mécanismes cérébraux qui lui sont spécifiques. En ce sens, il est envisageable que la relation entre mouvement et traitement numérique ou réalisation d'une tâche arithmétique soit affectée par le format numérique. Or, l'éventuelle modulation de cette relation par le format numérique n'a pas fait, à notre connaissance, l'objet d'examen systématisés dans les études étayant l'existence de cette relation. Aussi en va-t-il d'une zone d'ombre qui appelle à de plus amples investigations.

6. Objet(s) d'étude

Les nombres et les opérations sur les nombres contribuent, au quotidien, à façonner la relation que les sujets entretiennent avec leur environnement (Everett, 2017). Cette prégnance des nombres et des opérations sur les nombres a été jugée suffisamment importante pour qu'on juge indispensable de mettre en place une éducation scolaire qui leur est spécifique (e.g. : Arsalidou & Taylor, 2011). Il en a également été du développement d'un champ de recherche dédié à l'éducation mathématique (e.g. : Cai et al., 2019). Il n'est alors en rien surprenant que plusieurs chercheurs se soient intéressés aux mécanismes cérébraux sous-tendant la cognition numérique chez les enfants comme chez les adultes (e.g. : Arsalidou, Pawlic-Levac, Sadeghi, & Pascual-Leone, 2018; Moeller et al., 2015), notamment pour mieux comprendre et prendre en charge des problèmes tels ceux liés à la dyscalculie (e.g. : Butterworth et al., 2011; Michels, O'Gorman, & Kucian, 2018). De telles études ont suggéré l'existence d'une relation, installée durant l'enfance et perdurant à l'âge adulte, entre mouvement et traitement numérique ou tâches arithmétiques. Les enseignements retirés de ces études seront synthétisés ci-après, de même que les zones d'ombre qu'elles dessinent, ce qui permettra de définir le cap de la présente étude.

6.1. Relation entre mouvement et tâche numérique et/ou arithmétique : repères

Un nombre conséquent d'études, notamment comportementales ainsi qu'en neuro-imagerie fonctionnelle, suggère l'existence d'un lien entre mouvement et traitement numérique ou performance arithmétique, chez l'adulte. Ces études intéressent pour l'essentiel (§ 1., 2. et 3.) : (1) l'effet du mouvement sur le traitement numérique ou la réalisation d'une tâche arithmétique (au regard de la gnose des doigts, du recours au mouvement pour apprendre une tâche arithmétique ou encore des habitudes de comptage sur les doigts), (2) les mécanismes cérébraux impliqués durant un traitement numérique ou une tâche arithmétique réalisée en l'absence de mouvement effectif ou (3) l'effet d'un mouvement concomitant à un traitement numérique ou une tâche arithmétique sur la performance de ce traitement numérique ou de cette tâche arithmétique, compte tenu de la direction de ce mouvement.

Les principaux enseignements en sont les suivants : (1) les expériences motrices et/ou sensori-motrices des sujets sont susceptibles d'influer sur leurs performances numériques et/ou arithmétiques, (2) les aires cérébrales motrices, voire somato-sensorielles, sont susceptibles d'être significativement mobilisées durant un traitement numérique ou une tâche arithmétique

et (3) un mouvement et un traitement numérique ou une tâche arithmétique concomitants sont susceptibles de mobiliser des mécanismes sous-tendant l'attention visuo-spatiale similaires.

En regard de ces travaux, le nombre d'études examinant un possible effet du traitement numérique ou d'une tâche arithmétique sur un mouvement subséquent est moindre (§ 4.).

Encore dispose-t-on d'une série d'études validant à nouveau l'existence d'un lien entre mouvement et traitement numérique au regard de l'effet de celui-là sur celui-ci. En cohérence avec les résultats, ci-dessus mentionnés, des études de l'effet d'un mouvement concomitant à un traitement numérique sur la performance de ce traitement numérique, certains résultats indiquent que l'effet d'un traitement numérique sur le mouvement est susceptible de tenir à des mécanismes attentionnels visuo-spatiaux à la fois impliqués par une représentation mentale spatialement organisée des nombres durant le traitement numérique et durant le contrôle de la direction du mouvement. D'autres résultats suggèrent en contrepoint qu'il pourrait en aller de mécanismes cérébraux impliqués dans un possible système général de traitement des quantités (non spécifique des nombres). Enfin, ces résultats suggèrent que de tels mécanismes cérébraux communs au traitement numérique et au mouvement influent sur celui-là au niveau de sa planification et/ou préparation ou encore lors de la régulation visuelle de son exécution.

Les études qui éclairent, plus ou moins directement, un éventuel effet de la réalisation d'une tâche arithmétique sur le mouvement sont par ailleurs relativement rares (§ 4.).

Elles concourent cependant, elles aussi, à indiquer l'existence d'un lien entre mouvement et tâches arithmétiques, en envisageant essentiellement la possibilité de mécanismes attentionnels visuo-spatiaux mobilisés tant dans le contrôle directionnel du mouvement qu'en raison d'une représentation mentale spatialement organisée des nombres.

6.2. Relation entre mouvement et tâche numérique et/ou arithmétique : zones d'ombre

Si l'ensemble des études ci-dessus envisagées conduit à un pool de résultats consistants au regard d'une relation entre mouvement, d'une part, traitement numérique ou réalisation d'une tâche arithmétique, d'autre part, force est de constater que cet ensemble ne couvre pas l'éventail des possibles.

En premier lieu, ces études concernent, pour l'essentiel, le mouvement des doigts, de la main voire du membre supérieur ; seules quelques études intéressent la relation entre mouvement et traitement numérique ou réalisation d'une tâche numérique sous l'angle des mécanismes

d'attention visuo-spatiales intéressent d'autres mouvements (Loetscher et al., 2008 ; Winter & Matlock, 2013), voire des déplacements passifs ou actifs du corps dans sa globalité (Anelli et al., 2014 ; Hartman et al., 2012 ; Lugli et al., 2013).

En deuxième lieu, les études ici considérées renvoient à des mouvements qui, pour l'essentiel, sont réalisés en l'absence de contrainte quant à l'intensité du mouvement. Ainsi, dans l'étude de Loetscher et al. (2008) ci-dessus mentionnée, les sujets devaient mobiliser leur tête à leur propre rythme, etc. A notre connaissance, seule une étude de Lindemann et al. (2007) inclut une consigne de saisie au plus vite d'un objet, suite à un jugement de parité.

En troisième lieu, l'essentiel des études ne prend pas en compte de façon systématisée le résultat métrique ou chronométrique d'une performance motrice. Ainsi, dans l'étude de Lindemann et al. (2007), le temps de réaction entre jugement de parité et début de saisie est pris en compte, à la différence du temps de réponse lié au geste de saisie. En regard de ce cela, on dispose, à notre connaissance, d'une seule étude intéressant l'effet positif de la soustraction mentale complexe sur la hauteur d'un squat jump vertical (intensité maximale) subséquent, montrant un effet de celle-ci sur celle-là (Rabahi et al., 2013).

Ce panorama concourt ainsi à la fois à indiquer l'existence d'une relation consistante entre mouvement et traitement numérique ou réalisation d'une tâche arithmétique et, en ce cadre, un axe de recherche encore en retrait, intéressant l'effet d'un traitement numérique et/ou d'une tâche arithmétique sur le résultat d'une performance motrice subséquente, l'étude de cet effet étant en l'état très peu engagée dans le cas particulier des mouvements à haute intensité.

Encore convient-il de noter que dans ce cadre, des possibilités restent à examiner en ce qui concerne le traitement numérique et les tâches arithmétiques.

Diverses tâches numériques et arithmétiques ont été pris en compte : visualisation de nombres (*e.g.* : Di Luca et al., 2008 ; Tschentscher et al., 2012), génération aléatoire de nombres (*e.g.* : Hartman et al., 2012 ; Loetscher et al., 2008), jugement de parité (*e.g.* : Dehaene et al., 1993 ; Lindemann et al., 2007), comparaison de quantités (*e.g.* : Skagerlund et al., 2016 ; Song & Nakayama, 2008), addition mentale (*e.g.* : Hanakawa et al., 2002 ; Anelli et al., 2013), soustraction mentale (*e.g.* : Rabahi et al., 2013 ; Wiemers et al., 2014), multiplication mentale (*e.g.* : Andres et al., 2012 ; Tschentscher & Hauk, 2014), ou encore, plus exceptionnellement, analyse de formules mathématiques (Friedrich & Friederici, 2013).

En revanche, on repère, dans les études effectuées, une nette tendance à se centrer, pour les unes, sur des tâches de traitement numérique, pour les autres, sur des tâches arithmétiques. Il

en va ici d'un *distinguo* (Arsalidou & Taylor, 2011 ; Arsalidou et al., 2018) entre tâches de traitement numérique (*e.g.* : lecture de nombres) et tâches requérant le recours à des procédures de solution (*e.g.* : recours à des règles opératoires dans le cas d'une soustraction). Or, une tâche arithmétique est de nature à requérir un traitement numérique, ne serait-ce que pour lire et identifier les nombres à partir desquels elle est à effectuer. Aussi la part imputable au traitement numérique dans l'éventuelle relation entre une tâche arithmétique et un mouvement est-elle à examiner. Les résultats de Tschentscher et Hauk (2014), dans le cas de l'addition et de la multiplication, avèrent certes une activation fonctionnelle des aires motrices cérébrales accrue par la complexité du calcul, suggérant ainsi que celle-là est de nature à jouer dans la relation entre mouvement et tâche arithmétique. Cela demeure cependant à examiner plus avant.

Enfin, il convient de noter que les études considérées ont intégré des stimuli numériques présentés dans des formats divers : nombres écrits en chiffres arabes (en majorité, *e.g.* : Pinhas et Fischer, 2008), nombres écrits en toutes lettres (*e.g.* : Tschentscher et al., 2012) et nombres présentés sous une forme non symbolique, par des ensembles de points (*e.g.* : Skagerlund et al., 2016). Or, il est envisageable que le format numérique ne soit pas neutre au regard de la relation entre une tâche numérique ou arithmétique et un mouvement (§ 5.), alors même que les travaux suggérant l'existence d'un lien entre mouvement et traitement ou performance arithmétique n'ont pas examiné de façon systématique dans quelle mesure le format numérique est de nature à affecter ce lien. Certains résultats expérimentaux suggérant que cette influence du format numérique peut être effective (Rugani et al., 2017), la zone d'ombre ainsi pointée apparaît devoir faire l'objet de plus amples investigations.

6.3. Cap adopté dans la présente étude

En définitive, alors que des études ont suggéré un possible lien entre mouvement et traitement numérique ou performance arithmétique, ces études se sont majoritairement centrées sur l'effet éventuel du mouvement sur un traitement numérique ou une tâche arithmétique et ce, dans le cas de mouvements des doigts, de la main, voire du bras, réalisés sans contrainte quant à l'intensité du mouvement. En ce cadre, il existe des études relatives à l'effet du traitement numérique, voire d'une tâche arithmétique, sur le mouvement. De telles études ont cependant été produites en nombre sensiblement moindre (à fortiori dans le cas des tâches arithmétiques). Ces études-ci, à l'image de celles qui examinent l'effet du mouvement sur le traitement numérique ou la performance arithmétique, portent en majorité sur des mouvements impliquant la main quand bien même quelques-unes intéressent des déplacements, passifs ou

actifs, du corps dans sa globalité. En tout état de cause, les études existantes de l'effet du traitement numérique ou d'une tâche arithmétique sur la performance motrice concernent, pour la quasi-totalité d'entre elles, des mouvements produits sans contrainte d'intensité.

La question des effets du traitement numérique et/ou d'une tâche arithmétique sur la performance d'un mouvement (à fortiori d'une locomotion) à haute intensité, voire à intensité maximale, demeure ainsi très largement ouverte. A notre connaissance, seule une étude (Rabahi et al., 2013) a investi cet axe, dans le cadre d'une recherche dont l'objectif principal était de clarifier l'influence de verbes d'action sur la performance motrice. Les résultats de cette étude, envisageant exclusivement le cas de la soustraction mentale avec des nombres à deux et trois chiffres présentés en format arabe, ont montré une influence positive de cette tâche arithmétique sur la hauteur atteinte en squat jump vertical. Ces résultats appellent ainsi à une confirmation et invitent à de plus amples investigations.

Au regard du mouvement, l'étude de Rabahi et al. (2013) appelle une confirmation dans le cas d'un saut vertical, donc d'un déplacement du corps dans l'espace, à intensité maximale mais aussi un examen de l'éventuel effet de la soustraction mentale sur un autre mouvement à haute intensité, à des fins de généralisation éventuelle.

Ces investigations appellent par ailleurs, compte tenu de la littérature disponible, à la prise en compte d'un éventail accru de possibles au regard des nombres, du format numérique et des tâches numériques et arithmétiques. La littérature existante, à l'image de l'étude de Rabahi et al. (2013), consiste ainsi essentiellement en une série d'études se centrant sur la relation entre mouvement et traitement numérique et une autre se focalisant sur la relation entre mouvement et tâche arithmétique. Aussi ce panorama invite-t-il à examiner la part prise par le traitement numérique et celle renvoyant en propre à l'activité arithmétique dans une éventuelle relation entre mouvement et tâche arithmétique. Par ailleurs, les études existantes, qui suggèrent une relation entre mouvement et traitement numérique ou performance arithmétique, n'ont, à notre connaissance, pas systématisé l'examen du « poids » du format numérique dans cette relation. Or, les travaux intéressant spécifiquement le format numérique (§ 5.) donnent à penser que celui-là est susceptible d'affecter la relation éventuelle entre mouvement et traitement numérique ou performance arithmétique. Ainsi est-on invité à prolonger l'étude de Rabahi et al. (2013) en cherchant à déterminer si la relation entre traitement numérique et/ou tâche arithmétique et mouvement à haute intensité est affectée par le format numérique.

Si ces éléments dessinent ainsi les contours d'une zone d'étude à investir dans le cadre de la présente thèse, les repères (§ 6.1.) et zones d'ombre (§ 6.2.) pointés dans la littérature invitent

à prendre en compte d'autres paramètres. Ainsi la littérature appelle à ouvrir l'éventail des tâches arithmétiques au-delà du seul cas de la soustraction mentale, les travaux existants s'ouvrant de fait à une diversité accrue de possibles. Par ailleurs, certaines études ont suggéré que la relation entre mouvement et tâche arithmétique est susceptible d'être spécifiquement affectée par la complexité de la tâche (*e.g.* : addition simple $2 + 2$ et addition plus complexe $14 + 7$) via les stratégies que celle-là favorise (*i.e.* : recouvrement en mémoire de faits arithmétique ou bien procédures de résolution, notamment de calcul). Or, en règle générale comme dans le cas particulier de Rabahi et al. (2013), les études étayant l'idée d'un lien entre mouvement et réalisation d'une tâche arithmétique n'ont pas systématisé l'examen de l'influence de la complexité de la tâche arithmétique sur ce lien. Cela appelle donc à considérer dans quelle mesure cette complexité affecte ce lien.

En définitive l'étude entreprise ici vise à envisager les éventuelles influences respectives du traitement numérique et de la réalisation d'une tâche arithmétique sur la performance d'un mouvement à haute intensité, dans le cas d'une locomotion (squat jump vertical à des fins de confirmation) mais aussi au-delà de ce seul mouvement (la littérature invitant à se tourner vers un mouvement du membre supérieur), à des fins de généralisation, en tenant compte du format numérique ainsi que de la complexité de la tâche arithmétique et en ouvrant l'investigation à une diversité accrue de tâches arithmétiques. Il en a plus précisément été, dans la présente thèse, de deux séries d'expérimentations.

L'une est relative à l'influence de la lecture d'un nombre et d'une soustraction mentale relativement complexe (un nombre à un chiffre ôté à un nombre à deux chiffres) sur la performance d'un squat jump vertical (hauteur de saut) et d'une tâche de pointage manuel (temps de réponse), compte tenu de deux formats numériques (nombres en chiffres arabes et nombres écrits en toutes lettres).

L'autre série d'expérimentations intéresse l'effet de divers calculs simples et complexes (soustraction, addition et multiplication mentales) avec nombres en chiffres arabes ainsi que l'effet de la comparaison de quantités (nombres en chiffres arabes ou ensembles de points) sur la performance d'une tâche de pointage manuel (temps de réponse).

Les objets respectifs et les aspects méthodologiques de ces deux séries expérimentales sont précisés dans la partie suivante.

PARTIE II – MATERIELS ET METHODES

PARTIE II. MATERIELS ET METHODES

Le travail expérimental effectué dans le cadre de cette thèse vise (partie I., § 6), en premier lieu, à confirmer les résultats de Rabahi et al. (2013) montrant une influence positive de la soustraction mentale, avec nombres écrits en chiffres arabes, sur la hauteur de saut en squat jump vertical chez des sujets de sexe masculins âgés d'une vingtaine d'année. En regard de l'étude de Rabahi et al. (2013), le travail expérimental ici présenté vise également à élargir le champ d'investigation. Selon le distinguo mis en avant par Arsalidou et Taylor (2011) ainsi que par Arsalidou et al. (2018), la présente étude vise à distinguer les effets potentiels respectifs, sur la performance motrice, du traitement numérique (lecture de nombres) et du recours à des stratégies procédurales de résolution (*e.g.* : application de règles opératoires). En cohérence avec les modèles de la cognition numérique (*e.g.* : Dehaene, 1992), la présente étude vise en outre à déterminer si ces effets sur la performance motrice sont affectés par le format numérique (*e.g.* : nombres écrits en lettres, en chiffres arabes). Cette étude vise aussi à étendre l'examen au-delà du seul cas du squat jump vertical, en envisageant le cas d'un mouvement de pointage manuel. Elle vise encore à s'ouvrir à une diversité de tâches arithmétiques, au-delà de la seule soustraction mentale (*i.e.* : addition, multiplication, comparaison de nombres et de quantités). Cette étude vise enfin à spécifier dans quelle mesure les effets potentiels sur la performance motrice sont impactés par le niveau de difficulté de la tâche arithmétique à effectuer (Thevenot et al., 2010 ; Tschentscher & Hauk, 2014).

1. Logique de travail

L'étude ici présentée a obtenu l'approbation du comité d'éthique du centre AZM de recherche en biotechnologie et ses applications (Beyrouth, Liban) et a porté, au total, sur 206 sujets de sexe masculin, étudiants en Licence à la Faculté de Santé Publique de l'Université Libanaise (Beyrouth). Ces sujets ont donné par écrit leur consentement éclairé à participer à l'étude. Tous étaient en bonne santé, avaient une bonne vue (naturellement ou corrigée) et parlaient couramment anglais.

1.1.Séries expérimentales, expérimentations et groupes de sujets

Une première série d'expérimentations (Série 1) a étudié les influences respectives de la lecture de nombres et de la soustraction mentale (un nombre à un chiffre ôté d'un nombre à deux chiffres) sur la performance motrice. Ce, dans le cas d'un squat jump vertical à intensité maximale et dans le cas d'un mouvement de pointage manuel à vitesse maximale. Dans les deux cas, il a été tenu compte du format numérique (nombres écrits en toutes lettre et nombres écrits en chiffres arabes). Une seconde série d'expérimentations (Série 2) s'est centrée, au-delà du seul cas de la soustraction, sur les effets d'une diversité de tâches d'arithmétique mentale sur la performance en pointage manuel à vitesse maximale. Ce, dans le cas de tâches de calcul (soustraction, addition, multiplication), en prenant en compte deux niveaux de difficulté (opérations avec deux nombres à un seul chiffre et opérations avec un nombre à deux chiffres et un nombre à un chiffre), et de comparaison de quantités (ensembles de points, nombres). Les nombres utilisés étaient en chiffres arabes. Le Tableau 1 ci-dessous récapitule ces éléments.

Tableau 1 – Logique expérimentale

		Série 1	Série 2
Tâches motrices	Squat jump vertical	<input checked="" type="checkbox"/>	
	Pointage manuel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Tâches cognitives	Lecture de nombres seule	<input checked="" type="checkbox"/>	
	Soustraction	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Addition		<input checked="" type="checkbox"/>
	Multiplication		<input checked="" type="checkbox"/>
	Comparaison de quantités		<input checked="" type="checkbox"/>
Format numérique	Chiffres en toutes lettres	<input checked="" type="checkbox"/>	
	Chiffres arabes	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Points		<input checked="" type="checkbox"/>
Difficulté (tâche cognitive)	Simple		<input checked="" type="checkbox"/>
	Complexe	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Les paramètres expérimentaux considérés renvoient à quatre catégories : (1) tâches motrices effectuées (squat jump vertical à intensité maximale et pointage manuel à vitesse maximale), (2) tâches cognitives (arithmétique mentale) effectuées (lecture de nombres, soustraction, addition, multiplication, comparaison de quantités, *i.e.* : d'ensemble de points, d'une part, de nombres, d'autre part), (3) format numérique (nombres écrits en toutes lettres, nombres écrits en chiffres arabes, quantités représentées par des points) et (4) difficulté de la tâche arithmétique (simple, *e.g.* : calculs avec deux nombres à un chiffre, et complexe, *e.g.* : calculs avec un nombre à deux chiffres et un nombre à un chiffre). Ces paramètres ont été considérés via deux séries d'expérimentations, indiquant les paramètres présents dans chaque série et les tramés gris, soulignant les objets d'étude. La série 1 a ainsi visé à étudier l'influence respective de la lecture d'un nombre et de la soustraction mentale complexe sur la performance d'un squat jump vertical, d'une part, d'une tâche de pointage manuel, d'autre part, dans chaque cas selon la modalité numérique utilisée pour présenter les chiffres et nombres (en toutes lettre et en chiffres arabes). La série 2 a visé à étudier l'effet, sur la performance d'une tâche de pointage manuel, de l'addition, de la multiplication, de la soustraction (chiffres arabes en chaque cas), en tenant compte de la complexité de la tâche, et de la comparaison de quantités, en tenant compte du format numérique (chiffres arabes et ensembles de points).

Comme les expérimentations envisagées appelaient à répéter un même mouvement (selon, l'expérimentation, squat jump vertical ou bien pointage manuel), des expérimentations liminaires distinctes ont visé à contrôler tout effet éventuel de la répétition du mouvement sur la performance motrice dans le cas du squat jump vertical (21 sujets ; âge moyen, \pm SD, de $20,1 \pm 1,7$ ans) et dans celui du pointage manuel (20 sujets ; âge moyen de $20,2 \pm 1,9$ ans).

Dans la Série 1, quatre expérimentations (1 à 4) ont été mises en place avec quatre groupes différents, composés respectivement de 40 sujets (âge moyen de $20,1 \pm 1,5$ ans), 40 sujets (âge moyen de $20,3 \pm 1,5$ ans), 20 sujets (âge moyen de $20,8 \pm 1,8$ ans) et 20 sujets (âge moyen de $20,2 \pm 1,8$ ans). Les objets de ces quatre expérimentations étaient les suivants :

- Expérimentation 1 : étude des effets de la lecture d'un nombre et de la soustraction mentale (un nombre d'un chiffre ôté à un nombre à deux chiffres), avec nombres écrits en toutes lettres, sur la performance en squat jump vertical ;
- Expérimentation 2 : étude des effets de la lecture d'un nombre et de la soustraction mentale (un nombre d'un chiffre ôté à un nombre à deux chiffres), avec nombres écrits en chiffres arabes, sur la performance en squat jump vertical (cf. Rabahi et al., 2013) ;
- Expérimentation 3 : étude des effets de la lecture d'un nombre et de la soustraction mentale (un nombre d'un chiffre ôté à un nombre à deux chiffres), avec nombres écrits en toutes lettres, sur la performance en pointage manuel ;
- Expérimentation 4 : étude des effets de la lecture d'un nombre et de la soustraction mentale (un nombre d'un chiffre ôté à un nombre à deux chiffres), avec nombres écrits en chiffres arabes, sur la performance en pointage manuel.

Dans la Série 2, trois expérimentations (5 à 7) ont été mises en place, avec trois groupes distincts de 15 sujets en chaque cas (âges moyens respectifs : $20,2 \pm 2,2$ ans ; $20,4 \pm 1,6$ ans ; $20,3 \pm 1,6$ ans). Les objets respectifs de ces expérimentations étaient les suivants, outre la confirmation d'un éventuel effet de la soustraction mentale d'un nombre à un chiffre à un nombre à deux chiffres sur la performance motrice :

- Expérimentation 5 : étude des effets de l'addition simple (deux nombres à un chiffre) et de l'addition complexe (un nombre à un chiffre et un nombre à deux chiffres), avec nombres écrits en chiffres arabes, sur la performance en pointage manuel ;
- Expérimentation 6 : étude des effets de la multiplication simple et de la multiplication complexe, avec nombres écrits en chiffres arabes, sur la performance en pointage manuel ;

- Expérimentation 7 : étude des effets de la comparaison d'ensembles de points et de la comparaison de nombres (écrits en chiffres arabes) sur la performance en pointage.

Les caractéristiques de base des groupes de contrôle et des groupes expérimentaux sont récapitulées par le Tableau 2.

Tableau 2 – Groupes de sujets

	Contrôles		Série 1				Série 2		
	GC1	GC2	GE1	GE2	GE3	GE4	GE5	GE6	GE7
n	21	20	40	40	20	20	15	15	15
Age	20,1±1,7	20,2±1,9	20,1±1,5	20,3±1,5	20,8±1,8	20,2±1,8	20,2±2,3	20,4±1,6	20,3±1,6

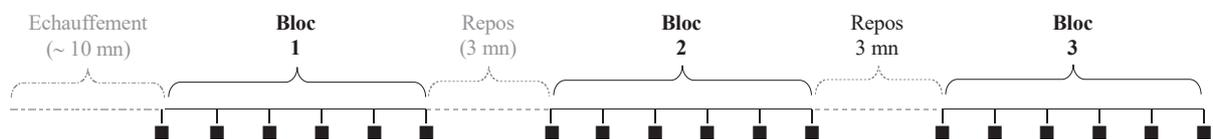
Les groupes de sujets sont ici récapitulés pour les contrôles (groupes contrôles 1 et 2 ; GC1 et GC2) ainsi que pour les séries expérimentales 1 et 2 (série 1 et 2, avec dans la série 1 les groupes expérimentaux 1 à 4, GE1 à GE4, et dans la série 2, les groupes expérimentaux 5 à 7, GE5 à GE7). En chaque cas, les nombres de sujets (n) sont précisés ainsi que les âges moyens \pm SD (Age).

1.2.Design expérimental général

Les sujets de chaque groupe [groupes de contrôle et groupes expérimentaux de chaque série expérimentale (1 et 2)] ont été informés des grandes lignes de l'étude effectuée mais sont restés ignorants de l'effet potentiel d'un quelconque stimulus utilisé. Les sujets ont ensuite effectué un échauffement d'une dizaine de minutes intégrant des essais du mouvement qu'ils auraient par la suite à effectuer (squat jump vertical ou pointage manuel selon le groupe) pour s'assurer de leur compréhension de la tâche motrice et de son exécution correcte. Il a ensuite été demandé systématiquement aux sujets de réaliser les mouvements à venir avec une intensité maximale (sauter le plus haut possible ou réaliser la tâche de pointage le plus vite possible).

Les sujets des groupes de contrôle ont effectué trois blocs de six mouvements (squat jump vertical dans un cas, pointage manuel dans l'autre ; Figure 26).

Figure 26 – Design des protocoles de contrôle

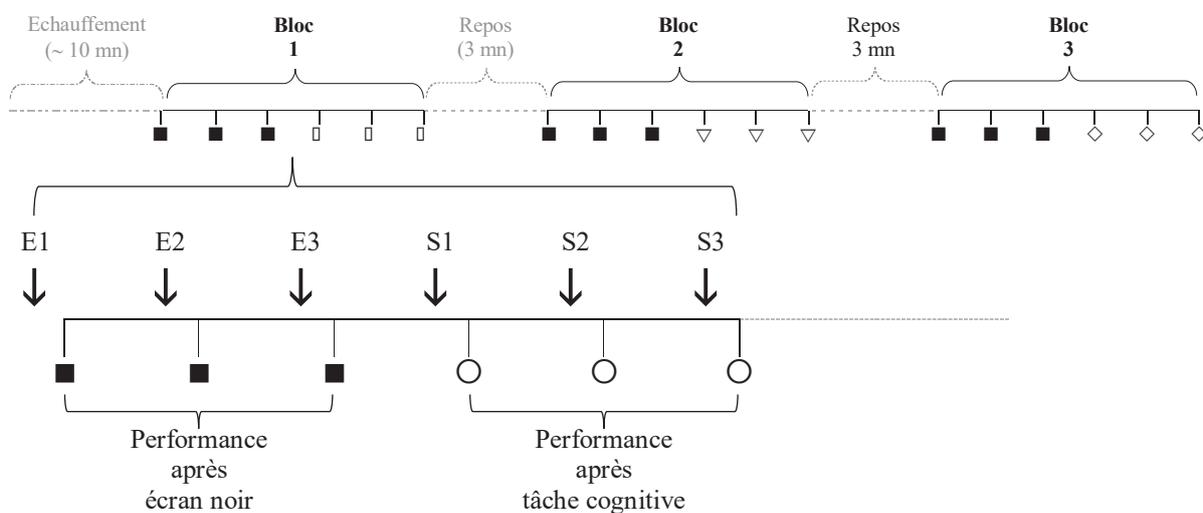


Après avoir effectué un échauffement de 10 mn environ, les sujets ont effectué trois blocs de six mouvements (■). Le mouvement effectué était systématiquement un squat jump vertical, pour un groupe, et un mouvement de pointage manuel, pour l'autre. Il était systématiquement demandé aux sujets de réaliser le mouvement à intensité maximale (sauter le plus haut possible, pointer le plus vite possible). Le mouvement était réalisé après avoir visualisé un écran noir pendant 10 sec. Deux blocs consécutifs étaient entrecoupés de trois mn de repos. Chaque mouvement était exécuté après avoir visualisé un écran noir pendant 10 sec.

Les sujets réalisaient chaque mouvement après être restés immobiles 10 sec face à un écran sur lequel était projeté un fond noir. Il s'agissait ici de contrôler un effet potentiel de la répétition des mouvements (trois blocs de six mouvements).

Les sujets de chacun des groupes expérimentaux ont eux aussi effectué trois blocs de six mouvements (trois blocs de six squat jump verticaux ou trois blocs de six pointages manuels, selon le groupe). La dynamique dans laquelle se sont inscrits les sujets des groupes expérimentaux est récapitulée Figure 27.

Figure 27 – Design des protocoles expérimentaux



Après avoir effectué un échauffement de 10 mn environ, les sujets des groupes expérimentaux ont effectué trois blocs de six mouvements. Le mouvement à effectuer était, selon le groupe, soit un squat jump vertical, soit un pointage manuel. Il était systématiquement demandé aux sujets de réaliser le mouvement à intensité maximale (sauter le plus haut possible, pointer le plus vite possible). Les trois premiers mouvements de chaque bloc (■) ont été effectués dans les mêmes conditions que dans les groupes de contrôle (Figure 26), donc après avoir visualisé un écran noir pendant 10 sec (E1, E2, E3). Les performances motrices ainsi mesurées ont servi de repères pour envisager celles des trois derniers mouvements du même bloc qui étaient effectués après avoir réalisé une tâche cognitive. Chaque groupe effectuait trois tâches cognitives (une par bloc, ○ = mouvement après la tâche cognitive 1, ▽ = mouvement après la tâche cognitive 2, ◇ = mouvement après la tâche cognitive 3). Pour chaque tâche cognitive (e.g. : lecture d'un nombre, soustraction mentale...), les stimuli variaient d'un essai à l'autre (S1, S2, S3). L'ordre des tâches cognitives au sein d'une expérimentation était assigné aléatoirement (ordre des trois blocs), de même que l'ordre des stimuli en amont des trois derniers mouvements de chaque bloc.

Les sujets des groupes expérimentaux ont effectué les trois premiers mouvements de chaque bloc dans les mêmes conditions que les sujets des groupes de contrôle, *i.e.* : après visualisation, pendant 10 sec, d'un fond noir projeté sur un écran. La performance réalisée par les sujets des groupes expérimentaux dans ces trois premiers mouvements de chaque bloc servait ainsi de référence pour envisager la performance réalisée dans les trois mouvements suivants de chaque bloc. A la différence des sujets des groupes de contrôle, ceux des groupes expérimentaux ont

effectué chacun des trois derniers mouvements de chaque bloc après une tâche cognitive donnée (cf. § 2.).

En définitive, les sujets de chaque groupe (ceux effectuant des squat jumps verticaux comme ceux effectuant des pointages manuels) ont été confrontés à une dynamique de travail similaire.

2. Tâches cognitives

L'exposé du design expérimental général appelle des précisions concernant les tâches cognitives auxquelles ont été confrontés les sujets.

Chacune des tâches cognitives a été présentée aux sujets selon une même modalité, *i.e.* : projection de la tâche à faire sur un écran via un vidéoprojecteur (Optoma©/ThemeSceneH ; Boulogne-Billancourt, 92100, France), l'image mesurant 1,3 m en diagonale et le sujet étant positionné à 3,5 m de l'écran, conformément aux recommandations du fabricant.

2.1. Tâches cognitives de la Série 1

Dans la Série 1, les sujets ont effectué chacun des trois derniers mouvements de chacun des trois blocs après avoir une tâche cognitive.

Dans l'expérimentation 1 (le mouvement à réaliser étant ici un squat jump vertical à intensité maximale), les tâches cognitives étaient les suivantes :

- Lecture du verbe d'action « *Jump* » à la deuxième personne de l'impératif (« Saute ») ;
- Lecture d'un nombre écrit en toutes lettres ;
- Soustraction mentale consistant à ôter un nombre à un chiffre d'un nombre à deux chiffres, les nombres étant écrits en toutes lettres.

La lecture du verbe d'action « *Jump* », avant chaque saut du bloc dédié à cette tâche cognitive, constituait un contrôle dans le sens où il a été montré que l'écoute, la lecture silencieuse et/ou à haute voix de ce verbe d'action est de nature à améliorer la performance d'un saut subséquent (Rabahi et al., 2013). En cohérence avec le distinguo spécifié par Arsalidou et Taylor (2011) et Arsalidou et al. (2018), Les deux autres tâches ont porté, respectivement, sur la lecture de nombre (renvoyant au traitement numérique) et sur la soustraction mentale (intégrant le recours à des procédures de résolution). Ce choix se justifie en ce que Rabahi et al. (2013) ont avéré un effet positif de la soustraction mentale sur la performance en squat jump vertical sans distinguer ce qui relèverait de la prise de connaissance des nombres et ce qui relèverait du calcul au sens

strict. Les nombres à lire (à haute voix pour contrôler la réalisation effective de la tâche) dans le bloc dédié étaient les suivants : « *four* », « *seven* » et « *seventeen* ». Les soustractions mentales à effectuer dans le bloc dédié étaient les suivantes : « *seventeen - eight* », « *sixteen - nine* » et « *twelve - four* ». Selon Thevenot et al. (2010) ces soustractions mentales sont d'un niveau de difficulté intermédiaire entre simple (e.g. : *four - two*) et très complexe (e.g. : *fourty-one - twenty-seven*) ; on le qualifiera, par convention, de complexe.

Dans l'expérimentation 2 (le mouvement à réaliser étant ici un squat jump vertical à intensité maximale), les tâches cognitives à effectuer étaient les suivantes :

- Lecture du verbe d'action « *Jump* » à la deuxième personne de l'impératif (« Saute ») ;
- Lecture d'un nombre écrit en chiffres arabes ;
- Soustraction mentale consistant à ôter un nombre à un chiffre d'un nombre à deux chiffres, les nombres étant écrits en chiffres arabes.

La lecture du verbe « *Jump* » constituait, comme dans l'expérimentation 1, un contrôle. Les nombres à lire dans le bloc dédié étaient les mêmes que ceux de l'expérimentation 1 à ceci près qu'ils étaient écrits en chiffres arabes : « 4 », « 7 » et « 17 ». Les soustractions à effectuer dans le bloc dédié étaient également les mêmes que celles à effectuer dans l'expérimentations 1, à ceci près que les nombres étaient écrits en chiffres arabes : « 17 - 8 », « 16 - 9 » et « 12 - 4 ».

Dans l'expérimentation 3 (le mouvement à réaliser étant ici un pointage manuel à vitesse maximale), les tâches cognitives étaient du même type que celles de l'expérimentation 1 :

- Lecture du verbe d'action « *Reach* » (« Atteins ») ;
- Lecture d'un nombre écrit en toutes lettres ;
- Soustraction mentale consistant à ôter un nombre à un chiffre d'un nombre à deux chiffres, les nombres étant écrits en toutes lettres.

A l'image de la lecture du verbe d'action « *Jump* » dans les expérimentations 1 et 2, celle du verbe d'action « *Reach* » constituait un contrôle dans le sens où il a été montré que des verbes d'action spécifiques d'un mouvement donné de la main sont de nature à en faciliter la performance (Boulangier et al., 2006 ; 2008 ; Fargier et al., 2012 ; Nazir et al., 2008). Les nombres à lire (à haute voix) et les soustractions mentales étaient les mêmes que dans l'expérimentation 1.

Dans l'expérimentation 4 (le mouvement à réaliser étant ici un pointage manuel à vitesse maximale), les tâches cognitives à effectuer étaient les suivantes :

- Lecture du verbe d'action « *Reach* » (« Atteins ») ;
- Lecture d'un nombre écrit en chiffres arabes ;
- Soustraction mentale consistant à ôter un nombre à un chiffre d'un nombre à deux chiffres, les nombres étant écrits en chiffres arabes.

La lecture du verbe « *Reach* » dans le bloc dédié constituait de nouveau un contrôle, les nombres à lire et les soustractions mentales à effectuer étaient respectivement identiques à ceux et celles de l'expérimentation 3.

2.2. Tâches cognitives de la Série 2

Dans la Série 2, les sujets ont effectué chacun des trois derniers mouvements de chacun des trois blocs après avoir effectué une tâche cognitive.

Dans l'expérimentation 5 (le mouvement à réaliser étant ici un pointage manuel à vitesse maximale), les tâches cognitives à effectuer étaient les suivantes :

- Soustraction mentale « complexe » consistant à ôter un nombre à un chiffre d'un nombre à deux chiffres, les nombres étant écrits en chiffres arabes ;
- Addition mentale « simple » de deux nombres à un chiffre, ces nombres étant écrits en chiffres arabes ;
- Addition mentale « complexe » d'un nombre à un chiffre et d'un nombre à deux chiffres, ces nombres étant écrits en chiffres arabes.

Les soustractions mentales à effectuer étaient les mêmes que dans les expérimentations 2 et 4 (Série 1), donc : « $17 - 8$ », « $16 - 9$ » et « $12 - 4$ ». Les soustractions effectuées dans le bloc dédié constituaient ainsi un contrôle en regard des expérimentations 2 et 4 et permettaient de confirmer les résultats de l'expérimentation 4 (pointage manuel, comme dans l'expérimentation 5). Le choix d'intégrer des tâches d'addition mentale « simple » et « complexe » tient à ce que celles-ci sont de nature à susciter des modalités de résolution distinctives, les tâches de calcul simples favorisant le recours à des résultats déjà mémorisés (*e.g.* : $2 + 2 = 4$; $3 + 2 = 5$) et les tâches de calcul plus complexes, le recours à des procédures de calcul effectif (Thevenot et al., 2010). Il a en outre été montré que le recours à des procédures de calcul effectif suscite une activation fonctionnelle accrue du cortex prémoteur (lequel est notamment impliqué dans la préparation du mouvement) comparativement au recours à la mémoire de faits arithmétiques (Tschemtscher & Hauk, 2014). Les deux tâches d'addition de l'expérimentation 5 permettent ainsi d'élargir la portée de l'étude ici présenté en ciblant un autre calcul que la soustraction et

en se centrant sur la difficulté du calcul à effectuer. Les tâches d'addition simple étaient les suivantes : « $4 + 3$ », « $5 + 7$ » et « $6 + 3$ ». Les tâches d'addition complexes étaient les suivantes : « $17 + 8$ », « $16 + 9$ » et « $12 + 4$ » (mêmes paires de nombres qu'en soustraction complexe).

Dans l'expérimentation 6 (le mouvement à réaliser étant ici un pointage manuel à vitesse maximale), les tâches cognitives à effectuer étaient les suivantes :

- Soustraction mentale « complexe » consistant à ôter un nombre à un chiffre d'un nombre à deux chiffres, les nombres étant écrits en chiffres arabes ;
- Multiplication mentale « simple » de deux nombres à un chiffre, ces nombres étant écrits en chiffres arabes ;
- Multiplication mentale « complexe » d'un nombre à un chiffre et d'un nombre à deux chiffres, ces nombres étant écrits en chiffres arabes.

Les raisons du choix des tâches et stimuli sont similaires à celles invoquées dans le cas de l'expérimentation 5, le cas de la multiplication contribuant à nouveau à élargir la focale. Les tâches de soustraction complexe étaient les mêmes que celles de l'expérimentation 5. Les tâches de multiplication simple étaient les suivantes : « 4×3 », « 5×7 » et « 6×3 » (mêmes paires de nombres qu'en addition simple dans l'expérimentation 5). Les tâches de multiplication complexe étaient les suivantes : « 17×8 », « 16×9 » et « 12×4 » (même paires de nombres qu'en soustraction mentale et en addition complexe dans l'expérimentation 5).

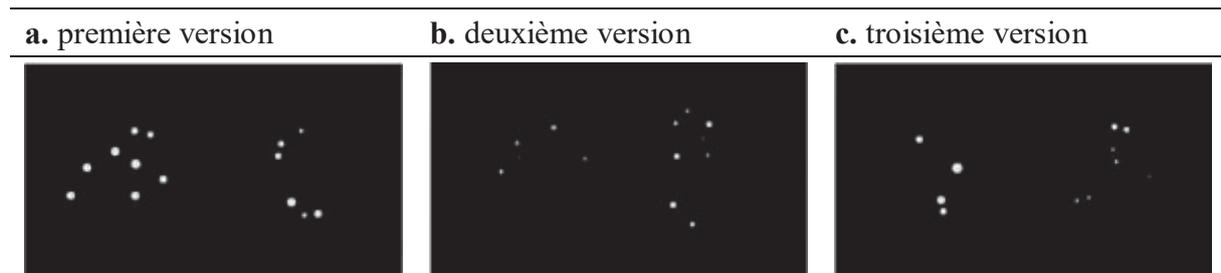
Dans l'expérimentation 7 (le mouvement à réaliser étant ici un pointage manuel à vitesse maximale), les tâches cognitives à effectuer étaient les suivantes :

- Soustraction mentale « complexe » consistant à ôter un nombre à un chiffre d'un nombre à deux chiffres, les nombres étant écrits en chiffres arabes ;
- Comparaison des quantités renvoyant à deux ensembles de points ;
- Comparaison de deux nombres à un chiffre chacun, ces nombres étant écrits en chiffres arabes.

Les tâches de soustraction étaient les mêmes que celles des expérimentations 5 et 6, les raisons de leur choix, également. Les tâches de comparaison ont été choisies à nouveau pour élargir le spectre de l'étude, en particulier parce que les tâches de comparaison de quantités sont de nature à prédire la performance des sujets (notamment adultes) dans des tâches de calcul (*e.g.* : Penner-Wilger et al., 2014 ; Morsanyi, O'Mahony, & McCormak, 2017). Les tâches de comparaison des quantités renvoyant à des ensembles de points ont été élaborées en conformité avec les

repères fournies par Dietrich et al. (2016) : présentation simultanée de deux ensembles de points, présentation pendant un temps très court (100 ms), pour susciter le recours au système d'approximation numérique (donc, éviter un recours au comptage), dispositions et tailles des points visant à éviter d'induire une solution (e.g. : par repérage de la « surface » couverte par les points). Les ensembles de points à comparer sont présentés dans le Tableau 3 :

Tableau 3 – Comparaison d'ensembles de points dans l'expérimentation 7



Les trois versions de la tâche de comparaison d'ensemble de points de l'expérimentation sont ici présentées.

Les paires de nombres à comparer dans le bloc dédié de l'expérimentation 7 étaient les suivantes : « 8 » et « 6 » ; « 5 » et « 8 » et enfin « 4 » et « 7 ». Les deux nombres étaient présentés simultanément, l'un positionné sur la moitié gauche de l'écran, l'autre sur la moitié droite, le positionnement gauche-droite ne permettant pas de deviner la réponse d'un essai à l'autre. Ainsi, dans une version de la tâche le plus grand nombre de la paire présentée était placé sur la partie gauche de l'écran, alors que dans les deux autres, le plus petit nombre de la paire présentée était positionné sur la partie gauche de l'écran.

2.3. Récapitulatif

En définitive, les sujets des groupes de contrôle ont effectué, pour, l'un trois blocs de six squat jump verticaux, pour l'autre, trois blocs de six pointages manuels, chaque mouvement étant réalisé après visualisation d'un écran noir pendant 10 sec. Cela visait à permettre de contrôler un éventuel effet de la répétition des mouvements dans les expérimentations, puisque les sujets des groupes expérimentaux des séries 1 et 2 avaient à réaliser le même nombre de mouvements selon la même logique de blocs.

Les sujets des groupes expérimentaux 1 à 4 (Série 1) comme 5 à 7 (Série 2) ont effectué les trois premiers mouvements (squat jump verticaux ou pointages manuels selon le groupe) dans les mêmes conditions que les sujets des groupes de contrôle. Ces performances motrices-ci des sujets des groupes expérimentaux servaient de repères pour envisager les trois performances

motrices suivantes dans chaque bloc, lesquelles ont été effectuées après une tâche cognitive particulière.

Le Tableau 4 récapitule les tâches cognitives effectuées par les sujets.

Tableau 4 – Tâches cognitives par groupe et série expérimentale

T	Stimuli			GC		GE Série 1				GE Série 2		
	a.	b.	c.	1	2	1	2	3	4	5	6	7
En				↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Lvj	Jump	Jump	Jump			↓	↓					
Lvp	Reach	Reach	Reach					↓	↓			
Lnl	four	seven	seventen			↓		↓				
Lna	4	7	17				↓		↓			
Scl	seventeen - eight	sixteen - nine	twelve - four			↓		↓				
Sca	17 - 8	16 - 9	12 - 4				↓		↓	↓	↓	↓
Asa	4 + 3	5 + 7	6 + 3							↓		
Aca	17 + 8	16 + 9	12 + 4							↓		
Msa	4 x 3	5 x 7	6 x 3								↓	
Mca	17 x 8	16 x 9	12 x 4								↓	
Ce												↓
Cna	8	6	5	8	4	7						↓

Les tâches cognitives effectuées par les sujets des groupes de contrôle (GC1 et 2) et par les sujets des groupes expérimentaux de la Série 1 (GE 1 à 4) ou 2 (GE 5 à 7) sont indiquées par le signe ↓. On a ainsi, pour GC1 et GC2, exclusivement des mouvements réalisés après visualisation d'un écran noir (En) pendant 10 sec. Les trois premiers mouvements de chaque bloc des GE ont aussi été effectués après visualisation d'un écran noir durant 10 sec. Les trois mouvements suivants de chaque bloc ont été effectués après la réalisation d'une tâche cognitive donnée. Chaque groupe a effectué trois tâches cognitives (trois blocs de six mouvements pour chaque groupe). Selon le groupe, on avait : Lvj (lecture à haute voix du verbe « *Jump* »), Lnl (lecture à haute voix de nombres écrits en toutes lettres), Lna (lecture à haute voix de nombres écrits en chiffres arabes), Scl (soustraction complexe de nombres écrits en toutes lettres), Sca (soustraction complexe de nombres écrits en chiffres arabes), Asa (addition simple de nombres écrits en chiffres arabes), Aca (addition complexe de nombres écrits en chiffres arabes), Msa (multiplication simple de nombres écrits en chiffres arabes), Mca (multiplication complexe de nombres écrits en chiffres arabes), Ce (comparaison de deux ensembles de points) ou Cna (comparaison de deux nombres écrits en chiffres arabes). Pour les tâches Lnl, Lna, Scl, Sca, Asa, Aca, Msa, Mca, Ce et Cna, trois versions ont été effectuées. L'ordre des tâches cognitives pour un GE donné (ordre des blocs) était randomisé, de même que l'ordre des versions d'une tâche cognitive donnée au sein d'un bloc.

Les expérimentations de la Série 1 visaient à confirmer les résultats de Rabahi et al. (2013) ayant montré un effet positif de la soustraction mentale, avec nombres en chiffres arabes, sur la performance en squat jump vertical (hauteur de saut) ainsi qu'à déterminer si cet effet éventuel

(1) est affecté par la lecture des nombres et/ou par le recours à des procédures de calcul, (2) dépend du format numérique utilisé pour présenter les nombres et (3) peut s'étendre à un autre mouvement qu'à celui de squat jump vertical. Il est ainsi logique (Tableau 4) que :

- les sujets des GE 1 à 4 aient été confrontés aux mêmes tâches de lecture de nombres et de soustraction mentale ;
- les sujets de deux d'entre eux (GE 1 et 3) aient eu affaire à des nombres écrits en toutes lettres alors que ceux des deux autres (GE 2 et 4) avaient affaire à des nombres écrits en chiffres arabes ;
- les sujets de l'un des deux GE ayant affaire à des nombres écrits en toutes lettres aient effectué des squat jump verticaux (GE 1) et ceux de l'autre (GE 3), des pointages manuels ;
- les sujets de l'un des deux groupes ayant affaire à des nombres écrits en chiffres arabes aient effectué des squat jump verticaux (GE 2), alors que l'autre a réalisé des pointages manuels (GE 4).

Les expérimentations de la Série 2 visaient par ailleurs (1) à étendre l'étude des effets éventuels des tâches arithmétiques sur la performance motrice à d'autres cas que celui de la seule soustraction mentale et (2) à déterminer si un éventuel effet des tâches arithmétiques sur la performance motrice est affecté par la difficulté de la tâche arithmétique à effectuer. Il est ainsi concevable (Tableau 4) que :

- les expérimentations se soient restreintes au cas des nombres écrits en chiffres arabes et au mouvement de pointage manuel ;
- les sujets des GE 5, 6 et 7 aient été confrontés à la même tâche de soustraction mentale (complexe) que ceux des sujets des GE 2 et 4 de la Série 1, à des fins de contrôle ;
- les sujets des GE 5 et 6 aient été respectivement confrontés à des tâches d'addition mentale et à des tâches de multiplication mentale avec, dans les deux cas, des calculs simples et des calculs complexes ;
- les sujets du GE 7 aient été confrontés à des tâches de comparaisons de quantités, la comparaison d'ensembles de points et la comparaison de nombres permettant en outre un prolongement quant à l'impact de la modalité numérique, envisagé principalement dans la Série 1.

3. Tâches motrices

Les sujets du groupe de contrôle CG1, comme ceux des groupes expérimentaux GE1 et GE2 de la Série 1 ont effectué, chacun, trois blocs de six squat jump verticaux. Les sujets du groupe de contrôle CG2, comme deux des groupes expérimentaux GE3 et GE4 de la Série 1 et ceux des groupes expérimentaux de la Série 2 (GE5, GE6 et GE7) ont quant à eux effectué trois blocs de six pointages manuels. Ces tâches motrices sont présentées ci-après.

3.1. Tâche de squat jump vertical

Les sujets du groupe de contrôle CG1 et des groupes expérimentaux GE1 et GE2 de la Série 1 avaient un indice de masse corporelle correspondant à des valeurs considérées comme normales (e.g. : Garrouste-Orgeas et al., 2004 ; Zhao et al., 2018). Ces valeurs sont indiquées par le Tableau 5.

Tableau 5 – Indices de masse corporelle des sujets des groupes CG1, GE1 et GE2

	Groupes		
	CG1	GE1	GE2
IMC \pm SD (kg/m ²)	24 \pm 1,0	24 \pm 1,2	23,5 \pm 1,0

Valeurs moyennes (\pm SD) d'indice de masse corporelle (IMC en kg/m²) pour les sujets du groupe de contrôle (CG1) et des groupes expérimentaux (GE1 et GE2) de la Série 1, ayant effectué des squat jump verticaux.

A l'instar du *Sargent jump*, élaboré dans les années 1920 (D. A. Sargent, 1921 ; L. W. Sargent, 1924), le squat jump vertical peut être considéré comme un test qui mesure la puissance musculaire des membres inférieurs. Depuis l'époque de création du *Sargent jump*, une diversité de tests a été développée dans un but de précision accrue ainsi que pour rendre compte d'une diversité de fonctions musculaires. Selon Maulder et Cronin (2005), le squat jump vertical vise plus précisément à mesurer l'explosivité des membres inférieurs dans des conditions de contraction concentrique. Cependant, la performance en saut vertical ne saurait véritablement s'envisager sous cet angle dans le sens où la hauteur de saut (h, Figure 28) n'est pas seulement le fait de la puissance musculaire produite par le sauteur : la hauteur de saut est avant tout le fait des coordinations inter-segmentaires du sauteur durant la phase de poussée, comme l'ont notamment souligné Bobbert et van Soest (2001).

Figure 28 – Squat jump vertical



Présentation du squat jump vertical, inspirée de Fargier et al. (2016) : instants-clés (1 à 4), phases et performance mesurée. L'instant-clé 1 correspond à la position initiale du sauteur : immobile, talons au sol, angle du genou à environ 90°, mains sur les hanches. L'instant-clé 2 est l'instant d'envol, instant où le sauteur cesse d'être en contact avec le sol. L'instant-clé 3 correspond à la flèche de la trajectoire aérienne du sauteur (instant où le centre de masse du sauteur atteint son point culminant). L'instant-clé 4 est celui de l'atterrissage (instant où le sujet entre à nouveau en contact avec le sol). Les instants-clés 1 et 2 bornent la phase de poussée, réalisée sans contremouvement initial, débutant lorsque les segments du sauteur entrent en rotation et se terminant lorsque le sujet quitte le sol. Les instants-clés 2 et 4 bornent la phase d'envol du saut. La hauteur de saut (h) est mesurée ici par la différence entre la position verticale (z) du centre de masse du sauteur lorsqu'il quitte le sol (instant-clé 2) et celle au pic de sa trajectoire aérienne (instant-clé 3) : $h = z_2 - z_1$.

Le squat jump vertical réalisé par les sujets de CG1, GE1 et GE2 de la Série 1 était conforme à la description fournie Figure 28. La position initiale était stable et le repère de l'angle du genou à 90° n'était pas strict. Il renvoyait à une consigne de position initiale en demi-squat car il a été repéré que l'imposition d'un angle précis est de nature à ne pas placer le sauteur dans des conditions optimales pour performer (Sanders & Wilson, 1992).

Dans l'étude ici présentée, la hauteur de saut (performance en squat jump vertical) a été déterminée en mesurant le temps d'envol avec un Optojump Next® (Microgate France, 38330 St-Ismier) connecté à un ordinateur portable. Cette logique de mesure de la performance est ainsi cohérente avec les repères fournis par la Figure 28 : ils envisagent en effet la performance en saut sous l'angle de l'élévation du centre de masse du sauteur entre l'instant d'envol et le pic de la trajectoire aérienne de celui-ci.

3.2. Tâche de pointage manuel

Les sujets de CG2, GE3 et GE4 de la Série 1 ainsi que de GE5, GE6 et GE7 de la Série 2 ont tous réalisé la tâche de pointage manuel avec la main droite. Cela est cohérent avec leurs scores à l'inventaire d'Edinburgh (Oldfield, 1971), comme en rend compte le Tableau 6.

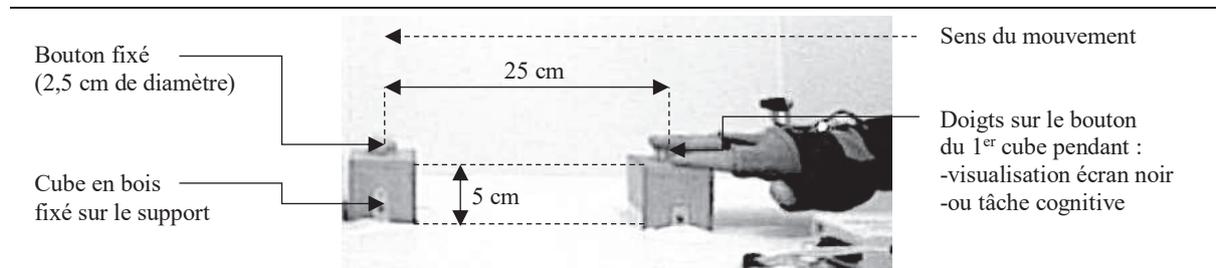
Tableau 6 – Scores (points) à l'inventaire d'Edinburgh

	Groupes					
	GC2	GE3	GE4	GE5	GE6	GE7
Scores \pm SD	78,2 \pm 10,1	78,2 \pm 9,8	72,9 \pm 9,6	79,6 \pm 6,9	82,9 \pm 8,3	73,9 \pm 10,6

Les scores à l'inventaire d'Edinburgh des sujets du groupe de contrôle CG2 et des groupes expérimentaux de la Série 1 (GE3 et GE4) et de la Série 2 (GE5, GE6 et GE7) ayant effectué la tâche de pointage manuel sont fournis. Le score correspond ici à un nombre de points (Oldfield, 1971). Ce nombre de points peut varier entre -100 et +100. Un score de -100 correspond au score maximal d'usage préférentiel de la main gauche et un score de +100, au score maximal d'usage préférentiel de la main droite. Les scores des groupes GC2, GE3, GE4, GE5, GE6 et GE7 indiquent ainsi un usage nettement préférentiel de la main droite.

Les sujets de chaque groupe ont en outre déclaré une préférence pour la main droite dans la tâche de pointage manuel qui leur était présentée et ont réalisé cette tâche en conséquence (Figure 29).

Figure 29 – Tâche de pointage manuel



Les sujets étaient assis sur une chaise, face à un bureau sur lequel étaient fixés deux cubes en bois de 5 cm de côté, l'un dans le prolongement de l'autre. Le torse du sujet était à environ 25 cm du cube le plus proche de lui. Sur chaque cube était fixé un bouton (2,5 cm de diamètre), la distance entre les centres des deux boutons était de 25 cm. Le sujet maintenait l'extrémité de ses doigts (index, majeur, annulaire) sur le bouton du cube le plus proche pendant la tâche de visualisation d'un écran noir ainsi que pendant les tâches cognitives. À l'issue de chacune de ces tâches, il devait presser le bouton du second cube le plus rapidement possible.

La performance motrice mesurée ici (Figure 29) était le temps de réponse, c'est-à-dire le temps écoulé entre l'instant d'initialisation du mouvement manuel, depuis le premier cube, et l'instant où le sujet appuyait sur le bouton du second cube. Les sujets n'avaient pas de pression en termes de temps de réaction et devaient simplement déclencher leur mouvement une fois la tâche de visualisation d'un écran noir ou la tâche cognitive à effectuer achevée. L'instant d'initialisation

du mouvement a été déterminé via un accéléromètre 3-D (Vernier® ; 175 13979 SW Millikan Way, Beaverton, OR 97005, USA) fixé sur une mitaine que les sujets portaient à la main droite (Figure 29). En fin de mouvement, le fait d'appuyer sur le bouton du second cube activait un circuit électrique. L'acquisition et le traitement des mesures a été effectuée via une carte d'acquisition DAQ® (National Instruments, 11500 Mopac Expwy, Austin, Texas) connectée à un software Labview® (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench 2009, 32-bit, National Instruments, Austin, Texas) et à un script Matlab® (Matlab R2016a, MathWorks incorporation, Natick, Massachusetts).

4. Analyse statistique

A l'issue des expérimentations, on disposait ainsi, pour le groupe de contrôle GC1 et pour les groupes expérimentaux GE1 et GE2 de la Série 1 des performances en squat jump vertical produites par les sujets : (1) trois blocs de six hauteurs de saut en squat jump vertical réalisées après visualisation d'un écran noir dans le cas de GC1, (2) trois blocs de six hauteurs de saut en squat jump vertical pour chacun des groupes GE1 et GE2, les trois premières hauteurs de chaque bloc ayant été réalisées après visualisation d'un écran noir et les trois dernières, après une tâche cognitive donnée. On disposait également, pour le groupe de contrôle GC2 et pour les groupes expérimentaux GE3 et GE4 de la Série 1 ainsi que GE5, GE6 et GE7 de la Série 2, des performances en pointage manuel (temps de réponse), dans la même logique que ci-dessus.

Les performances motrices réalisées par les sujets des groupes GC1 et GC2 (contrôles), GE1, GE2, GE3 et GE4 (Série 1), GE5, GE6 et GE7 (Série 2) ont été analysés en recourant au même modèle statistique, c'est-à-dire à un modèle linéaire multi-niveaux à effets mixtes (*Multilevel Linear Mixed-Effect model*, modèle MLME ; Finch, Bolin, & Kelley, 2014 ; Pinheiro & Bates, 2000).

Dans chaque modèle statistique, trois niveaux de variabilité ont été prise en considération (représentés par trois effets aléatoires, suivant des distributions normales, non corrélées et sans expectation) :

- Le premier niveau concerne les variations de performances liées aux différences individuelles (effet sujet) ;
- Le deuxième niveau a rapport à la performance de chaque série de trois mouvements consécutifs (*i.e.* : Triplet) effectués dans une même condition expérimentale (écran noir ou tâche cognitive en amont, cf. Figures 26 et 27) ;

- Le troisième niveau renvoie à l'effet résiduel relatif à la performance individuelle dans chaque Triplet.

Dans le cas des expérimentations mises en place pour contrôler un effet éventuel de la répétition des mouvements sur la performance, l'analyse statistique a pris en considération deux effets fixes et leur interaction :

- Un effet fixe « Bloc » a été considéré pour comparer les trois blocs de six performances motrices réalisées. Cet effet « Bloc » visait à contrôler une éventuelle influence de la fatigue et/ou de l'entraînement sur la performance motrice durant les expérimentations. Un effet « Bloc » statistiquement significatif dans les expérimentations de contrôle appellerait ainsi à vérifier l'existence d'un tel effet dans les Séries 1 et 2.
- Un effet fixe « Intra-bloc » visait à comparer les deux Triplets au sein d'un même bloc. L'effet « Intra-bloc » et l'effet d'interaction entre « Bloc » et « Intra-bloc » permettaient d'envisager la stabilité des performances repères (trois mouvements produits suites à la visualisation d'un écran noir) dans les Séries 1 et 2.

En tout état de cause, dans chacune des expérimentations (1 à 4) de la Série 1 et (5 à 7) de la Série 2, l'analyse statistique a pris en considération un effet fixe « Condition », relatif aux conditions expérimentales (Tableau 4).

Tous les modèles MLME mis en place ont été ajustés en recourant à une estimation par maximum de vraisemblance restreint (*restricted maximum likelihood estimation* ; Pinheiro & Bates, 2000, p. 75). En premier lieu, les effets fixes ont été testés via des tests F conditionnels (*conditional F-test*, Pinheiro & Bates, 2000, p. 90) et confirmés par des tests de rapport de vraisemblance (*likelihood-ratio test*). Les tests post-hoc ont ensuite été effectués en utilisant la méthode de Bretz, Hothorn et Westfall (2010) adaptée au cas des modèles MLME (méthode à une seule étape ; *family-wise error rate, i.e.* : probabilité d'au moins un résultat significatif alors que l'ensemble des hypothèses nulles est vrai, fixé à 5 %).

Tous les calculs ont été effectués avec le logiciel d'analyse statistique R 3.4.3 (R Core Team, 2017 ; packages nlme, lme4, multcomp and effects).

PARTIE III – RESULTATS

PARTIE III. RESULTATS

Les résultats des expérimentations de contrôle (CG1 et CG2) et ceux des Séries 1 (GE1-4) et 2 (G5-7) seront ci-après tour à tour présentés.

1. Expérimentations de contrôle

Les sujets des groupes de contrôle (GC1-2) ont effectué, chacun, trois blocs de six mouvements (squat jump vertical pour CG1, pointage manuel, CG2), entrecoupés de trois mn de repos. Chaque mouvement devait être réalisé à intensité maximale, après visualisation d'un écran noir pendant 10 sec (cf. II. § 1.2.). Dans le cas du squat jump vertical, la performance était mesurée par la hauteur de saut, dans le cas du pointage manuel, par le temps de réponse. L'objet était ici de contrôler un éventuel effet de la répétition des mouvements (inter blocs et intra bloc) sur la performance motrice. Compte tenu des expérimentations effectuées dans les Séries 1 et 2, les expérimentations de contrôle ont pris en compte, chacune, un effet fixe « Bloc » rendant compte de l'effet de la répétition des blocs de six sauts sur la performance, un effet fixe « Intra-bloc » prenant en compte les deux triplets de performances au sein d'un bloc et l'effet d'interaction entre « Bloc » et « Intra-bloc ».

Dans le cas du squat jump vertical (CG1), il n'a pas été trouvé d'interaction statistiquement significative entre les effets fixes « Bloc » et « Intra-bloc ». Le résultat du test F était en effet le suivant : $F(2,100) = 1.00, p > 0,05$ [confirmé le résultat du test LR : $\chi^2(2) = 1,99 ; p > 0,05$]. En outre, il n'a pas trouvé effet fixe « Intra-bloc » significatif [$F(1,100) = 2.06, p > 0,05$ et $\chi^2(1) = 2,06 ; p > 0,05$].

En revanche, un effet fixe « Bloc » statistiquement significatif a été trouvé [$F(2,100) = 3.61, p < 0,05$ et $\chi^2(2) = 7,2 ; p < 0,05$]. Les performances des Blocs 1, 2 et 3 (en cm) étaient respectivement (Tableau 7) : $28,97 \pm 2,04 ; 29,41 \pm 1,85 ; 29,31 \pm 1,97$. On constate ainsi un relatif progrès des performances entre le premier bloc et le deuxième bloc de sauts puis, une moindre variation des performances entre le deuxième bloc et le troisième.

Tableau 7 – Performances du groupe CG1 en squat jump vertical

	Hauteurs de saut (\pm SD) de CG1 (n = 21) en cm		
	Bloc 1	Bloc 2	Bloc 3
Totalité du bloc	28,97 \pm 2,04	29,41 \pm 1,85	29,31 \pm 1,97
Triplet 1	28,99 \pm 1,94	29,18 \pm 1,82	29,22 \pm 2,05
Triplet 2	28,96 \pm 2,17	29,64 \pm 1,86	29,40 \pm 1,89

Dans chaque bloc de squat jump verticaux (Bloc 1, Bloc 2, Bloc 3) les hauteurs de saut produites (\pm SD) en cm par les sujets du groupe de contrôle CG1 sont fournies pour ce qui est de la totalité du bloc (série de six sauts réalisés après visualisation d'un écran noir) ainsi que pour les trois premiers et trois derniers sauts du bloc (respectivement : Triplet 1 et Triplet 2).

Les tests post-hoc (*all-pairwise comparisons*) ont montré que seule la différence entre le Bloc 1 et le Bloc 2 était statistiquement significative (Tableau 8).

Tableau 8 – Résultats des comparaisons multiples dans le groupe CG1

Différences	Estimate (cm)	SE	Z	p
Bloc 2 - Bloc 1	0,45	0,17	2,55	0,03
Bloc 3 - Bloc 1	0,34	0,17	1,98	0,11
Bloc 3 - Bloc 2	0,10	0,17	-0,57	0,83

Résultats des comparaisons multiples (*all-pairwise comparisons*) entre performances en squat jump vertical produites dans les Blocs 1, 2 et 3. Les différences estimées (Estimates) en cm sont fournies ainsi que les valeurs d'erreur standard (SE), les résultats des tests Z et valeurs de p associées [méthode à une seule étape ; $p (Z > |z|)$].

Dans l'expérimentation de contrôle concernant le pointage manuel, il n'a pas été trouvé d'interaction significative entre « Bloc » et « Intra-bloc » [$F(2,95) = 2,74, p > 0,05$ et $\chi^2(2) = 5,48 ; p > 0,05$]. En outre, il n'a été trouvé ni d'effet fixe « Bloc » statistiquement significatif [$F(2,95) = 0,44, p > 0,05$ et $\chi^2(2) = 0,89 ; p > 0,05$], ni d'effet fixe « Intra-bloc » statistiquement significatif [$F(1,95) = 1,92, p > 0,05 ; \chi^2(1) = 1,92 ; p > 0,05$].

En définitive, l'analyse statistique des performances en squat jump vertical (GG1) n'a avéré aucune interaction significative entre « Bloc » et « Intra-bloc ». Cette analyse n'a en outre avéré aucun effet fixe « Intra-bloc » statistiquement significatif. Les résultats de l'analyse statistique des performances en pointage manuel (CG2) ont conduit aux mêmes constatations concernant l'interaction entre « Bloc » et « Intra-bloc » et l'effet fixe « Intra-bloc ». Au regard des Séries expérimentales 1 et 2, ces résultats ont indiqué une stabilité des performances motrices repères (*i.e.* : des trois premiers mouvements de chaque bloc des GE, réalisés après la visualisation d'un écran noir ; cf. II. §1.2.). Par conséquent, dans les expérimentations relatives aux GE 1 à 4 de la Série 1 et aux GE 5 à 7 de la Série 2, la moyenne des performances réalisées en condition repère de chaque bloc a été pris en compte pour procéder aux analyses statistiques.

Il a par ailleurs été repéré un possible effet de la répétition des squat jump verticaux sur la performance en saut (CG1). Bien que la seule différence inter blocs significative (entre le Bloc 1 et le Bloc 2) soit modérée (0,45 cm dans le cas de sauts de moins de 30 cm en moyenne, Tableau 7), cette significativité a imposé de contrôler, dans le cas des GE 1 et 2 de la Série 1 (effectuant des sauts verticaux) l'existence d'un éventuel effet fixe « Bloc ».

2. Série 1

La Série 1, qui a permis de produire un article publié (Khayat, Champely, Diab, Rifai Sarraj, & Fargier, 2019 ; Partie Publications), a visé à confirmer un effet positif de la soustraction mentale complexe, avec chiffres arabes, sur la performance en saut vertical, trouvé par Rabahi et al. (2013). Elle a en outre cherché à déterminer :

- Si la soustraction mentale complexe peut impacter la performance d'une autre tâche motrice que le squat jump vertical, en l'occurrence la performance d'un pointage manuel ;
- Si cette éventuelle influence est liée au traitement numérique (lecture d'un nombre, en l'occurrence) et/ou au recours à des procédures de calcul (relatives à la soustraction) ;
- Si cette éventuelle influence est affectée par le format numérique utilisé (en l'occurrence, nombres écrits en toutes lettres ou bien en chiffres arabes).

Les résultats seront ci-après présentés en ce qui concerne le squat jump vertical (GE1 et 2) puis, pour ce qui est du pointage manuel (GE3 et 4).

2.1. Effets de la soustraction mentale complexe sur la performance en squat jump vertical

Dans les GE 1 et 2, les trois premiers sauts de chaque bloc étaient réalisés après visualisation d'un écran noir et fournissaient des performance repères (appelées ci-après « Base ») pour envisager les performances suite à : la lecture du mot « *Jump* » (appelées ci-après « Jump »), la lecture d'un nombre (« Ln ») et à la réalisation d'une soustraction mentale complexe (« Sc »). Dans le cas de GE1, les nombres étaient écrits en toutes lettres (« Lnl » et « Scl ») et dans le cas de GE2, ils étaient écrits en chiffres arabes (« Lna » et « Sca »).

L'analyse statistique a en premier lieu contrôlé un éventuel effet de la répétition des sauts durant les deux expérimentations (GE1 et 2). A la différence de l'expérimentation de contrôle, aucun

effet fixe « Bloc », donc aucune influence de la répétition des mouvements sur la hauteur de saut, n'a été trouvé. (avec : $F(2,195) = 0,29$; $p > 0,05$ et $\chi^2(2) = 0,57$; $p > 0,05$ pour GE1 et $F(2,195) = 0,65$; $p > 0,05$ et $\chi^2(2) = 1,3$; $p > 0,05$ pour GE2).

Les performances produites après chaque condition expérimentale sont récapitulées Tableau 9.

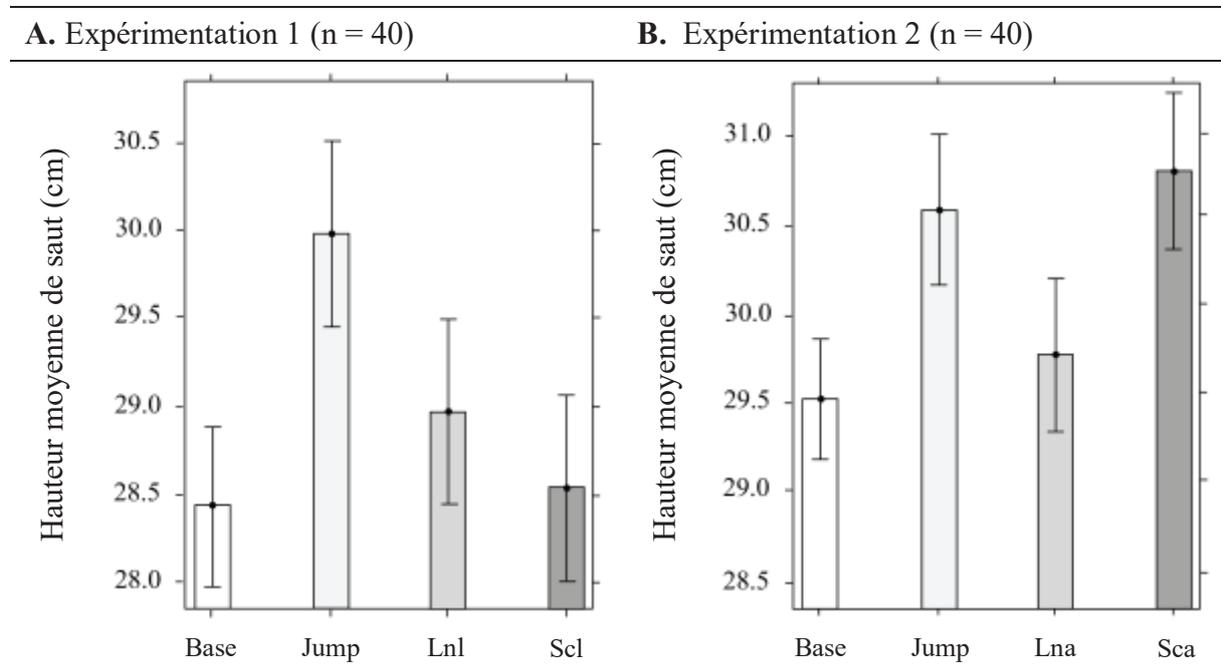
Tableau 9 – Hauteurs de saut selon les conditions expérimentales (GE1 et 2)

	Performance en squat jump vertical (\pm SD) en cm			
	Base	Jump	Ln	Sc
GE1 (n = 40) chiffres en lettres (l)	28,42 \pm 1,95	29,98 \pm 1,93	28,96 \pm 2,06	28,52 \pm 2,13
GE2 (n = 40) chiffres arabes (a)	29,52 \pm 1,55	30,59 \pm 1,59	29,74 \pm 1,51	30,82 \pm 1,94

Les hauteurs de saut réalisées dans chaque expérimentation (GE1 = avec nombres écrits en toutes lettres, l ; GE2 = avec nombres en chiffres arabes, a) sont indiquées pour chaque condition expérimentale, i.e. : Base = après visualisation d'un écran noir pendant 10 sec ; Jump = après lecture du verbe d'action « *Jump* » pendant 10 sec ; Ln = après lecture d'un nombre pendant 10 sec ; Sc = après réalisation d'une soustraction mentale complexe.

Dans l'expérimentation 1, et dans l'expérimentation 2, l'effet fixe « Condition » (écran noir et tâches cognitives) s'est avéré statistiquement significatif, comme en rend compte la Figure 30.

Figure 30 – Hauteurs de sauts par condition expérimentale (GE1 et GE2)



Les graphes présentés [« *effect plots* » selon Fox et Hong (2009)], rendent compte des hauteurs de saut moyennes ajustées en squat jump vertical après : visualisation d'un écran noir (Base), lecture du verbe d'action « *Jump* » (Jump), lecture d'un nombre (Ln) et soustraction mentale complexe (Sc). Dans l'expérimentation 1 (Figure 30.A), les nombres étaient écrits en toutes lettres (l ; donc : Ln_l et Sc_l) et dans l'expérimentation 2 (Figure 30.B), les nombres étaient écrits en chiffres arabes (a, donc : Ln_a et Sc_a). Les traits verticaux indiquent un intervalle de confiance de $\pm 0,95$.

Concernant l'effet fixe « Condition », on a ainsi dans l'expérimentation 1 : $F(3,195) = 24,51$; $p < 0,001$ [$\chi^2(3) = 73,53$; $p < 0,001$]. Dans le cas de l'expérimentation 2, on a en outre : $F(3,195) = 23,22$; $p < 0,001$ [$\chi^2(3) = 69,69$; $p < 0,001$]. Ainsi, dans l'expérimentation 1 (Base, Jump, Ln et Sc avec nombres écrits en toutes lettres, l), comme dans l'expérimentation 2 (Base, Jump, Ln et Sc avec nombres en chiffres arabes, a), les tests statistiques indiquent l'existence d'une différence significative, au moins, dans le quatuor de performances (Figure 30).

Ces résultats ont ainsi appelé à effectuer des tests post-hoc (*all-pairwise comparisons*) afin de déterminer les différences significatives au sein du quatuor de performances motrices de chacune des expérimentations 1 et 2.

Les résultats des tests post-hoc dans le cas de l'expérimentation 1 (nombres écrits en toutes lettres) sont présentés Tableau 10 (voir aussi Figure 30.A). Ces résultats indiquent en premier lieu que la hauteur de saut était significativement plus élevée après lecture de « *Jump* » qu'en condition repère Base, *i.e.* : après visualisation d'un écran noir (Jump - Base ; Tableau 10). La hauteur de saut était également significativement plus élevée après lecture d'un nombre (écrit en toutes lettres) qu'en condition repère, bien que ce différentiel soit moindre (Lnl - Base ; Tableau 10). De fait, la hauteur de saut après la lecture de « *Jump* » s'est avérée significativement plus élevée qu'après la lecture d'un nombre écrit en toutes lettres (Lnl - Jump ; Tableau 10). Enfin, il n'a pas été trouvé de différence significative entre les hauteurs de saut atteintes après soustraction complexe de deux nombres écrits en toutes lettres et en condition repère (Scl - Base ; Tableau 10).

Tableau 10 – Comparaisons multiples des hauteurs de sauts dans l'expérimentation 1 (n = 40)

Différences	Estimate (cm)	SE	Z	p
Jump - Base	1,57	0,19	8,36	< 0,001
Lnl - Base	0,53	0,19	2,84	0,02
Scl - Base	0,10	0,19	0,55	0,94
Lnl - Jump	-1,04	0,23	-4,51	< 0,001
Scl - Jump	-1,47	0,23	-6,35	< 0,001
Scl - Lnl	-0,43	0,23	-1,86	0,24

Résultats des comparaisons multiples des hauteurs de sauts entre Base (hauteur atteinte après visualisation d'un écran noir), Jump (hauteur atteinte après lecture du mot « *Jump* »), Lnl (hauteur atteinte après lecture d'un nombre écrit en toutes lettres) et Scl (hauteur atteinte après soustraction mentale complexe avec nombres écrits en toutes lettres). Concernant Estimate (différences estimées entre performances, en cm), des différences entre deux SE (*standard error*) peuvent exister après la deuxième décimale (par exemple, dans l'expérimentation 1, les SE pour Jump - Base et N - Base étaient respectivement de 0,1877 et de 0,1874). Concernant les tests Z, les valeurs ajustées de p sont fournies (méthode à une étape, $p(Z > |z|)$).

Les résultats des tests post-hoc dans le cas de l'expérimentation 2 (nombres écrits en chiffres arabes) sont quant à eux présentés Tableau 11 (voir aussi Figure 30.B).

Tableau 11 – Comparaisons multiples des hauteurs de sauts dans l'expérimentation 2 (n = 40)

Différences	Estimate (cm)	SE	Z	p
Jump - Base	1,06	0,18	5,98	< 0,001
Lna - Base	0,25	0,18	1,41	0,48
Sca - Base	1,26	0,18	7,02	< 0,001
Lna - Jump	-0,81	0,22	-3,66	0,001
Sca - Jump	0,20	0,22	0,91	0,80
Sca - Lna	1,01	0,22	4,48	< 0,001

Résultats des comparaisons multiples des hauteurs de sauts entre Base (hauteur atteinte après visualisation d'un écran noir), Jump (hauteur atteinte après lecture du mot « *Jump* »), Lna (hauteur atteinte après lecture d'un nombre écrit en chiffres arabes) et Sca (hauteur atteinte après soustraction mentale complexe avec nombres écrits en chiffres arabes). Concernant Estimate (différences estimées entre performances, en cm), des différences entre deux SE (*standard error*) peuvent exister après la deuxième décimale. Concernant les tests Z, les valeurs ajustées de p sont fournies (méthode à une étape, $p(Z > |z|)$).

Les résultats des comparaisons multiples indiquent de nouveau que la hauteur de saut après lecture de « *Jump* » est supérieure à celle atteinte en condition repère Base (Jump - Base ; Tableau 11). A la différence de l'expérimentation 1 (nombres écrits en toutes lettres), la hauteur de saut après lecture d'un nombre écrit en chiffres arabes ne s'est pas avérée significativement différente de celle atteinte en condition repère Base (Lna - Base ; Tableau 11). Toujours en décalage avec l'expérimentation 1, la hauteur de saut atteinte dans l'expérimentation 2 après soustraction complexe de deux nombres écrits en chiffres arabes s'est avérée significativement supérieure à celle atteinte en condition repère Base (Sca - Base ; Tableau 11) ainsi qu'après la lecture d'un nombre (Sca - Lna ; Tableau 11).

En définitive les expérimentations 1 et 2, dans lesquelles les sujets ont réalisé des squat jump verticaux, renvoient à des résultats pour partie similaires et pour partie distincts :

- Dans les deux cas, la lecture de « *Jump* » s'est avérée avoir un effet positif sur la hauteur de saut ;
- En revanche, seule l'expérimentation 1 (nombres écrits en toutes lettres) a permis d'avérer un effet positif de la lecture d'un nombre sur la performance en squat jump vertical, cet effet étant modéré (saut après lecture d'un nombre, Lnl, plus haut de 0,53 cm qu'après visualisation d'un écran noir, Base ; Tableau 10) ;

- En outre, seule l'expérimentation 2 (nombres écrits en chiffres arabes) a permis d'avérer un effet positif de la soustraction mentale complexe sur la hauteur de saut (saut après soustraction mentale complexe, Sca, plus haut de 1,26 cm qu'après visualisation d'un écran noir ; Tableau 11)

2.2. Effets de la soustraction mentale complexe sur la performance en pointage manuel

Dans les GE 3 et 4, les trois premiers pointages de chaque bloc étaient effectués après visualisation d'un écran noir pendant 10 sec. Ils fournissaient des performances repères (Base) pour envisager les performances suite à la lecture du mot « Reach » (dénommées ci-après « Reach »), à la lecture de nombres (« Ln ») et à la réalisation de soustractions mentales complexes (« Sc »). Dans le cas de GE3, les nombres étaient écrits en toutes lettres (« Lnl » et « Scn ») et dans le cas de GE4, les nombres étaient écrits en chiffres arabes (« Lna » et « Sca »). Les performances motrices produites après chaque condition expérimentale sont récapitulées Tableau 12.

Tableau 12 – Temps de réponse selon les conditions expérimentales (GE3 et GE4)

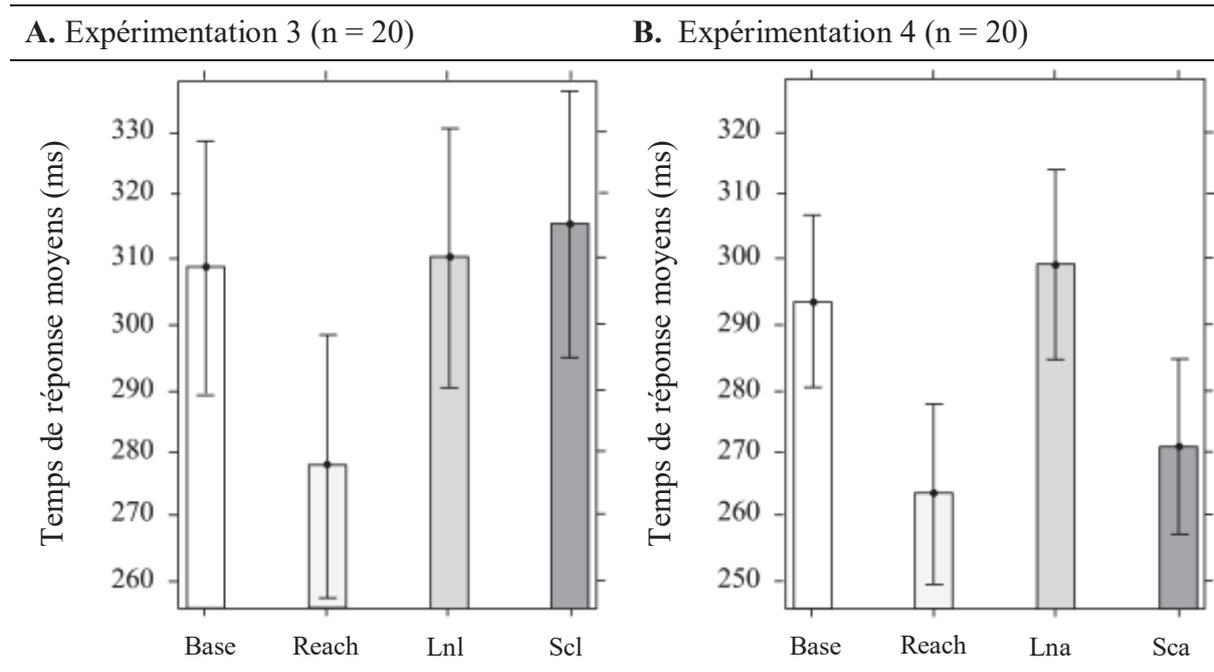
	Temps de réponse (\pm SD) en pointage manuel (ms)			
	Base	Reach	Ln	Sc
GE3 (n = 20) chiffres en lettres (l)	308,70 \pm 45,35	278,08 \pm 46,78	310,58 \pm 54,96	314,92 \pm 46,80
GE4 (n = 20) chiffres arabes (a)	293,81 \pm 32,60	263,62 \pm 32,93	299,01 \pm 38,23	270,83 \pm 34,58

Les temps de réponse dans chaque expérimentation (GE3 = avec nombres écrits en toutes lettres, l ; GE4 = avec nombres en chiffres arabes, a) sont indiqués pour chaque condition expérimentale : Base = après visualisation d'un écran noir pendant 10 sec ; Reach = après lecture du verbe d'action « Reach » pendant 10 sec ; Ln = après lecture d'un nombre pendant 10 sec ; Sc = après réalisation d'une soustraction mentale complexe.

Dans chacune des expérimentations 3 et 4, l'effet fixe « Condition » (écran noir et tâches cognitives) s'est avéré statistiquement significatif, ce que laissent entendre les données du Tableau 12. On a ainsi, concernant le GE3 : $F(3, 95) = 43,34$; $p < 0,001$ et $\chi^2(3) = 130,02$; $p < 0,001$. On a en outre, dans le cas du GE4, $F(3, 95) = 51,24$; $p < 0,001$ et $\chi^2(3) = 153,73$; $p < 0,001$.

Dans chacune des expérimentations 3 et 4, les résultats des tests F et LR indiquent ainsi l'existence d'une différence significative, au moins dans le quatuor de performances, ce qu'on repère également Figure 31. Ces résultats ont ainsi appelé à effectuer des tests post-hoc (*all-pairwise comparisons*) pour chacune des expérimentations 3 et 4.

Figure 31 – Temps de réponse par condition expérimentale (GE3 et GE4)



Les graphes présentés [« *effect plots* » selon Fox et Hong (2009)], rendent compte des temps de réponse moyens ajustés en pointage manuel après : visualisation d'un écran noir (Base), lecture du verbe d'action « *Reach* » (Reach), lecture d'un nombre (Ln) et soustraction mentale complexe (Sc). Dans l'expérimentation 3 (Figure 31.A), les nombres étaient écrits en toutes lettres (l ; donc : Lnl et Scl) et dans l'expérimentation 4 (Figure 31.B), les nombres étaient écrits en chiffres arabes (a, donc : Lna et Sca). Les traits verticaux indiquent un intervalle de confiance de ± 0.95 .

Les résultats des tests post-hoc dans le cas de l'expérimentation 3 (nombres écrits en toutes lettres) sont présentés Tableau 13 (voir aussi Figure 31.A).

Tableau 13 – Comparaisons multiples des temps de réponse l'expérimentation 3 (n = 20)

Différences	Estimate (ms)	SE	Z	p
Reach - Base	-30,92	3,06	-10,09	< 0,001
Lnl - Base	1,43	3,06	0,47	0,97
Scl - Base	6,97	3,08	2,26	0,10
Lnl - Reach	32,35	3,75	8,63	< 0,001
Scl - Reach	37,89	3,79	10,00	< 0,001
Scl - Lnl	5,55	3,79	1,46	0,45

Résultats des comparaisons multiples des temps de réponse (TR) en pointage entre Base (TR après visualisation d'un écran noir), Reach (TR après lecture du mot « *Reach* »), Lnl (TR après lecture d'un nombre écrit en toutes lettres) et Scl (TR après soustraction mentale complexe avec nombres écrits en toutes lettres). Concernant Estimate (différences estimées entre performances, en cm), des différences entre deux SE (*standard error*) peuvent exister après la deuxième décimale. Concernant les tests Z, les valeurs ajustées de p sont fournies (méthode à une étape, $p(Z > |z|)$).

Les résultats des tests post-hoc révèlent la seule influence de la lecture du verbe d'action « *Reach* » sur la performance en pointage, comparativement à la performance repère Base, *i.e.* :

après visualisation d'un écran noir, (Reach - Base ; Tableau 13). En outre, le temps de réponse après la lecture de « *Reach* » s'est avéré plus court (plus rapide) que celui réalisé après la lecture d'un nombre écrit en toutes lettres (Lnl - Reach ; Tableau 13) ainsi qu'après la soustraction complexe de deux nombres écrits en toutes lettres (Scl - Reach ; Tableau 13).

Les résultats des tests post-hoc dans le cas de l'expérimentation 4 (nombres écrits en chiffres arabes) sont présentés Tableau 14 (voir aussi Figure 31.B).

Tableau 14 – Comparaisons multiples des temps de réponse dans l'expérimentation 4 (n = 20)

Différences	Estimate (ms)	SE	Z	p
Reach - Base	-30,26	3,06	-9,88	< 0,001
Lna - Base	5,21	3,06	1,70	0,32
Sca - Base	-22,91	3,06	-7,49	< 0,001
Lna - Reach	35,47	3,76	9,42	< 0,001
Sca - Reach	7,35	3,75	1,96	0,20
Sca - Lna	-28,12	3,75	-7,50	< 0,001

Résultats des comparaisons multiples des temps de réponse (TR) en pointage entre Base (TR après visualisation d'un écran noir), Reach (TR après lecture du mot « *Reach* »), Lna (TR après lecture d'un nombre écrit en chiffres arabes) et Sca (TR après soustraction mentale complexe avec nombres écrits en chiffres arabes). Concernant Estimate (différences estimées entre performances, en cm), des différences entre deux SE (*standard error*) peuvent exister après la deuxième décimale. Concernant les tests Z, les valeurs ajustées de p sont fournies (méthode à une étape, $p(Z > |Z|)$).

Les résultats des comparaisons multiples relatives à l'expérimentation 4 avèrent, comme ceux de l'expérimentation 3, un temps de réponse après lecture de « *Reach* » plus court (plus rapide) qu'en condition repère Base (Reach - Base ; Tableau 14). Comme dans l'expérimentation 3 (nombres écrits en toutes lettres), dans l'expérimentation 4 (nombres en chiffres arabes), il n'a pas été trouvé de différence significative entre les temps de réponse après lecture d'un nombre et après visualisation d'un écran noir (Lna - Base ; Tableau 14). En revanche, à la différence de l'expérimentation 3, dans l'expérimentation 4, le temps de réponse après soustraction complexe de deux nombres s'est avéré plus court que celui obtenu après la condition repère Base (Sca - Base ; Tableau 14). En outre, dans l'expérimentation 4, les temps de réponse après lecture de « *Reach* » et après soustraction complexe se sont avérés significativement plus courts que ceux obtenus en condition repère Base et après lecture d'un nombre (Tableau 14).

Les expérimentations 3 et 4, dans lesquelles les sujets ont réalisé des pointages manuels, renvoient à des résultats pour partie similaires et pour partie distinctifs :

- Dans les deux cas, la lecture de « *Reach* » s'est avérée favoriser la performance motrice (temps de réponse), alors que la lecture d'un nombre est apparue ne pas l'impacter.

- En revanche, les résultats des expérimentations 3 et 4 diffèrent en ce qui concerne l'effet de la soustraction mentale complexe : dans le cas des nombres écrits en toutes lettres, celle-ci est apparue ne pas influencer sur la performance motrice, alors que, dans le cas des nombres écrits en chiffres arabes, elle s'est avérée la favoriser.

2.3. Synthèse des résultats de la Série 1

La Série expérimentale 1 visait à étudier l'influence possible de la soustraction mentale complexe sur la performance d'un squat jump vertical à intensité maximale ainsi que sur la performance d'un pointage manuel à vitesse maximale. Deux ensembles d'expérimentations, intéressant respectivement le squat jump vertical et le pointage manuel, ont étudié cet effet éventuel dans le cas de deux formats numériques (nombres écrits en toutes lettres et nombres écrits en chiffres arabes). Les expérimentations 1 et 2 se sont ainsi centrées sur le squat jump vertical, respectivement dans le cas des nombres écrits en toutes lettres et dans celui des nombres écrits en chiffres arabes. Les expérimentations 3 et 4 se sont quant à elles centrées sur le pointage manuel, respectivement dans le cas des nombres écrits en toutes lettres et dans celui des nombres écrits en chiffres arabes. Chacune de ces expérimentations a conduit à comparer entre elles les performances motrices produites après visualisation d'un écran noir (condition repère), après lecture d'un verbe d'action spécifique, en tant que tâche de contrôle (« *Jump* » dans le cas du saut, « *Reach* » dans le cas du pointage manuel), après lecture d'un nombre et après une soustraction mentale complexe (nombre à un chiffre ôté d'un nombre à deux chiffres). Ces deux dernières conditions visaient à distinguer les effets éventuels respectifs du traitement numérique et du recours à des stratégies de calcul sur la performance motrice.

Dans chaque expérimentation relative au squat jump vertical (expérimentations 1 et 2), les sujets ont réalisé des saut plus performants (hauteurs de saut plus grandes) après lecture du mot « *Jump* » qu'après visualisation d'un écran noir (condition repère Base), ce qui corrobore les résultats de Rabahi et al. (2013). Dans chaque expérimentation relative au pointage manuel (expérimentations 3 et 4), les sujets ont également produit des temps de réponse plus courts après lecture du mot « *Reach* » qu'après visualisation d'un écran noir, ce qui est cohérent avec les résultats de Boulenger et al. (2006 ; 2008), Fargier et al. (2012) et de Nazir et al. (2008). Les résultats des expérimentations 1 à 4 relatifs à la lecture des verbes d'action « *Jump* » et « *Reach* » confirment en définitive que la lecture d'un verbe d'action spécifique favorise la performance de l'action effective correspondante. Cela concourt par ailleurs à indiquer le bon déroulement des expérimentations effectuées.

Au regard des tâches numériques, un effet positif de la lecture d'un nombre sur la performance motrice a été trouvé dans l'expérimentation 1 (effet de la lecture d'un nombre écrit en toutes lettres sur la performance en squat jump vertical). Si cet effet est statistiquement significatif ($p = 0,02$), il correspond cependant à une différence avec la performance en condition repère (Base) de seulement 0,53 cm. Cette différence peut ainsi être considérée comme modérée, d'autant plus que dans l'expérimentation 1, la hauteur de saut après lecture de « Jump » s'est avérée supérieure de 1,57 cm ($p < 0,001$) à celle réalisée après Base et de 1,04 cm ($p < 0,001$) à celle obtenue après lecture d'un nombre écrit en toutes lettres. En outre, aucun effet significatif de la lecture d'un nombre, qu'il soit écrit en toutes lettres ou en chiffres arabes, n'a été trouvé dans les expérimentations 2, 3 et 4. En dépit de travaux suggérant un lien entre traitement numérique et motricité (e.g. : Loetscher et al., 2008 ; Winter et Matlock, 2013) ou montrant un effet de la quantité correspondant à un nombre visualisé sur la cinématique d'un mouvement manuel (Andres et al., 2008 ; Rugani et al., 2017), les résultats de la Série 1 montrent que la seule lecture d'un nombre est susceptible de n'avoir qu'un faible effet, voire de n'avoir aucun effet, sur la performance motrice, en tout état de cause dans le cas d'un mouvement à intensité maximale.

La Série 1 a par ailleurs montré que la soustraction mentale complexe de nombres écrits en chiffres arabes favorise la performance motrice, en squat jump vertical à intensité maximale, comme en pointage manuel à vitesse maximale, alors que la soustraction mentale des mêmes nombres écrits en toutes lettres n'a pas d'effet significatif sur ces performances. Ainsi, après soustraction avec nombres écrits en chiffres arabes, les sujets de l'expérimentation 2 ont sauté 1,06 cm plus haut ($p < 0,001$) qu'après visualisation d'un écran noir (condition repère Base). En outre ceux de l'expérimentation 4 ont produit des temps de réponse en pointage, après soustraction avec nombres écrits en chiffres arabes, de 30,20 ms plus rapides (plus courts, $p < 0,001$),

En définitive, les résultats de la Série 1 confirment ceux de Rabahi et al. (2013) concernant l'effet de la soustraction mentale complexe avec nombres écrits en chiffres arabes sur la performance en squat jump vertical. Les résultats de la Série 1 montrent en outre que cet effet n'est pas limité au seul cas de la performance (hauteur de saut) d'un saut à intensité maximale mais qu'il vaut aussi dans le cas de la performance (temps de réponse) d'un pointage manuel à vitesse maximale. Par ailleurs, les résultats de la Série 1 suggèrent que cet effet renvoie fortement à l'activité de calcul (application de règles opératoires) plutôt qu'au traitement numérique (simple lecture des nombres). Enfin, et c'est sans doute là que se situe le résultat

majeur de la Série 1, il apparaît que cet effet de la soustraction mentale complexe est dépendant du format numérique utilisé pour présenter les nombres, l'effet positif sur la performance motrice existant, en saut comme en pointage, lorsque les nombres sont écrits en chiffres arabes mais pas lorsqu'ils sont écrits en toutes lettres.

3. Série 2

La Série expérimentale 1 s'étant centrée sur le cas de la soustraction mentale complexe, il a semblé naturel de la prolonger d'une Série expérimentale 2 envisageant les effets d'autres tâches arithmétiques sur la performance motrice. Ce, dans le cas des nombres écrits en chiffres arabes, compte tenu des résultats de la Série 1, et du pointage manuel. La Série 2, qui a suscité la rédaction d'un article (Khayat, Champely, Diab, Rifai Sarraj, & Fargier, soumis ; Partie Publications), a cherché à déterminer :

- Si des calculs mentaux autres que la soustraction mentale, en l'occurrence l'addition et la multiplication mentales, peuvent influencer positivement sur la performance motrice ;
- Si cette influence est affectée par la difficulté de la tâche de calcul, en l'occurrence lorsque ces calculs impliquent deux nombres à un seul chiffre et lorsque ces calculs portent sur un nombre à un chiffre et un nombre à deux chiffres ;
- Si des tâches arithmétiques autres que de calcul, en l'occurrence de comparaison de quantités, peuvent influencer sur la performance motrice et si le format numérique affecte cette éventuelle influence.

3.1. Effets de l'addition et de la multiplication sur la performance motrice

Les groupes GE5 et GE6 ont réalisé, chacun, trois blocs de six pointages manuels. Les trois premiers pointages de chaque bloc étaient effectués après visualisation d'un écran noir pendant 10 sec et fournissaient des performances repères (Base) pour envisager les performances suite à une tâche cognitive. Dans l'expérimentation 5, les tâches cognitives étaient les suivantes (nombres écrits en chiffres arabes) : soustraction mentale complexe (nombre à un chiffre ôté d'un nombre à deux chiffres ; « Sca »), addition mentale simple (addition de deux nombres à un chiffre ; « Asa ») et addition mentale complexe (Mca). Dans l'expérimentation 6, on avait : Sca, multiplication mentale simple (Msa) et multiplication mentale complexe (Mca). Les temps de réponses produits sont fournis par le Tableau 15.

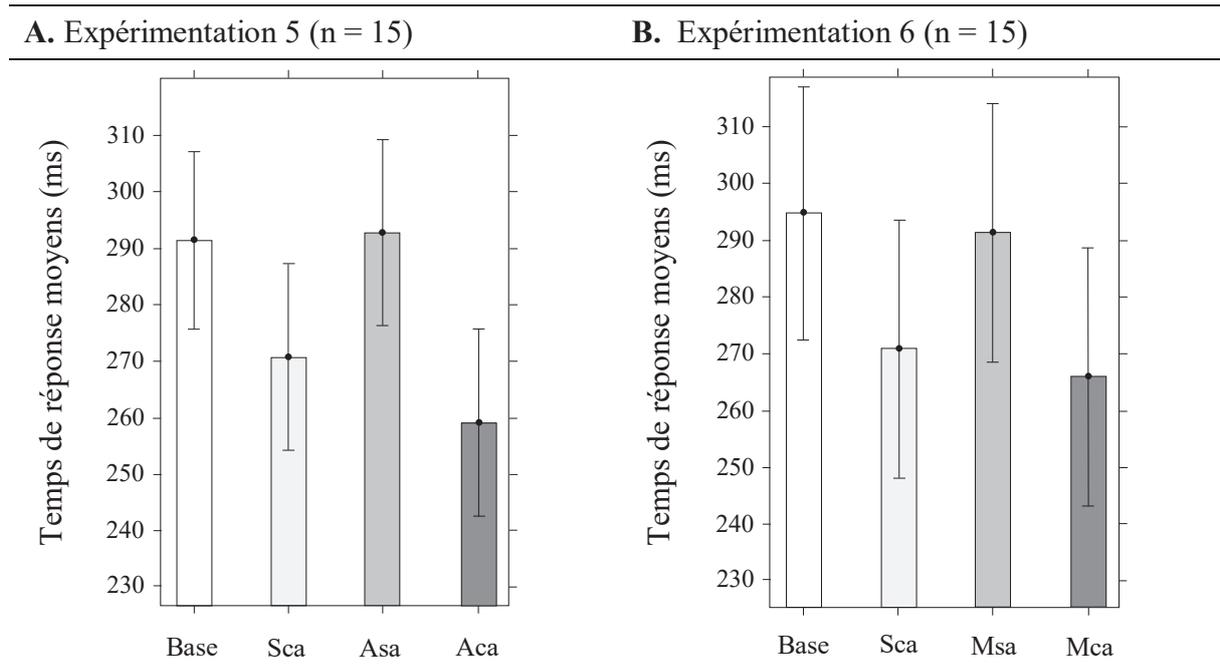
Tableau 15 – Temps de réponse dans les expérimentations 5 et 6

Expérimentation 5 (n = 15)		Expérimentation 6 (n = 15)	
Tâche	TR (ms)	Tâche	TR (ms)
Base	275.9 ± 32.8	Base	294.1 ± 46.8
Sca	255.3 ± 34.4	Sca	269.9 ± 43.3
Asa	276.7 ± 38.5	Msa	289.7 ± 48.3
Aca	243.6 ± 34.8	Mca	266.5 ± 45.7

Temps de réponse (TR) moyens (± SD) en pointage manuel (en ms) après chaque condition expérimentale (Tâche), c'est-à-dire après : Base (visualisation d'un écran noir pendant 10 sec), Sca (soustraction mentale complexe), Asa (addition mentale simple), Aca (addition mentale complexe), Msa (multiplication mentale simple) ainsi que Mca (multiplication mentale complexe). Tous les nombres étaient écrits en chiffres arabes.

Dans chacune des expérimentations 5 et 6, il a été trouvé un effet fixe « Condition » (écran noir et tâches cognitives) statistiquement significatif, ce que laissent entendre les temps de réponse présentés par le Tableau 15 et ce dont rend compte la Figure 32.

Figure 32 – Temps de réponse par condition expérimentale (GE5 et GE6)



Les graphes présentés [« effect plots » selon Fox et Hong (2009)], rendent compte des temps de réponse (TR) moyens ajustés en pointage manuel dans les groupes expérimentaux (GE) 5 et 6. Dans les expérimentations 5 et 6 tous les nombres étaient écrits en chiffres arabes. Dans l'expérimentation 5 (Figure 32.A), on a les TR après : visualisation d'un écran noir (Base), soustraction mentale complexe consistant à ôter un nombre à un chiffre d'un nombre à deux chiffres (Sca), addition mentale simple de deux nombres à un chiffres (Asa), et addition mentale complexe (Aca). Dans l'expérimentation 6 (Figure 32.B), on a les TR après : Base, Sca, multiplication simple (Msa) et multiplication complexe (Mca). Les traits verticaux indiquent un intervalle de confiance de ± 0.95.

Dans l'expérimentation 5, on a : $F(3,70) = 32,77 ; p < 0,001$ [$\chi^2(3) = 98,21 ; p < 0,001$]. Dans l'expérimentation 6, on a : $F(3,70) = 29,94 ; p < 0,001$ [$\chi^2(3) = 89,81 ; p < 0,001$]. Ces résultats

indiquent donc de nouveau l'existence d'une différence statistiquement significative dans l'ensemble des quatre performances considérées (Base, Sca, Asa et Aca pour l'expérimentation 5 et Base, Sca, Msa et Mca pour l'expérimentation 6). Ces résultats ont donc conduit à effectuer des tests post-hoc (*all-pairwise comparisons*) afin de déterminer les différences significatives au sein des quatre de performances motrices de chacune des expérimentations 5 et 6.

Les résultats des tests post-hoc dans le cas de l'expérimentation 5 (additions) sont présentés Tableau 16 (voir aussi Figure 32.A). Les comparaisons multiples ont montré que le temps de réponse était significativement plus court (plus rapide) après la tâche de soustraction mentale complexe (Sca) qu'après la condition visualisation d'un écran noir (condition repère Base) : Sca - Base (Tableau 16). L'addition complexe (Aca) a en outre conduit à un temps de réponse significativement plus court que l'addition simple (Asa) : Aca - Asa (Tableau 16). Il n'a en outre pas été trouvé de différence statistiquement significative entre Asa et Base, alors qu'Aca a conduit à un temps de réponse significativement plus court que la condition Base : Aca - Base (Tableau 16).

Tableau 16 – Comparaisons multiples des temps de réponse dans l'expérimentation 5 (n = 15)

Différences	Estimate (ms)	SE	Z	p
Sca - Base	-20,79	3,72	5,60	< 0,001
Asa - Base	1,36	3,74	0,36	0,98
Aca - Base	-32,50	3,74	-8,68	< 0,001
Asa - Sca	22,15	4,60	4,82	< 0,001
Aca - Sca	-11,72	4,60	-2,55	0,051
Aca - Asa	-33,87	4,66	-7,26	< 0,001

Résultats des comparaisons multiples des temps de réponse (TR) entre Base (TR après visualisation d'un écran noir), Sca (TR après soustraction mentale complexe), Asa (TR après addition mentale simple) et Aca (TR après addition mentale complexe). Tous les nombres étaient écrits en chiffres arabes. Des différences entre les valeurs de deux erreurs standards (SE) dans les Estimate (différences estimées entre TR, en ms) peuvent survenir après la deuxième décimale. Les valeurs ajustées *p* des scores au test Z sont fournies (méthode à une seule étape, $p(Z > |z|)$).

Les résultats des tests pos-hoc relatifs à l'expérimentation 6 (multiplications) sont fournis par le Tableau 17. Ils présentent un panorama en tout point cohérent avec celui des résultats des tests post-hoc de l'expérimentation 5.

Les comparaisons multiples (Tableau 17) ont ainsi avéré un temps de réponse significativement plus court (plus rapide) après la tâche de soustraction mentale complexe (Sca) qu'après la condition visualisation d'un écran noir (condition repère Base), avec : Sca - Base (Tableau 17). La multiplication complexe (Mca) a en outre conduit à un temps de réponse significativement

plus court que la multiplication simple (Msa) : Mca - Msa (Tableau 17). Il n'a pas été trouvé de différence statistiquement significative entre Msa et Base, alors que Mca a conduit à un temps de réponse significativement plus court que la condition Base : Mca - Base (Tableau 17).

Tableau 17 – Comparaisons multiples des temps de réponse dans l'expérimentation 6 (n = 15)

Différences	Estimate (ms)	SE	Z	p
Sca - Base	-23,92	3,65	-6,55	< 0,001
Msa - Base	-3,51	3,63	-0,97	0,76
Mca - Base	-28,72	3,63	-7,90	< 0,001
Msa - Sca	20,40	4,50	4,53	< 0,001
Mca - Sca	-4,80	4,52	-1,06	0,71
Mca - Msa	-25,21	4,46	-5,66	< 0,001

Résultats des comparaisons multiples des temps de réponse (TR) entre Base (TR après visualisation d'un écran noir), Sca (TR après soustraction mentale complexe), Msa (TR après multiplication mentale simple) et Mca (TR après multiplication mentale complexe). Tous les nombres étaient écrits en chiffres arabes. Des différences entre les valeurs de deux erreurs standards (SE) dans les Estimate (différences estimées entre TR, en ms) peuvent survenir après la deuxième décimale. Les valeurs ajustées p des scores au test Z sont fournies (méthode à une seule étape, $p (Z > |z|)$).

En définitive, les résultats des expérimentations 5 et 6 apparaissent très similaires :

- Ils confirment (Série 1) l'effet positif de la soustraction mentale complexe avec nombres écrits en chiffres arabes sur la performance motrice ;
- Ils conduisent à constater que les calculs simples (nombres à un chiffre, écrits en chiffres arabes), en addition (expérimentation 5) comme en multiplication (expérimentation 6), n'ont pas d'effet statistiquement significatif sur le temps de réponse en pointage ;
- Ils indiquent que les calculs complexes (un nombre à un chiffre et un nombre à deux chiffres, écrits en chiffres arabes), en addition (expérimentation 5) et en multiplication (expérimentation 6), favorisent la performance en pointage manuel (temps de réponse significativement plus courts que ceux obtenus après visualisation d'un écran noir).

Les résultats des expérimentations 5 et 6 sont donc tout à la fois cohérents entre eux ainsi qu'avec ceux de la Série 1 concernant la soustraction mentale complexe.

3.2. Effet de la comparaison de quantités sur la performance motrice

Le GE7 a réalisé trois blocs de six pointages manuels. Les premiers pointages de chaque bloc étaient effectués après visualisation d'un écran noir pendant 10 sec et fournissaient des performances repères (Base) pour envisager les performances réalisées suite à une tâche cognitive. Les tâches cognitives étaient les suivantes : soustraction mentale complexe (nombre

à un chiffre ôté d'un nombre à deux chiffres, ces nombres étant écrits en chiffres arabes ; « Sca »), comparaison des quantités relatives à deux ensembles de points simultanément présentés (« Ce ») et comparaison de deux nombres (nombres à un chiffre, en chiffres arabes) présentés simultanément (« Cna »). Les temps de réponses produits sont fournis Tableau 18.

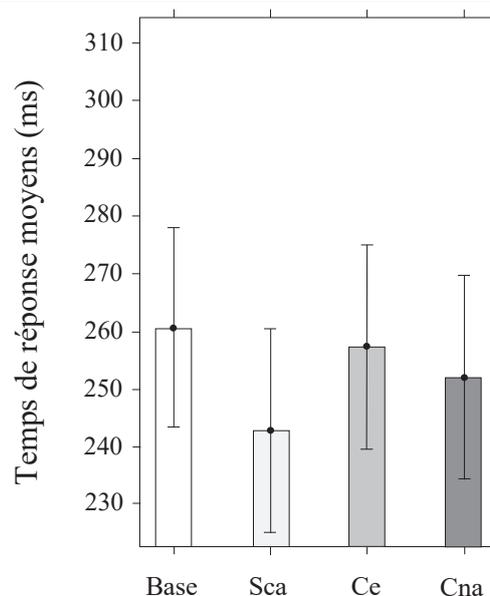
Tableau 18 – Temps de réponse dans l'expérimentation 7

Expérimentation 7 (n = 15)	
Tâche	TR (ms)
Base	260.5 ± 33.8
Sca	242.8 ± 35.5
Ce	257.4 ± 35.5
Cna	252.2 ± 38.7

Temps de réponse moyens (± SD) en pointage manuel (en ms) après chaque condition expérimentale (Tâche), c'est-à-dire après : Base (visualisation d'un écran noir pendant 10 sec), Sca (soustraction mentale complexe), Ce (comparaison des quantités relatives à deux ensembles de points présentés simultanément) et Cna (comparaison de deux nombres présentés simultanément). Tous les nombres utilisés étaient écrits en chiffres arabes.

Il a été trouvé un effet fixe « Condition » (écran noir et tâches cognitives) statistiquement significatif [$F(3,70) = 19,03 ; p < 0,001$ et $\chi^2(3) = 57,10 ; p < 0,001$], ce que laissent entendre les temps de réponse présentés Tableau 18 et ce dont rend aussi compte la Figure 33.

Figure 33 – Temps de réponse par condition expérimentale (expérimentations 7, n = 15)



Le graphe présenté [« effect plots » selon Fox et Hong (2009)], rend compte des temps de réponse (TR) moyens ajustés en pointage dans l'expérimentations 7 (nombres écrits en chiffres arabes), après : visualisation d'un écran noir (Base), soustraction mentale complexe consistant à ôter un nombre à un chiffre d'un nombre à deux chiffres (Sca), comparaison des quantités relatives à deux ensembles de points (Ce) et comparaison de deux nombres (Cna). Les traits verticaux indiquent un intervalle de confiance de ± 0.95.

Les résultats des tests post-hoc dans le cas de l'expérimentation 7 (comparaisons de quantités) sont présentés Tableau 19.

Tableau 19 – Comparaisons multiples des temps de réponse dans l'expérimentation 7 (n = 15)

Différences	Estimate (ms)	SE	Z	p
Sca - Base	-17,78	2,43	-7,31	< 0,001
Ce - Base	-3,07	2,43	-1,26	0,58
Cna - Base	-8,36	2,43	-3,44	0,003
Ce - Sca	14,71	2,98	4,93	< 0,001
Cna - Sca	9,42	2,97	3,17	0,008
Cna - Ce	-5,29	2,97	-1,78	0,28

Résultats des comparaisons multiples des temps de réponse (TR) entre Base (TR après visualisation d'un écran noir), Sca (TR après soustraction mentale complexe), Ce (TR après comparaison des quantités relatives à deux ensembles de points présentés simultanément) et Cna (TR après comparaison de deux nombres présentés simultanément). Tous les nombres étaient écrits en chiffres arabes. Des différences entre les valeurs de deux erreurs standards (SE) dans les Estimates (différences estimées entre TR, en ms) peuvent survenir après la deuxième décimale. Les valeurs ajustées *p* des scores au test Z sont fournies (méthode à une seule étape, $p(Z > |z|)$).

Les résultats des comparaisons multiples confirment en premier lieu un temps de réponse après soustraction mentale complexe (nombres en chiffres arabes ; Sca) plus court que suite à la visualisation d'un écran noir (condition Base) : Sca - Base (Tableau 19). En outre, les résultats n'indiquent pas de différence statistiquement significative entre les temps de réponse après comparaison des quantités relatives à deux ensembles de points (Ce) et suite à la visualisation d'un écran noir (Ce - Base ; Tableau 19). En revanche, les résultats révèlent un temps de réponse significativement plus court après comparaison de deux nombres en chiffres arabes (Cna) et après Base : Cna - Base (Tableau 19). Il est enfin à souligner qu'il a été trouvé un temps de réponse plus court après Sca qu'après Cna : Cna - Sca (Tableau 19).

En définitive, les résultats de cette expérimentation 7 :

- Confirment ceux de la Série 1 et des expérimentations 5 et 6 de la Série 2 concernant un effet positif de la soustraction mentale complexe avec nombres écrits en chiffres arabes sur la performance motrice ;
- Ne font pas apparaître d'effet significatif de la comparaison des quantités relatives à deux ensembles de points sur la performance en pointage ;
- Indiquent un effet positif significatif de la comparaison de nombres en chiffres arabes sur cette performance motrice et montrent que cet effet est inférieur à celui obtenu après la soustraction mentale complexe de nombres écrits en chiffres arabes.

3.3. Synthèse des résultats de la Série 2

La série expérimentale 2 visait principalement à vérifier si les effets positifs, sur la performance motrice, de la soustraction mentale complexe avec chiffres arabes, repérés dans la Série 1 valent dans le cas d'autres tâches arithmétiques. La Série 2 a ainsi pris en compte les effets éventuels sur la performance en pointage manuel de : l'addition mentale simple avec deux nombres à un chiffre et de l'addition mentale complexe avec un nombre à un chiffre et un nombre à deux chiffres (GE5), la multiplication mentale simple et la multiplication mentale complexe (GE6), la comparaison des quantités relatives à deux ensembles de points et la comparaison de nombres (GE7). Compte tenu des résultats de la Série expérimentale 1, tous les nombres utilisés étaient écrits en chiffres arabes dans la Série 2. En outre, dans chacune des expérimentations 5, 6 et 7, le cas de la soustraction mentale complexe avec chiffres arabes a été considéré en tant que contrôle.

Dans chaque expérimentation de la Série 2 (*i.e.* : 5, 6 et 7), les sujets ont réalisé des temps de réponse significativement plus courts (plus rapides) après soustraction mentale complexe avec nombres écrits en chiffres arabes (Sca) qu'après visualisation d'un écran noir (condition repère Base). Ces résultats confirment ainsi ceux de la Série expérimentale 1 dans le cas du pointage manuel (expérimentation 4) ainsi que dans le cas du squat jump vertical (expérimentation 2). Ces résultats confirment aussi ceux obtenus par Rabahi et al. (2013) pour ce qui concerne la performance en squat jump vertical.

Par ailleurs, les résultats des expérimentations 5 et 6 n'ont avéré aucun effet significatif du calcul simple (addition et multiplication) sur le temps de réponse en pointage manuel. En revanche, ces résultats ont avéré une influence significative du calcul complexe (addition et multiplication) sur la performance en pointage manuel, comparativement aux temps de réponse en condition repère Base. Les résultats des expérimentations 5 et 6 sont donc cohérents entre eux.

Les résultats de l'expérimentation 7 indiquent en outre à nouveau le rôle du format numérique dans l'effet d'une tâche arithmétique sur la performance motrice. Ces résultats ont montré que les temps de réponse après comparaison de deux nombres écrits en chiffres arabes sont plus courts qu'après la condition repère Base alors qu'il n'a pas été trouvé d'effet de la comparaison des quantités renvoyant à deux ensembles de points sur le temps de réponse. Dans le prolongement de la Série 1 (nombres écrits en toutes lettres et nombres écrits en chiffres arabes), l'expérimentation 7 (points et chiffres arabes) contribue à nouveau à montrer que le format numérique affecte l'influence des tâches arithmétiques sur la performance motrice. En second

lieu, si les résultats de l'expérimentation 7 montrent un effet positif de la soustraction mentale complexe d'un nombre à un chiffre à un nombre à deux chiffres et de la comparaison de nombres à un seul chiffre (chiffres arabes dans les deux cas), ils montrent aussi que cet effet est plus marqué dans le cas de la soustraction mentale complexe.

PARTIE IV – DISCUSSION GENERALE

PARTIE IV. DISCUSSION GENERALE

Si plusieurs études ont montré l'existence d'un lien entre arithmétique et mouvement, peu d'études se sont intéressées aux effets du traitement numérique ou du calcul sur la performance motrice, à fortiori dans le cas de mouvements à intensité maximale. A notre connaissance, seule une étude (Rabahi et al., 2013) s'y est intéressée en montrant un effet direct de la soustraction mentale complexe sur la performance d'un squat jump vertical à intensité maximale chez de jeunes adultes. Ce résultat, obtenu dans le cadre d'une étude principalement centrée sur l'effet des verbes d'action sur la performance motrice, intégrait la soustraction mentale comme tâche de contrôle et appelait une confirmation ainsi que des prolongements.

A supposer qu'il puisse être confirmé, ce résultat, à lui seul, appelait à déterminer s'il tient au traitement numérique requis par la tâche de soustraction (*e.g.* : lecture des nombres) et/ou à l'application de procédures requises par le calcul (*e.g.* : règles opératoires). Ce, d'autant que dans le cas de mouvements de précision sans contrainte d'intensité maximale, Andres et al. (2008), d'une part, Rugani et al. (2017), d'autre part, ont respectivement montré un effet des quantités numériques visualisées (nombres à un chiffre) sur la cinématique d'une saisie à deux doigts et sur celle de la frappe d'une balle avec un doigt. Par ailleurs, l'étude de Rabahi et al. (2013) portait exclusivement sur des nombres écrits en chiffres arabes, alors que divers modèles de la cognition numérique (*e.g.* : Dehaene, 1992) ont suggéré que les mécanismes cérébraux impliqués dans le traitement numérique et/ou le calcul sont susceptibles de différer selon le format numérique. Aussi s'agissait-il d'envisager dans quelle mesure ce format peut affecter un éventuel effet des tâches arithmétiques sur la performance motrice. La difficulté d'une tâche arithmétique est par ailleurs de nature à influencer les stratégies de résolution (Thevenot et al., 2010). Or, les stratégies procédurales de résolution de tâches arithmétiques sont de nature à susciter une activation accrue des régions cérébrales motrices, comparativement aux stratégies de recouvrement de résultats mémorisés (Tschentscher & Hauk, 2014). Aussi a-t-il semblé judicieux d'envisager l'impact de la difficulté d'une tâche arithmétique sur la performance motrice. Enfin, il était logique d'ouvrir l'éventail des tâches arithmétiques et motrices au-delà, respectivement, de la soustraction mentale et du squat jump vertical.

Deux Séries expérimentales (1 et 2) ont dès lors été mises en place pour étudier les effets de tâches arithmétiques (calculs et comparaison de quantités) sur la performance motrice en prenant en compte ces éléments.

1. Mise en perspective des résultats

D'une manière générale, les résultats des Séries 1 et 2 montrent qu'une diversité de tâches arithmétiques, de calcul (soustraction, addition, multiplication) et de comparaison de quantités (comparaison de nombres), est de nature à favoriser la performance d'une diversité de tâches motrices requérant un effort à haute intensité (squat jump vertical et pointage manuel, en l'occurrence).

Cette influence positive est apparue conditionnée par le format numérique. Elle a en effet été repérée, en Série 1, dans le cas de la soustraction complexe avec nombres écrits en chiffres arabes mais pas dans celui de la soustraction complexe avec nombres écrits en toutes lettres. Dans la Série 2, elle a en outre été repérée dans le cas de la comparaison de nombres en chiffres arabes mais pas dans celui de la comparaison des quantités relatives à des ensembles de points. D'une manière générale, toutes les tâches arithmétiques des Séries 1 et 2 pour lesquelles un effet positif sur la performance motrice a été trouvé portaient sur des nombres présentés en chiffres arabes (soustraction, addition et multiplication complexes, comparaison de nombres).

Les résultats concourent en outre à suggérer que cet effet positif sur la performance motrice est fondamentalement lié à l'activité de résolution requise par les tâches arithmétiques. Les résultats de la Série 1 ont ainsi montré que si la soustraction complexe peut favoriser une performance motrice subséquente, il en va autrement de la seule lecture de nombres impliqués dans le calcul correspondant. Dans la Série 2, les calculs les plus complexes (*i.e.* : soustraction, addition et multiplication avec un nombre à un chiffre et un nombre à deux chiffres) se sont avérés favoriser la performance motrice alors que cela n'a pas été le cas des calculs les plus simples (*i.e.* : additions et multiplications avec deux nombres à un chiffre).

Deux résultats peuvent en définitive sembler ponctuellement discordants avec ce panorama par ailleurs consistant. D'une part, la lecture d'un nombre écrit en toutes lettres a été suivie d'une amélioration modérée de la performance motrice dans le cas du saut vertical (gain de 0,53 cm par rapport aux sauts repères, pour des sauts de moins de 30 cm en moyenne) mais pas dans le cas du pointage manuel (Série 1). D'autre part, la comparaison de nombres à un seul chiffre

s'est avérée favoriser la performance motrice en pointage manuel à la différence des calculs avec des nombres à un seul chiffre (Série 2).

2. Le format numérique en tant que condition

Trois formats distincts ont été utilisés pour présenter les nombres et/ou les quantités associées dans les expérimentations des Séries 1 et 2 : nombres écrits en toutes lettres, nombres écrits en chiffres arabes, quantités renvoyant à des ensembles de points.

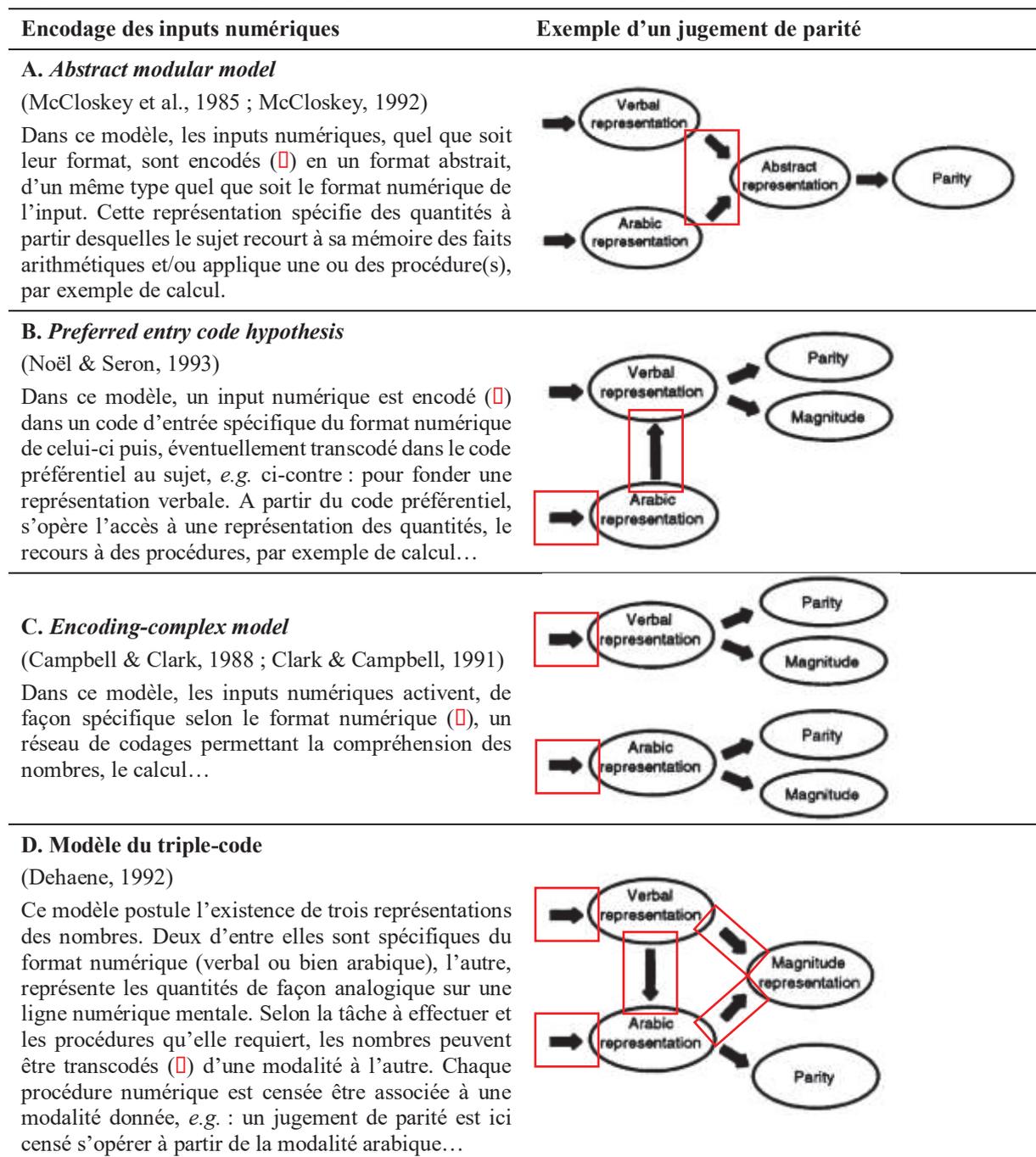
Dans la Série 1, il n'a pas été trouvé d'effet significatif de la soustraction avec nombres écrits en toutes lettres (*i.e.* : « *seventeen - eight* », « *sixteen - nine* » et « *twelve - four* ») ni sur la performance en squat jump vertical (expérimentation 1), ni sur la performance en pointage manuel (expérimentation 3). En revanche, la soustraction mentale s'est avérée favoriser la performance en saut vertical (expérimentation 2) et en pointage manuel (expérimentation 4) lorsque les mêmes opérations étaient présentées avec des nombres en chiffres arabes (*i.e.* : « 17 - 8 », « 16 - 9 » et « 12 - 4 »). Cet effet de la soustraction mentale avec nombres écrits en chiffres arabes a en outre été confirmé dans les expérimentations 5, 6 et 7 de la Série 2. Dans la Série 2, centrée sur le pointage manuel, il n'a pas été trouvé d'effet significatif de la comparaison des quantités renvoyant à des ensembles de points sur la performance motrice. Ce, alors que la comparaison des mêmes quantités, représentées en chiffres arabes (*i.e.* : « 8 » et « 6 », « 5 » et « 8 », « 4 » et « 7 ») s'est avérée favoriser significativement la performance motrice. D'une manière générale, tous les effets positifs significatifs d'un calcul ou d'une comparaison des quantités sur la performance motrice trouvés dans les Séries 1 (expérimentations 2 et 4) et 2 (expérimentations 5, 6 et 7) renvoient à des tâches en lesquelles les nombres étaient écrits en chiffres arabes.

Sous l'angle du format numérique, il est envisageable que les résultats rapportés aient été en partie favorisés par une habitude des sujets à effectuer des tâches arithmétiques avec des nombres écrits en chiffres arabes. Une moindre habitude à effectuer des calculs avec des nombres écrits en toutes lettres et des tâches de comparaison de quantités renvoyant à des ensembles de points auraient ainsi pu limiter l'effet des tâches arithmétiques correspondantes sur la performance motrice. Cependant, au-delà de cette possibilité, il convient de constater que le panorama des résultats apparaît cohérent lorsqu'on le confronte aux principaux modèles de la cognition numérique, ce qui conduit à émettre d'autres hypothèses explicatives.

2.1. L'hypothèse de l'encodage

Les principaux modèles de la cognition numérique, en dépit de leurs divergences plus ou moins fortes, ont en commun d'envisager les nombres et/ou quantités en tant qu'inputs appelant à un encodage permettant d'agir mentalement sur ceux-ci. On le perçoit en confrontant les représentations synthétiques de ces modèles proposées par Dehaene et al. (1993) dans le cas d'un jugement de parité (Figure 34).

Figure 34 – L'encodage des inputs dans les modèles de la cognition numérique



Les résultats des Séries 1 et 2 suggèrent qu'une éventuelle relation entre tâches arithmétiques et performance motrice est conditionnée par le format numérique dans lequel sont présentés les nombres impliqués. Or, les modèles de la cognition numérique s'accordent à considérer qu'un nombre est encodé à partir du format numérique selon lequel il est présenté, à des fins de compréhension, de quantification, de recours à une mémoire des faits arithmétiques ou encore à des procédures de calcul (Figure 34 : □), etc. Il est ainsi envisageable que l'impact du format numérique, sur la relation entre une tâche arithmétique donnée et une performance motrice, tienne pour partie à des mécanismes cérébraux impliqués dans l'encodage des nombres.

Au regard du modèle de McCloskey (Figure 34.A), cet impact du format numérique pourrait au demeurant tenir exclusivement à l'encodage. Dans ce modèle, en effet, les nombres, quelle que soit la modalité initialement utilisée pour les présenter, sont encodés en un format abstrait unique permettant la manipulation mentale des quantités correspondantes. Envisagé sous cet angle, l'encodage des nombres en chiffres arabes renverrait à des mécanismes distinctifs (en regard de ceux impliqués dans le cas des nombres écrits en toutes lettres et des quantités associées à des points) qui rendraient possible une influence des tâches arithmétiques sur la performance motrice. Cette possibilité est par ailleurs compatible avec les modèles de Noël et Seron (Figure 34.B), Campbell (Figure 34.C) et Dehaene (Figure 34.D). Dans ces trois modèles, il existe en effet des mécanismes d'encodage spécifiques aux nombres écrits en chiffres arabes.

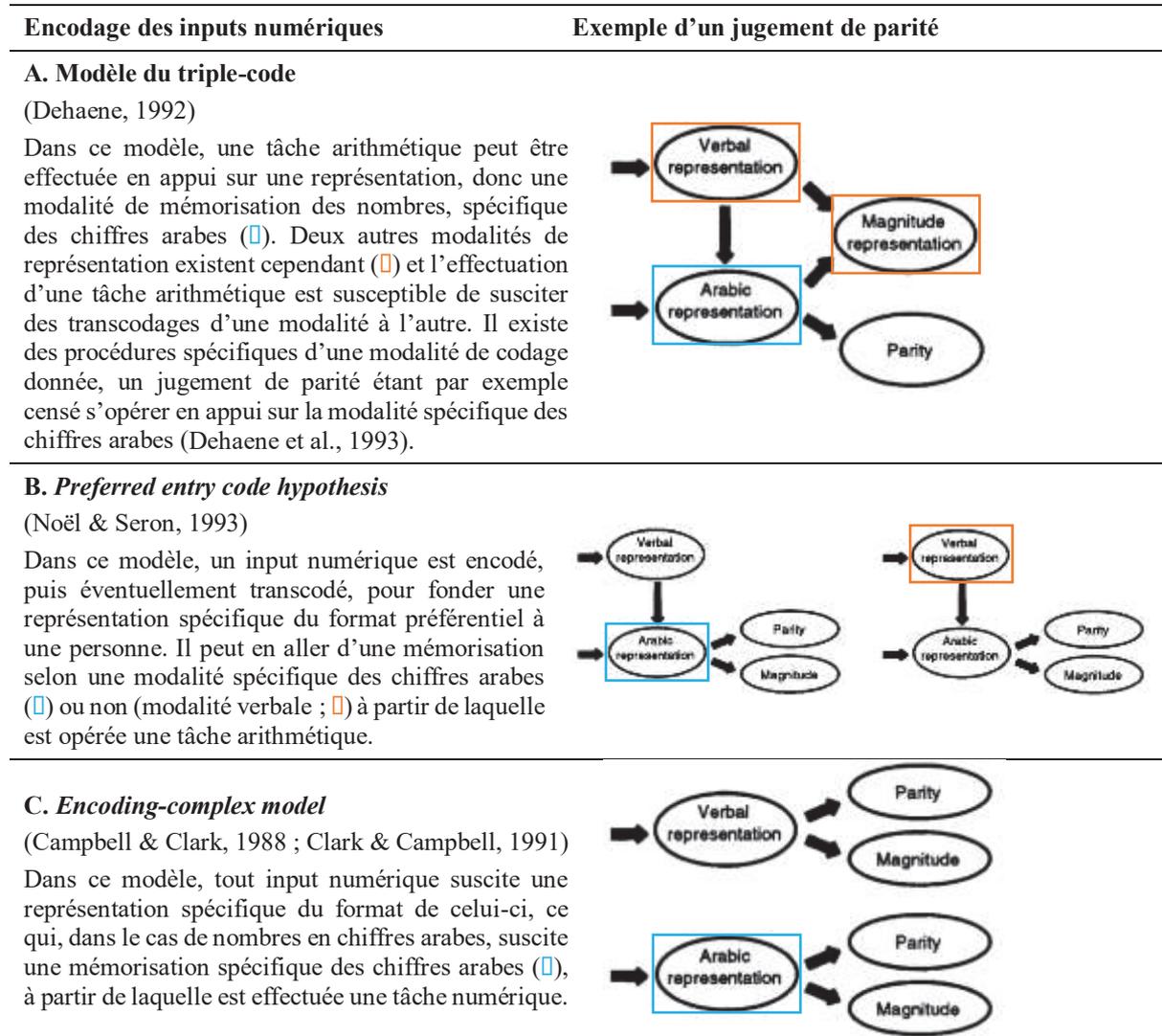
Il existe en outre, dans le modèle de Noël et Seron, des mécanismes de transcodage spécifiques de la conversion d'une représentation relative aux chiffres arabes en une représentation verbale si celle-là est préférentielle au sujet. Il existe également, dans le modèle de Dehaene, des mécanismes de transcodage à partir d'une représentation spécifique d'un input en chiffres arabes.

En regard des modèles de la cognition numérique considérés, il est ainsi envisageable que la mobilisation de mécanismes d'encodage et/ou de transcodage, spécifiques au cas des chiffres arabes, vienne conditionner l'influence d'une tâche arithmétique sur une performance motrice subséquente. Cette possibilité semble la seule explication logique à la lumière du modèle de McCloskey (Figure 34.A), puisque les nombres sont censés être encodés pour susciter un type unique de représentation abstraite. En revanche, les modèles respectifs de Noël et Seron (Figure 34.B), de Campbell (Figure 34.C) et de Dehaene (Figure 34.D) suggèrent aussi l'existence de représentations spécifiques d'un format numérique donné, lesquelles serviraient de base à la mémoire de travail durant la réalisation de la tâche arithmétique correspondante. Cela conduit donc à envisager une explication complémentaire.

2.2. L'hypothèse de mécanismes de mémorisation spécifiques

A la différence du modèle de McCloskey, les modèles de la cognition numérique de Noël et Seron, de Campbell et de Dehaene postulent que les tâches arithmétiques sont effectuées en appui sur une représentation spécifique d'un format numérique donné. Cela peut suggérer la mobilisation d'éventuels mécanismes de mémorisation spécifiques d'un format numérique donné, durant l'effectuation d'une tâche arithmétique (Myers & Szücz, 2015). Encore convient-il d'affiner l'analyse à la lumière des modèles de la cognition numérique concernés (Figure 35).

Figure 35 – Modèles de la cognition numérique et mémoire(s) durant les tâches arithmétiques



Le modèle de Dehaene (Figure 35.A) suppose l'existence de trois modalités de représentation des input numériques, dont l'une est spécifique des chiffres arabes. Il pourrait ainsi en aller d'une modalité spécifique des chiffres arabes en mémoire de travail. La mobilisation de cette modalité spécifique des chiffres arabes est cependant fonction ici de la procédure numérique à

mobiliser dans la tâche arithmétique. Si cette modalité-là est supposée être mobilisée lors d'un jugement de parité (Dehaene et al., 1993), la modalité (abstraite) relative à la représentation des quantités est censée l'être dans une tâche arithmétique requérant une compréhension du sens des nombres (Myers & Szücs, 2015). Aussi, si le modèle de Dehaene est compatible avec l'idée d'une mémorisation des nombres spécifique des chiffres arabes, celui-ci n'implique pas forcément le recours à cette modalité dans les tâches de calcul et de comparaison de quantités, avec nombres écrits en chiffres arabes, des Séries expérimentales 1 et 2 de l'étude ici présentée.

Dans la même logique, si le modèle de Noël et Seron (Figure 35.B) suppose l'existence d'une représentation spécifique des chiffres arabes, donc d'une mémorisation spécifique de ce format, ce modèle n'implique en rien le recours à cette modalité, y compris dans le cas d'une tâche arithmétique avec nombres présentés en chiffres arabes. La modalité adoptée pour effectuer une tâche arithmétique est en effet censée ici dépendre des préférences du sujet, ce qui peut induire, pour une tâche avec chiffres arabes, un transcodage et une représentation de type verbal.

Le modèle de Campbell (Figure 35.C) présente en revanche la caractéristique de tout à la fois supposer une modalité de représentation des nombres spécifique des chiffres arabes et un recours à cette représentation pour effectuer la tâche arithmétique impliquant ces nombres. Il suggère ainsi le recours à une mémorisation spécifique des chiffres arabes durant l'exécution de cette tâche arithmétique.

Or, les résultats expérimentaux de Myers et Szücs (2015) vont dans le sens de cette possibilité. Dans cette étude, un premier stimulus numérique (S1) a été présenté au centre d'un écran. Après disparition de ce stimulus de l'écran, deux stimuli numériques, respectivement au centre (S2) et à droite de l'écran (S3), ont été présentés simultanément. Les sujets devaient déterminer si le stimulus à droite de l'écran (S3) correspondait ou non à la somme exacte des deux stimuli successivement présentés au centre de l'écran ($S1 + S2$). Les sujets devaient donc conserver et récupérer S1 en mémoire de travail, pour l'additionner à S2, après avoir perçu S2 et lui avoir donné sens, afin de déterminer si S3 était égal à $S1 + S2$. Différentes configurations des stimuli ont été envisagées au regard du format numérique (format arabe, format verbal, points). Or, l'examen des temps de réponse effectué par Myers et Szücs (2015) s'est avéré compatible avec l'hypothèse d'une représentation en mémoire dépendante du format numérique.

Il est en outre à noter que les résultats de Kracji, Lengyel et Kojouharova (2018) ont montré que la comparaison de nombres en chiffres arabes n'est pas effectuée à partir du même type de représentation mentale que la comparaison d'ensembles de points. Cette étude a ainsi produit des résultats congruents avec les prédictions (notamment en termes de temps de réponse et de

taux d'erreur) associées à l'approximation de quantités (*Approximate Number System*, e.g. : Dietrich et al., 2016) seulement dans le cas de la comparaison d'ensembles de points.

2.3. Une condition non suffisante

Les résultats des Séries expérimentales 1 et 2 ont suggéré que l'influence positive d'une tâche arithmétique sur une performance motrice à intensité maximale est conditionnée par une présentation des nombres impliqués en chiffres arabes. Ces résultats peuvent tenir en partie à ce que les sujets expérimentaux étaient plus habitués à effectuer des tâches de calcul et de comparaisons de quantités avec des nombre en chiffres arabes qu'avec des nombres écrits en toutes lettres ou des ensembles de points. Dans cette optique, le manque d'habitude quant à ces deux derniers formats aurait pu entraver un effet éventuel de la tâche arithmétique.

Pour autant, les principaux modèles de la cognition numérique offrent une piste explicative complémentaire, voire alternative, crédible lorsqu'on les envisage dans le cadre de la réalisation d'une tâche arithmétique. En premier lieu, ces modèles s'accordent à supposer l'existence de mécanismes d'encodage spécifiques du format numérique. En second lieu, le modèle de Campbell suppose des mécanismes de mémorisation spécifiques du format des inputs numériques et est étayé sur ce point par les résultats de Myers et Szücs (2015). Des mécanismes d'encodage et/ou de mémorisation spécifiques pourraient ainsi expliquer que la performance motrice ait été favorisée, dans les Séries 1 et 2, exclusivement après effectuation de tâches arithmétiques avec nombres écrits en chiffres arabes.

Si on dispose ici d'éléments pouvant expliquer que l'effet d'une tâche arithmétique sur la performance motrice est conditionné par une présentation des nombres en chiffres arabes, cette condition ne peut être considérée comme suffisante. Les résultats de la Série 2 ont en effet montré que l'influence d'un calcul (soustraction, addition, multiplication) avec nombres en chiffres arabes sur la performance motrice dépend de la difficulté du calcul à effectuer, les calculs les plus complexes ayant favorisé significativement celle-là, les calculs les plus simples ne l'ayant pas impactée. Cela appelle dès lors un complément d'explication.

3. La manipulation mentale de quantités en tant qu'élément clé

Dans les Séries 1 et 2, chaque effet positif et statistiquement significatif d'une tâche arithmétique (*i.e.* : soustraction, addition, multiplication et comparaison de nombres) sur la

performance motrice a été obtenu avec des nombres écrits en chiffre arabe. Il n'a pas été trouvé d'effet des calculs ou comparaisons de quantités à partir d'autres formats numériques (nombres écrits en toutes lettres, ensemble de points) sur la performance motrice. Ces résultats suggèrent donc que le format numérique en chiffres arabes conditionne un éventuel effet des calculs et de la comparaison de quantités sur la performance motrice. Cela est en outre apparu cohérent en regard de divers modèles de la cognition numérique diffusés dans la littérature. Les Séries expérimentales 1 et 2 ont cependant fourni des résultats qui appellent à reconsidérer cette analyse.

Dans les Séries 1 et 2, il a ainsi été repéré un effet positif et significatif sur la performance motrice de chaque calcul complexe avec chiffres arabes (un nombre à un chiffre et un nombre à deux chiffres) alors qu'un tel effet n'a pas été trouvé dans le cas des calculs simples avec chiffres arabes (deux nombres à un seul chiffre). Dans la Série 2, la comparaison de nombres à un chiffre, écrits en chiffres arabes, s'est cependant avérée favoriser significativement la performance motrice. Enfin, dans la Série 1, il a été repéré un effet positif et significatif, quoique modéré, de la lecture d'un nombre écrit en toutes lettres sur la hauteur de saut en squat jump vertical. Cet ensemble, en apparence disparate, de résultats appelle donc un prolongement aux analyses ci-avant présentées.

3.1. Lecture de nombres et performance motrice

Dans la mesure où toute tâche arithmétique requiert, outre le recours à des procédures de résolution, une activité de traitement numérique (Arsalidou & Taylor, 2011 ; Arsalidou et al., 2018), la Série 1 a visé à déterminer l'influence respective de la lecture de nombres et du recours à des stratégies de résolution en soustraction mentale (complexe) sur la performance motrice en squat jump vertical et en pointage manuel.

Les résultats n'ont montré aucun effet de la lecture de nombres en chiffres arabes sur la performance motrice, tant dans le cas du saut vertical que dans celui du pointage manuel. Aucun effet de la lecture de nombres écrits en toutes lettres sur la performance en pointage manuel n'a en outre été trouvé. En revanche, un effet positif statistiquement significatif de la lecture de nombres écrits en toutes lettres sur la performance en squat jump vertical a été trouvé. Cet effet peut être qualifié de modéré, *i.e.* : gain de performance \pm SE de $0,53 \pm 0,19$ cm par rapport à la condition repère (saut après visualisation d'un écran noir), alors que la performance moyenne en condition repère \pm SD était de $28,42 \pm 1,95$ cm (gain de performance inférieur à 2 %). Si cet

effet peut sembler un « cas-limite » dans l'ensemble des résultats de la Série 1, il n'en demeure pas moins significatif et la cohérence d'ensemble des résultats ainsi obtenu quant à la lecture de nombres est à questionner.

Une étude de Tschentscher et al. (2012) a de fait montré une activation fonctionnelle au niveau du cortex prémoteur significativement accrue durant la visualisation de nombres, écrits en chiffres arabes ainsi qu'en toutes lettres. Il a de plus été trouvé que cette activation fonctionnelle accrue reflète les habitudes de comptage sur les doigts des sujets. Ainsi, avec des nombres de un à cinq, cette activation accrue a été trouvée dans l'hémisphère controlatéral à la main que les sujets auraient préférentiellement choisie s'ils avaient eu à démarrer le comptage des nombres sur leurs doigts. Des études comportementales ont en outre montré un lien entre génération aléatoire verbale de nombres, ou encore écoute de nombres, et mouvement (Hartman et al., 2012 ; Loetscher et al., 2008 ; Winter & Matlock, 2013). D'autres études ont montré que les quantités associées à des nombres visualisés, écrits en chiffres arabes, influent sur la cinématique d'une saisie à deux doigts (Andres et al., 2008) ainsi que sur la cinématique d'un index lors de l'effectuation d'un tir de précision avec une petite balle (Rugani et al., 2017). Il convient de noter, en contrepoint, que Rugani et al. (2017) n'ont pas trouvé d'effet de la visualisation de quantités associées à des points sur la cinématique d'un tel tir de précision.

On dispose en tout état de cause d'un ensemble de résultats suggérant un lien effectif entre traitement numérique et mouvement, de nature à valoir à minima dans le cas des nombres écrits en chiffres arabes et des nombres écrits en toutes lettres ; ce, en particulier dans le cas de mouvements manuels. Un tel panorama contraste ainsi avec les résultats relatifs à la lecture de nombres obtenus dans la Série 1. Il convient cependant de souligner que les études rapportées (Andres et al., 2008 ; Hartman et al., 2012 ; Loetscher et al., 2008 ; Rugani et al., 2017 ; Winter & Matlock, 2013) concernent systématiquement des mouvements sans contrainte d'intensité maximale (*e.g.* : saisie, tir de précision). La nécessité de production de sauts et de mouvements de pointage à intensité maximale dans la présente étude est ainsi de nature à expliquer que la lecture de nombres n'ait guère influé sur la performance motrice. Les résultats de la Série 1 relatifs à la lecture de nombres indiquent en tout état de cause que celle-là a peu, ou n'a pas, d'effet significatif sur la performance d'un mouvement réalisé à intensité maximale.

Ces résultats suggèrent de ce fait que les effets, observés dans les Séries 1 et 2, de tâches arithmétiques avec chiffres arabes sur la performance motrice sont liés à l'activité requise pour résoudre ces tâches, plutôt qu'au simple traitement numérique qu'elles impliquent.

3.2. Difficulté des tâches arithmétiques avec chiffres arabes et performance motrice

Si les résultats des Séries 1 et 2 suggèrent que l'activité de résolution requise par une tâche arithmétique avec chiffres arabes est susceptible de favoriser la performance motrice, force est de constater qu'une telle influence n'a pas été systématiquement trouvée.

Dans le cas des tâches de calcul mental (soustraction, addition et multiplication ; Séries 1 et 2), elle a été trouvée de façon systématique lorsque les calculs impliquaient un nombre à un chiffre et un nombre à deux chiffres. En outre une telle influence n'a en aucun cas été trouvée lorsque les calculs portaient sur deux nombres à un seul chiffre (addition et multiplication ; Série 2). Pour un type de calcul donné, les tâches de calcul impliquant un nombre à un chiffre et un nombre à deux chiffres peuvent être considérées comme plus difficiles que celles impliquant deux nombres à un seul chiffre (*e.g.* : Thevenot et al., 2010). C'est en ce sens que, dans la présente étude, les premières ont été qualifiées de complexes, en regard des secondes qui ont été qualifiées de simples. Sous l'angle de la difficulté de la tâche, il est envisageable que les résultats des Séries 1 et 2 soient en partie liés à ce que les tâches de calcul complexe aient challengé les sujets de façon optimale, à la différence de la lecture de nombres ou des calculs simples. Dans les Séries 1 et 2, les calculs ici qualifiés de complexes (*e.g.* : $12 - 4$) peuvent être considérés de difficulté intermédiaire, entre facile (*e.g.* : $4 - 2$) et très difficile (*e.g.* : $41 - 27$), selon Thevenot et al. (2010). Les calculs complexes effectués dans les Séries 1 et 2 par les sujets, étudiants en Licence, ont ainsi pu susciter chez eux un sentiment d'accomplissement, susceptible de favoriser leur contrôle attentionnel (Derakshan & Eysenck, 2009), ce qui aurait pu impacter favorablement la réalisation de la tâche motrice subséquente.

Il convient cependant de souligner que les résultats des Séries 1 et 2 relatifs aux calculs simples et complexes sont également cohérents lorsqu'on les confronte aux études prenant en compte la difficulté des tâches de calcul, ce qui suggère de nouvelles hypothèses explicatives.

En premier lieu, les résultats de la Série 1 ont confirmé ceux de Rabahi et al. (2013) quant à l'influence positive de la soustraction mentale complexe avec chiffres arabes sur la performance d'un squat jump vertical. En second lieu, les résultats des Séries 1 et 2 ont montré que cette influence vaut, au-delà du seul cas du saut vertical à intensité maximale, dans celui d'un pointage manuel à vitesse maximale. Or, selon la difficulté du calcul à effectuer, la résolution d'une soustraction est susceptible de favoriser le recours à des résultats mémorisés en amont de la tâche (*e.g.* : $4 - 2 = 2$) ou bien le recours à des procédures de calcul effectif (Thevenot et al., 2010). Il est ainsi respectivement question, d'une part, de stratégies de recouvrement (en mémoire) de résultats, d'autre part, de stratégies procédurales (*e.g.* : Tschentscher & Hauk,

2014), les premières étant favorisées par des calculs simples (*e.g.* : $5 - 3$), les secondes, par des calculs plus difficiles (Thevenot et al., 2010). Dans les Séries 1 et 2, il est ainsi concevable que l'effet trouvé de la soustraction complexe (*e.g.* : $17 - 8$) sur la performance motrice soit lié à des stratégies procédurales, *i.e.* : à des mécanismes en jeu dans un calcul effectif, même s'il peut exister des différences interindividuelles pour un calcul donné (Tschentscher & Hauk, 2014). Cela est cohérent avec les résultats de la Série 2 montrant, d'une part, une absence d'effet des calculs (addition et multiplication) les plus simples sur la performance motrice et un effet positif significatif des calculs les plus complexes sur la performance motrice (par rapport à la condition repère, donc par rapport à la performance motrice après visualisation d'un écran noir).

Ces analyses appellent cependant à revenir sur le cas de la comparaison de nombres écrits en chiffres arabes (Série 2). Cette tâche arithmétique présente en effet la double caractéristique de s'être avérée favoriser la performance motrice de façon significative tout en n'impliquant que des paires de nombres à un seul chiffre. Or, les tâches de calcul (simple) de la Série 2 qui n'impliquaient que des nombres à un chiffre se sont avérées ne pas influencer sur la performance motrice : les calculs des Séries 1 et 2 qui se sont avérés favoriser la performance motrice impliquaient un nombre à un chiffre et un nombre à deux chiffres. Les tâches de calcul et de comparaison ici considérées présentent cependant une différence de nature. Il est probable que les sujets mémorisent, via leur expérience, leur éducation scolaire, des résultats de calculs avec deux nombres à un chiffre, notamment en apprenant, à l'école, des tables d'addition ou de multiplication ou en étant confrontés de façon réitérée aux résultats de soustractions simples. En revanche, la tâche de comparaison de nombres proposée dans la Série 2 requerrait une activité de détermination d'une relation mathématique entre deux quantités. Il s'agissait d'identifier les deux nombres présentés à l'écran et de déterminer si le plus grand était celui de gauche ou de droite, ce qui appelait certes à connaître l'ordre des nombres mais sans que le recours à cette connaissance ne puisse suffire à une résolution. Par ailleurs, l'activité effective de comparaison était ici relativement simple (nombres à un chiffre), ce qui peut expliquer que dans l'expérimentation correspondante (expérimentation 7), la soustraction mentale complexe (un nombre à un chiffre ôté d'un nombre à deux chiffres) ait conduit à une performance meilleure (temps de réaction plus court en pointage) que la comparaison de nombres.

3.3. Manipulation mentale de quantités et question des processus sous-jacents

Les résultats des séries expérimentales 1 et 2 présentent en définitive un panorama cohérent au regard des modèles de la cognition numérique comme au regard de travaux prenant

en compte la difficulté de la tâche. Ils concourent à suggérer que l'influence d'une tâche arithmétique, de calcul comme de comparaison, sur la performance motrice est conditionnée par la présentation en chiffres arabes des nombres impliqués. De ce point de vue, cette influence pourrait tenir à des mécanismes d'encodage et/ou de mémorisation spécifiques des chiffres arabes. Les résultats des Séries 1 et 2 montrent cependant que le format relatif aux chiffres arabes est une condition non suffisante. S'il est envisageable qu'un lien existe entre traitement numérique et processus cérébraux impliqués dans la motricité, qui pourrait être indépendant du format numérique, ce lien est apparu peu opérant au plan de la performance d'un mouvement complexe à haute intensité. En outre, les calculs simples avec chiffres arabes, de nature à favoriser des stratégies de recouvrement de faits arithmétiques mémorisés, se sont révélés ne pas influencer sur la performance d'un tel mouvement. En revanche, cette performance s'est avérée favorisée par les tâches de calcul et de comparaison de quantités, avec nombres écrits en chiffres arabes, de nature à favoriser le recours à des stratégies procédurales (activité effective de calcul ou de détermination d'une relation mathématique entre deux quantités).

Les résultats des Séries 1 et 2 montrent ainsi l'influence du calcul mental (soustraction, addition et multiplication) et de la comparaison de nombres, dans le cas de nombres écrits en chiffres arabes, sur la performance d'un mouvement à haute intensité. Ces résultats ont aussi suggéré que cette influence tient au recours à des stratégies procédurales, donc à une activité effective de calcul ou de comparaison de quantités, plutôt qu'au simple traitement numérique (lecture des nombres) ou au recours à une mémoire des faits arithmétiques.

Cette influence serait donc liée à une activité effective de manipulation mentale de quantités renvoyant à des nombres en chiffres arabes. Si l'activité correspondante peut favoriser le contrôle attentionnel via l'état émotionnel suscité, elle est aussi susceptible de mobiliser des mécanismes d'encodage et/ou de mémorisation (représentation) spécifiques aux chiffres arabes favorisant la performance motrice, comme le suggère l'analyse de différents modèles de la cognition numérique.

Cette activité arithmétique est par ailleurs susceptible de mobiliser une représentation spatiale des nombres (Dehaene, 1992 ; Myers & Szűcs, 2015) impactant des mécanismes mobilisés dans le contrôle de la direction du mouvement (*e.g.* : Anelli et al., 2014 ; Wiemers et al., 2014). Encore peut-il en aller d'une éventuelle implication accrue de régions motrices du cerveau (*e.g.* : Tschentscher & Hauk, 2014). Aussi ces éventualités seront-elles examinées ci-après.

4. La question de l'attention et du contrôle directionnel du mouvement

Si on considère que les tâches des Séries 1 et 2 favorisant une manipulation mentale de quantités ont placé les sujets dans des conditions influençant positivement la performance d'un mouvement subséquent à haute intensité, se pose la question des mécanismes impliqués. De telles tâches arithmétiques ont pu favoriser le contrôle attentionnel des sujets et donc, l'attention à des éléments pertinents pour réaliser, à la suite de celles-là, un squat jump vertical ou un pointage manuel. La trajectoire du mouvement est en tout état de cause un élément important parmi ces éléments-ci car elle détermine en grande partie le rendement énergétique (mécanique) du mouvement. Dans le cas du squat jump vertical, il s'agit, idéalement, d'une trajectoire du centre de masse verticale pendant la phase de poussée du saut (jamais réalisée à la perfection car la poussée combine rotation des segments et translation du centre de masse du sujet, *e.g.* : Fargier et al., 2016). Dans le cas du pointage manuel, il s'agit, idéalement, d'une trajectoire de la main dans le plan horizontal comprenant les deux boutons du dispositif qui matérialisent les points de départ et d'arrivée du mouvement. Or, plusieurs études ont suggéré l'existence d'un lien entre représentation mentale des nombres dans certaines tâches arithmétiques et contrôle directionnel d'un mouvement vertical ou horizontal.

4.1. Représentation spatiale des nombres et mouvement

Dans le prolongement des travaux de Moyer et Landauer (1967) et de Restle (1970), l'hypothèse d'une représentation mentale des grandeurs numériques en tant qu'ordonnées sur une ligne (*mental number line*) a été émise. Plusieurs études ont concouru à valider l'existence d'une ligne numérique mentale horizontalement orientée (de gauche à droite dans les cultures occidentales ou occidentalisées) avec notamment la mise en évidence de l'effet SNARC (*Spatial Numerical Association of Response Codes*), repéré par Dehaene et al. (1993) dans le cas de nombres à un chiffre et également validé par la suite dans le cas de nombres à deux chiffres (Zhou et al., 2008).

Des études ayant montré que la perception des nombres influe sur l'attention spatiale des sujets (*e.g.* : Fischer et al., 2003), d'autres études se sont centrées sur l'influence de mouvements concomitants à la production aléatoire (verbale) de nombres. Ces travaux ont repéré que la direction du mouvement influe sur cette production, un mouvement actif de la tête vers la gauche favorisant par exemple la production de plus petits nombres qu'un mouvement vers la droite dans le cas de sujets occidentaux (*e.g.* : Loetscher et al., 2008). Les mêmes phénomènes

ont aussi été repérés dans le cas d'un déplacement passif du corps dans sa globalité (Hartman et al., 2012). Des études ont également avéré le même type d'effets dans le cas de mouvements verticalement orientés, un mouvement actif de la tête vers le bas favorisant la production de nombres plus petits que ceux produits lors d'un mouvement de la tête vers le haut (Winter & Matlock, 2013), un déplacement passif du corps vers le bas favorisant aussi la production de nombres plus petits que ceux produits lors d'un déplacement vers le haut (Hartman et al., 2012).

Il a également été suggéré que l'activation d'une ligne numérique mentale est de nature à susciter des changements de focus attentionnel durant un calcul, respectivement dirigés vers la droite et la gauche (dans l'hypothèse du recours à une ligne numérique horizontale), durant l'addition et la soustraction mentales, dans une culture occidentale ou occidentalisée (*e.g.* : Knops et al., 2009). Plusieurs études ont produit des résultats cohérents avec cette hypothèse, notamment en montrant que la direction d'un mouvement horizontal du bras, comme celle d'un mouvement vertical du bras, interfère avec la performance concomitante d'additions et de soustractions mentales (Wiemers et al., 2014). Il a également été montré qu'un déplacement passif du corps (élevateur) vertical interfère avec la performance concomitante d'additions et de soustractions (Lugli et al., 2013). Il a aussi été montré qu'une marche vers l'avant et la droite favorise la performance d'additions mentales (Anelli et al., 2014).

Dans chacun des cas ci-dessus cités, la performance en calcul s'est trouvée négativement impactée par un mouvement effectué dans un sens opposé à celui des changements de focus attentionnels supposés être opérés sur une ligne mentale numérique. Ainsi, l'étude de Wiemers et al. (2014) a-t-elle montré que la performance en addition est significativement détériorée lors de la réalisation d'un mouvement vers la gauche, comme lors d'un mouvement vers le bas, et que la performance en soustraction l'est lors d'un mouvement vers la droite, comme lors d'un mouvement vers le haut.

Les interférences repérées suggèrent ainsi la possibilité de processus attentionnels communs à la réalisation du calcul et au contrôle directionnel du mouvement. Les résultats de Masson et al. (2018) ont en outre montré que des changements de focus attentionnel spatial sous-tendent la comparaison de nombres.

Aussi l'éventualité que de tels processus attentionnels puissent contribuer à expliquer les résultats des Séries 1 et 2 relatifs aux calculs complexes et à la comparaison de nombres, dans le cas des chiffres arabes, est-elle à considérer.

4.2. Cas de la soustraction et de l'addition complexes

Dans les études d'Anelli et al. (2014), de Lugli et al. (2013) et de Wiemers et al. (2014), les sujets avaient à effectuer des additions et soustractions mentales. Les calculs à effectuer dans les deux premières études citées impliquaient systématiquement un nombre à un chiffre et un nombre à trois chiffres. Dans la dernière étude, les calculs consistaient en 15 additions avec deux nombres à un chiffre et 15 autres avec deux nombres à deux chiffres ainsi qu'en 15 soustractions avec un nombre à un chiffre et un nombre à deux chiffres et 15 autres avec deux nombres à deux chiffres. Dans les deux premières études, les nombres étaient présentés verbalement : les sujets savaient qu'ils allaient devoir retrancher ou ajouter (selon le cas) le nombre trois à un autre nombre, puis réitérer la même opération à partir du résultat de la précédente et ainsi de suite, jusqu'à atteinte d'un temps limite ; le nombre auquel il s'agissait initialement d'ajouter ou de retrancher trois était indiqué verbalement en début de mouvement ou de déplacement. Dans la dernière étude, les nombres impliqués dans les calculs étaient écrits en chiffres arabes (projetés sur un écran). Une majorité des calculs impliqués dans les études d'Anelli et al. (2014), de Lugli et al. (2013) et de Wiemers et al. (2014) renvoie ainsi à des calculs caractérisés de complexes dans la présente étude. En outre, les résultats de ces études sont cohérents entre eux et valent dans le cas des chiffres arabes (Wiemers et al., 2014).

Il est ainsi envisageable de confronter les résultats des études d'Anelli et al. (2014), Lugli et al. (2013) et Wiemers et al. (2014) avec ceux obtenus dans le cas des calculs complexes avec nombres en chiffres arabes dans les Séries 1 et 2. Les résultats des Séries 1 et 2 apparaissent cohérents avec ces résultats-ci dans le cas de l'addition complexe avec chiffres arabes, celle-là s'étant avérée (Série 2) favoriser significativement la performance d'un mouvement horizontal vers l'avant. En revanche, il a également été observé que la soustraction complexe favorise la performance d'un mouvement vertical vers le haut (Série 1) ou horizontal vers l'avant (Série 2), ce qui n'était en rien attendu en regard des résultats d'Anelli et al. (2014), de Lugli et al. (2013) et de Wiemers et al. (2014) et, plus généralement, en regard de l'hypothèse quant au changement de focus d'attention spatiale lors d'une soustraction (Knops et al., 2009).

Il convient de souligner que les effets de la direction d'un mouvement sur la performance concomitante d'un calcul semblent très sensibles au contexte de réalisation. Ainsi, Anelli et al. (2014) n'ont pas trouvé d'effet significatif de la marche vers l'avant et la gauche sur la soustraction mentale, ce que ces auteurs ont attribué au caractère hybride du déplacement, avec une composante directionnelle de nature à favoriser la performance en soustraction (vers la gauche) combinée à une composante directionnelle de nature à interférer avec celle-là (vers

l'avant). De la même manière, Lugli et al. (2013) n'ont trouvé d'influence d'un déplacement actif dans un escalier ni sur la performance d'additions, ni sur celle de soustractions, que le déplacement soit ascendant ou descendant, ce que les auteurs ont imputé au caractère composite du mouvement (non exclusivement vertical), à la composante verticale instantanée peu marquée de ce mouvement (hauteur des contremarches) ou encore à une influence de la double tâche à effectuer. Pour autant, aucun résultat des études de l'effet du mouvement sur un calcul concomitant ne permet de présupposer l'effet de la soustraction complexe sur la performance en squat jump vertical, mesuré dans la Série 1 et qui confirme les résultats de Rabahi et al. (2013), ou sur la performance en pointage, mesuré dans la Série 2.

Il serait cependant hâtif d'en conclure que les résultats des Séries 1 et 2 ici considérés sont sans relation avec le contrôle de la direction du mouvement. Si les travaux d'Anelli et al. (2014) et de Lugli et al. (2013) ont montré que le lien éventuel entre un mouvement et un calcul concomitant est sensible au contexte de réalisation du mouvement, ceux de Lugli et al. (2013) ont avéré que ce lien est aussi sensible à la concomitance du calcul et du mouvement et/ou au décalage temporel entre l'un et l'autre. Ces auteurs ont ainsi montré un effet du sens d'un déplacement passif vertical sur l'addition et la soustraction quand ces calculs étaient effectués pendant ce déplacement mais pas quand ils l'étaient après. Or, en regard des travaux d'Anelli et al. (2014), de Lugli et al. (2013) et de Wiemers et al. (2014), les Séries 1 et 2 présentent deux singularités majeures : elles étudient l'effet d'une tâche arithmétique *sur un mouvement subséquent*, lequel est en outre effectué à *intensité maximale*. On peut concevoir que ces particularités soient de nature à susciter des résultats distincts de ceux obtenus en étudiant l'effet de mouvements de moindre intensité sur la performance de calculs qui leur sont concomitants.

Dans les Séries 1 et 2, les sujets étaient conscients du mouvement qu'ils auraient à réaliser après avoir effectué un calcul. Cela pourrait ainsi avoir favorisé, durant le calcul, une représentation spatiale des nombres impliqués dans un plan congruent avec celui dans lequel le mouvement subséquent serait, dans l'idéal (rendement énergétique du mouvement) à réaliser, *i.e.* : dans un plan vertical dans le cas du squat jump vertical et dans un plan horizontal dans le cas du pointage manuel. Cela aurait ainsi pu favoriser une attention à la trajectoire optimale lors de la réalisation du saut ou du pointage manuel.

Il n'est du reste pas inenvisageable qu'un tel phénomène puisse tendre à interférer avec le sens des focus attentionnels. L'expérimentation 5 (Série 2) le suggère. Dans cette expérimentation, il a été trouvé que la soustraction mentale complexe et l'addition mentale complexe (chiffres arabes dans le deux cas) améliorent la performance motrice de façon significative par rapport à

la condition repère (performance motrice après visualisation d'un écran noir). S'il n'a pas été trouvé de différence significative entre les performances motrices produites après soustraction complexe et après addition complexe, les comparaisons multiples ont fourni à ce niveau un résultat à la limite de la significativité, si on fixe cette limite à $p < 0,05$. En effet, il a été trouvé un temps de réponse (\pm SE) après addition complexe plus court de $11,72 \pm 4,60$ ms que celui produit après soustraction complexe, avec $p = 0,051$. Ce résultat suggère donc une tendance qui est cohérente avec les repères existants quant à l'attention spatiale durant le calcul.

L'addition complexe et la soustraction complexe ont ainsi pu susciter une représentation spatiale des nombres dans un plan congruent avec celui dans lequel le mouvement de pointage serait, dans l'idéal, à réaliser. Il est également envisageable que les changements de focus attentionnel dans ce plan, durant le calcul, aient facilité la performance motrice ultérieure dans le cas de l'addition (direction ascendante du changement de focus attentionnel) et pas dans le cas de la soustraction (direction descendante du changement de focus attentionnel).

4.3. Soustraction complexe, multiplication complexe et comparaison de nombres

L'éventualité que la soustraction complexe et l'addition complexe aient pu favoriser une centration de l'attention sur le plan de mouvement optimal dans la réalisation de la tâche motrice subséquente apparaît envisageable dans le cas de la comparaison de nombres (Série 2). Il existe en tout état de cause des résultats étayant l'idée de changements de focus attentionnel sur une ligne numérique mentale durant ce type de tâches arithmétiques (Masson et al., 2018).

Il a été constaté (expérimentation 7 ; Série 2) que la comparaison de nombres, comme la soustraction mentale complexe (chiffres arabes dans le deux cas), améliore significativement la performance motrice par rapport à la condition repère. Dans les deux cas, l'effet positif sur la performance motrice a pu être imputé à l'activité de manipulation mentale de quantités via les stratégies procédurales mobilisées (§ 3.2.). La performance motrice après soustraction s'est en outre avérée significativement meilleure qu'après comparaison de nombres : le premier temps de réponse (\pm SE) s'est avéré de $9,42 \pm 2,97$ ms plus rapide que le second ($p = 0,008$). Cela semble cohérent si on considère que la tâche de comparaison, même si elle requerrait la mise en place d'une relation mathématique entre deux nombres, portait sur des nombres à un seul chiffre, alors que la soustraction impliquait un nombre à un chiffre et un nombre à deux chiffres. En revanche, il semble difficile d'expliquer clairement la différence constatée de performances

motrices après soustraction complexe et après comparaison de nombres sous l'angle de la mobilisation éventuelle de processus d'attention spatiale durant ces tâches arithmétiques.

Les résultats obtenus quant à la multiplication complexe sont par ailleurs tout aussi délicats à expliquer sous l'angle de la mobilisation éventuelle de processus d'attention spatiale. Dans l'expérimentation 6 (Série 2), il a été trouvé que la performance motrice après soustraction complexe, comme après multiplication complexe, est significativement meilleure (temps de réponse plus court) qu'en condition repère. En outre, il n'a été trouvé aucune différence significative entre les performances motrices produites après soustraction complexe et après multiplication complexe. Or, si on peut envisager que des processus d'attention spatiale mobilisés durant la soustraction complexe puissent expliquer l'effet positif de celle-là sur la performance motrice, il convient de noter que la question d'une éventuelle relation entre spatialité et multiplication demeure controversée.

L'existence de cette relation n'est ainsi pas prédite par les modèles théoriques du calcul arithmétique de Chen et Verguts (2012) et de Verguts et Fias (2005). Si certaines études expérimentales ont suggéré l'existence d'une relation entre multiplication et spatialité (*e.g.* : Katz & Knops, 2014), les résultats d'autres études l'ont mise en question (*e.g.* : Shaki & Fischer, 2017). En outre, les résultats d'une étude récente (Figure 36) de Li et al. (2018) ont montré que la résolution de problèmes d'addition favorise la détection subséquente d'une cible positionnée à droite (du sujet et plus précisément de l'écran en face du sujet) et que la résolution de problèmes de soustraction favorise la détection subséquente d'une cible positionnée à gauche. En revanche, ces auteurs n'ont avéré aucun effet de la multiplication sur la détection subséquente d'une cible, qu'elle soit positionnée à gauche ou à droite du sujet.

En définitive, on peut envisager que des processus sous-tendant l'attention spatiale durant la soustraction mentale complexe et durant l'addition mentale complexe (chiffres arabes) aient pu favoriser l'attention des sujets sur la trajectoire optimale du mouvement en squat jump vertical et en pointage manuel. Cette explication suppose que, dans le cas particulier d'un mouvement vertical ou horizontal à haute intensité, les sujets étant conscient du mouvement qu'ils ont à produire, activent, durant le calcul, une représentation spatiale des nombres dans un plan congruent avec le plan de mouvement optimal. Une telle possibilité est envisageable dans le cas de la comparaison de nombres avec chiffres arabes. Cette possibilité ne permet cependant pas d'expliquer de façon limpide que la performance motrice après soustraction complexe se soit révélée meilleure (temps de réponse) qu'après comparaison de nombres. Cette possibilité se trouve en tout état de cause fragilisée dans le cas de la multiplication complexe, l'existence

d'un lien entre multiplication (notamment complexe, cf. Li et al., 2018) et spatialité ayant été mise en question (Figure 36).

Figure 36 – Aperçu du protocole expérimental de Li et al. (2018)



Les timings d'une tâche d'addition (A ; +) et d'une tâche de multiplication (B ; x) dans le protocole de Li et al. (2018) sont ici présentés. Une croix de fixation (★), un premier opérande, l'opérateur, un second opérande, puis une proposition de solution étaient successivement présentés au centre d'un écran. La solution proposée était visible pendant une durée maximale de 5000 ms. Le sujet répondait oralement à la proposition (« oui » si la réponse était jugée correcte, « non » si elle était jugée incorrecte). La cible (cercle blanc plein) apparaissait ensuite, aléatoirement dans la cellule (carré) à gauche ou à droite de l'écran, dans 80% des essais. Dans les 20% restants, aucune cible n'apparaissait (contrôles). Lorsque la cible était présente, elle apparaissait après un délai variable de 150, 300 ou 450 ms, suite à la disparition de l'écran de la proposition de solution au calcul. Cette cible restait visible pendant une durée maximale de 2000 ms et disparaissait dès que le sujet avait réagi à sa présence en pressant la barre d'espace d'un clavier (que la cible soit à gauche ou à droite de l'écran). Si l'addition s'est avérée favoriser la détection d'une cible positionnée à droite (comparativement à la détection d'une cible positionné à gauche), aucun effet de la multiplication sur la détection des cibles n'a été trouvé.

Il est certes envisageable que les résultats des Séries 1 et 2 quant à la soustraction complexe et à l'addition complexe, d'une part, et que les résultats de la Série 2 quant à la comparaison de nombres et à la multiplication complexe, d'autre part, puissent s'expliquer par des mécanismes pour partie distincts.

Il convient en tout état de cause d'envisager une explication complémentaire, sinon alternative, quant aux processus sous-jacents, ce qui invite à se tourner vers les études ayant suggéré une mobilisation des régions cérébrales motrices durant la réalisation de tâches arithmétiques.

5. Cognition numérique et processus cérébraux moteurs

Les Série 1 et 2 ont montré que des tâches arithmétiques de calcul (soustraction, addition et multiplication) et de comparaison de nombres sont susceptibles de favoriser la performance d'un mouvement subséquent à haut intensité. Cet effet positif sur la performance motrice est apparu conditionné par le recours au format des chiffres arabes pour présenter les nombres

impliqués. Il est en outre apparu lié à l'activité de résolution requise par la tâche arithmétique plutôt qu'à la simple lecture des nombres. Les résultats ont enfin suggéré que l'effet positif sur la performance motrice renvoie à une activité de manipulation mentale des quantités via des stratégies procédurales, plutôt qu'à une activité de résolution par recours à une mémoire des faits arithmétiques, *i.e.* : à des résultats mémorisés (*e.g.* : tables d'addition apprises par cœur).

Au regard des processus explicatifs, il est envisageable qu'une habitude accrue des tâches arithmétiques, avec nombres en chiffres arabes dans des tâches requérant une manipulation mentale effective de quantités, ait suscité un état émotionnel favorable à la production d'une performance motrice subséquente. Cette éventualité n'est pas incompatible avec l'idée d'une influence de mécanismes d'encodage et/ou de représentation en mémoire de travail spécifique des chiffres arabes, dont la mobilisation a semblé crédible à la lumière de différents modèles de la cognition numérique. Au demeurant, des tâches arithmétiques suscitant un état émotionnel qui favoriserait le contrôle attentionnel pourraient accroître l'attention portée à des éléments pertinents pour produire une performance motrice subséquente. En cohérence, la mobilisation éventuelle de processus d'attention spatiale durant l'addition et la soustraction complexes, voire la comparaison de nombres, a paru susceptible de favoriser une attention au plan de mouvement optimal dans les performances motrices subséquentes. En revanche, cette éventualité s'est révélée sujette à caution dans le cas de la multiplication complexe.

Or, si la relation entre nombres et spatialité peut s'expliquer par une mobilisation de processus d'attention spatiale (*e.g.* : Fischer et al., 2003), elle peut aussi l'être par une mobilisation de processus de simulation (*e.g.* : Fischer & Brugger, 2011), *i.e.* : de processus cérébraux qui pourraient également être impliqués dans la préparation d'une action motrice. S'il semble peu crédible que la réalisation d'une tâche arithmétique puisse s'apparenter à la pure simulation d'une action de saut ou de pointage manuel, l'idée d'une mobilisation, durant ce type de tâches, de processus cérébraux moteurs également impliqués dans la préparation d'un mouvement semble à considérer. Aussi est-on invité à poursuivre l'analyse des résultats des Séries 1 et 2 sous cet angle complémentaire, voire éventuellement alternatif.

5.1. Au plan comportemental

L'hypothèse selon laquelle l'addition et la soustraction sont de nature à susciter des changements de focus attentionnel distinctifs (vers la gauche pour la première, vers la droite pour la seconde) a été examinée dans plusieurs études (Anelli et al., 2014 ; Lugli et al., 2013 ;

Wiemers et al., 2014) qui l'ont accréditée. Ces études ont concouru à montrer que le sens d'un mouvement horizontal, comme vertical, interfère avec la performance d'une addition ou d'une soustraction concomitante.

Dans ce cadre, l'étude de Lugli et al. (2013) présente un intérêt particulier en ce que ses résultats suggèrent la possible mobilisation de processus de simulation lors d'une addition ou d'une soustraction. Cette étude s'est intéressée à l'influence d'un déplacement vertical du corps dans sa globalité sur la performance en addition et en soustraction dans le cas : (1) d'un déplacement passif via un élévateur, (2) d'un déplacement actif via la marche à pieds dans un escalier, (3) d'un déplacement imaginé via un élévateur, (4) d'un déplacement imaginé en marche à pieds. Dans les cas (1) et (2) ci-avant, l'étude de Lugli et al. (2013) a en outre pris en considération la performance de calculs concomitants au déplacement, d'une part, de calculs effectués après avoir réalisé le déplacement, d'autre part.

Les résultats n'ont pas avéré d'effet de la marche sur la performance des calculs, ce que Lugli et al. (2013) imputent à un mouvement de marche qui n'était pas exclusivement vertical et dont la composante verticale instantanée était moindre ou encore par une complexité trop importante de la double tâche à gérer. Par-delà ce point, les auteurs ont avéré un effet du déplacement vertical passif (élévateur) sur les calculs concomitants, le déplacement descendant favorisant la performance en soustraction et le déplacement ascendant, celle en addition. En revanche, aucun effet de ce déplacement passif, comme de la marche effective, n'a été trouvé lorsque les calculs étaient à effectuer à l'issue du déplacement. De plus, aucun effet d'un mouvement ou d'un déplacement imaginé sur la performance en calcul n'a été trouvé. Sans pour autant dénier la possible influence de processus d'attention spatiale sur les résultats obtenus, on peut ainsi douter de ce qu'ils en constituent la seule explication. S'il en allait d'une explication exclusive on aurait alors dû retrouver les résultats constatés avec les calculs concomitants au déplacement par élévateur quand ces calculs étaient effectués suite à ce déplacement, voire suite à la marche, ainsi que dans le cas des déplacements imaginés (Lugli et al., 2013). Ces résultats suggèrent ainsi que des processus cérébraux sensori-moteurs à l'œuvre dans un déplacement en cours puissent influencer sur les processus sous-tendant l'addition et la soustraction mentales.

Dans le cas de la présente étude, il est ainsi réciproquement envisageable que des processus cérébraux mobilisés par les calculs complexes ou la comparaison de nombres, avec chiffres arabes, aient pu favoriser la performance motrice subséquente sans pour autant que ces processus ne renvoient forcément et/ou exclusivement à l'attention spatiale. Cette possibilité est à envisager au regard des travaux en neuro-imagerie relatifs aux tâches arithmétiques.

5.2. Au regard des études en neuro-imagerie

Il convient en premier lieu de noter qu'il est délicat d'opérer un distinguo strict entre habileté cognitive et habileté motrice au plan des structures cérébrales sous-jacentes (Hanakawa et al., 2002). Plusieurs études ont de fait mis en évidence une activation fonctionnelle accrue du cortex prémoteur durant la réalisation d'additions mentales par des sujets adultes (Chen et al., 2006 ; Hanakawa et al., 2002 ; 2003). Hanakawa et al. (2002) ont ainsi envisagé que l'aire cérébrale de Brodman (BA6), comprenant l'aire motrice supplémentaire ainsi que les parties dorsales et ventrales du cortex prémoteur latéral, puisse assumer des fonctions cognitives. Les résultats d'Hanakawa et al. (2002) ont en tout état de cause avéré une activation fonctionnelle accrue du cortex prémoteur dorso-latéral durant la réalisation d'une addition, sans mouvement, cette activation fonctionnelle chevauchant de surcroît celle généralement observée lors d'un mouvement complexe des doigts.

Plus récemment, Hanakawa (2011) a produit une méta-analyse le conduisant à défendre que le cortex prémoteur rostral constitue une zone de médiation entre les réseaux cérébraux cognitifs et moteurs. Cet auteur souligne les rôles clés joués par le cortex préfrontal dorsolatéral (aires 9/46) et l'aire motrice M1, respectivement dans le comportement cognitif et moteur. Notant qu'il n'a pas été observé de connexion directe entre le cortex préfrontal dorsolatéral et M1, il s'interroge dès lors sur les structures qui permettraient leur interconnexion. Hanakawa (2011) met ici en avant : (1) une activation fonctionnelle accrue dans le cortex prémoteur rostral lors de la préparation d'un mouvement ainsi que durant une diversité de tâches cognitives, (2) l'existence conjointe de connexions entre le cortex prémoteur rostral et, d'une part, l'aire préfrontale 46, d'autre part, l'aire prémotrice caudale et l'aire motrice supplémentaire, (3) l'existence de connexions entre l'aire prémotrice caudale et l'aire motrice supplémentaire et M1 ainsi que la corde spinale. L'auteur en vient dès lors à avancer que le cortex prémoteur rostral pourrait de ce fait constituer une instance d'interaction entre réseaux cognitifs et moteurs.

Plus récemment encore, Genon et al. (2017) ont produit une méta-analyse conduisant à une subdivision du cortex prémoteur dorsal droit en cinq régions réparties le long d'un axe rostro-caudal selon un gradient fonctionnel cognitif-moteur. Ont ainsi été distinguées cinq régions : (1) une région rostrale connectée fonctionnellement avec le cortex préfrontal, censé supporter des processus cognitifs de haut niveau, notamment en mémoire de travail, (2) une région centrale, mixte quant au gradient cognitif-moteur, (3) une région caudale fonctionnellement interconnectée avec le système moteur cérébral, (4) une région dorsale, associée au mouvement

de la main et à la fois connectée aux régions cognitive et motrice et (5) une région ventrale dont le profil fonctionnel renvoie au mouvement des yeux.

Sans qu'il soit aisé de mettre en perspectives les analyses d'Hanakawa (2011) et de Genon et al. (2017), celles-ci concourent à accréditer l'idée que le cortex prémoteur pourrait être le siège d'une zone d'interaction entre réseaux cérébraux cognitifs et moteurs. Cela serait en tout état de cause notamment cohérent avec l'observation d'une activation fonctionnelle accrue, au niveau du cortex prémoteur, durant une tâche arithmétique d'addition (*e.g.* : Hanakawa et al., 2002). Cela serait en outre compatible avec les résultats des Séries 1 et 2 montrant une influence de la soustraction, de l'addition et de la multiplication complexes ainsi que de la comparaison de nombres, dans chaque cas avec chiffres arabes, sur la performance motrice. Sans pour autant simuler au sens strict les actions motrices de saut vertical ou de pointage manuel, les tâches arithmétiques ci-avant mentionnées auraient ainsi pu solliciter le cortex prémoteur, et le cas échéant son interactivité avec le cortex moteur, dans un sens favorisant la performance de ces actions motrices, éventuellement sous l'angle d'un plan de mouvement optimisé (vertical en saut, horizontal en pointage).

5.3. Stratégies procédurales et cortex prémoteur

On peut envisager que les tâches de calcul complexe des Séries 1 et 2 ainsi que la tâche de comparaison de nombres de la Série 2, en chaque cas avec des nombres écrits en chiffres arabes, ont pu favoriser la performance motrice en saut et en pointage via une mobilisation du cortex prémoteur. Cette hypothèse rencontre cependant une première limite dans le sens où les études de Chen et al. (2006) et d'Hanakawa et al. (2002 ; 2003), qui ont avéré une activation fonctionnelle accrue du cortex prémoteur durant un calcul chez l'adulte, portent sur le seul cas de l'addition. En outre, il s'agit d'examiner la cohérence de cette hypothèse en regard des résultats de la Série 2 qui n'ont pas avéré d'effet des calculs simples (addition et multiplication, avec chiffres arabes) sur la performance motrice.

Une étude de Tschentscher et Hauk (2014) aide à envisager ces deux points. Cette étude (croisant neuro-imagerie et approche comportementale) intéresse l'addition et la multiplication, sous l'angle de la difficulté de la tâche mais aussi des stratégies utilisées (validées en croisant le point de vue des sujets avec une analyse comportementale). Il est souvent avancé que la difficulté d'une tâche arithmétique, telles que peuvent en rendre compte les indicateurs de surface (pour reprendre une formulation de Tschentscher et Hauk, 2014) induit des probabilités

en termes de stratégie de résolution (tâche simple et recours aux faits arithmétiques mémorisés, tâche complexe et recours à des stratégies procédurales). Tschentscher et Hauk (2014) se sont cependant également intéressés à la difficulté sous l'angle des stratégies effectives des sujets : si les deux dimensions sont en partie liées, la difficulté d'une tâche est par nature relative et peut susciter des différences interindividuelles, ce qui fonde le *distinguo* opéré ici.

Dans cette étude, les données en neuro-imagerie obtenues dans le cas de stratégies procédurales ont été contrastées avec celles recueillies dans le cas des stratégies par recouvrement de faits arithmétiques. Il a été trouvé que les premières, indépendamment du type d'opération (addition ou multiplication) suscitent une activation fonctionnelle significative : (1) d'un système fronto-parietal de contrôle exécutif général, (2) d'un réseau préfrontal latéral et temporal, impliqué dans le recouvrement de règles et stratégies apprises ainsi que (3) d'un réseau sensori-moteur, intervenant possiblement dans le séquençement des nombres et/ou le traitement des structures syntaxiques durant une tâche arithmétique (Tschentscher & Hauk, 2014).

Ces éléments ont un intérêt tout particulier dans le cas de la présente étude car ils contribuent à suggérer une cohérence aux résultats des Séries 1 et 2, pour ce qui est des calculs simples et complexes et de la comparaison de nombres (chiffres arabes), sous l'angle de l'implication du cortex prémoteur. Certes, dans la présente étude, on ne peut qu'en rester à l'idée que les calculs simples ont favorisé des stratégies de recouvrement de faits arithmétiques et que les calculs complexes et la comparaison de nombres ont favorisé des stratégies procédurales. Mais il en va de probabilités, en dépit de possibles différences interindividuelles. En outre, alors que les résultats de Tschentscher et Hauk (2014) indiquent une activation fonctionnelle accrue des régions cérébrales motrices dans le seul cas de stratégies procédurales, les résultats des Séries 1 et 2 ont montré un effet sur la performance motrice des tâches arithmétiques (avec chiffres arabes) qui sont censées favoriser le plus le recours à de telles stratégies.

Il n'est ainsi pas inconcevable que ces tâches arithmétiques aient pu, via une implication du cortex prémoteur, favoriser la performance motrice subséquente. Dans les Séries 1 et 2, les sujets étaient en tout état de cause au courant, dès leur effectuation de ces tâches arithmétiques, du mouvement qu'ils auraient à réaliser à leur issue. Cela a pu favoriser un lien entre processus cérébraux impliqués dans les tâches arithmétiques et processus cérébraux impliqués dans les tâches motrices, éventuellement sous l'angle des composantes spatiales en jeu dans les tâches arithmétiques et les mouvements ici considérés.

PARTIE V – SYNTHÈSE ET PERSPECTIVES

PARTIE V. SYNTHÈSE ET PERSPECTIVES

Plusieurs études ont suggéré l'existence d'une relation entre tâches numériques ou arithmétiques et mouvement. De telles études ont notamment suggéré que des représentations mathématiques abstraites sont susceptibles de s'enraciner dans l'expérience de mouvements corporels (*e.g.* : Soylu et al., 2018) ou encore que la cognition numérique et la préparation du mouvement sont de nature à mobiliser des mécanismes cérébraux similaires ou étroitement interconnectés (*e.g.* : Andres et al., 2017). Dans ce cadre, des études en neuro-imagerie ont notamment montré que certaines tâches de calcul, réalisées en l'absence de mouvement, suscitent une activation fonctionnelle accrue de régions cérébrales motrices, tant chez l'enfant (*e.g.* : Berteletti & Booth, 2015) que chez l'adulte (*e.g.* : Hanakawa et al., 2002). De tels résultats sont en outre notamment cohérents avec : (1) le recours relativement généralisé aux doigts (*e.g.* : Previtali et al., 2011) pour apprendre à compter ou calculer, (2) les effets positifs de jeux de société, requérant à la fois le déplacement manuel de pions et le comptage, sur les connaissances mathématiques de l'enfant (*e.g.* : Ramani & Siegler, 2008) ou encore (3) l'effet positif d'une gestuelle sur l'apprentissage de la résolution d'une addition à trou par des enfants (Goldin-Meadow et al., 2009). Les mécanismes supportant de tels apprentissages pendant l'enfance sont en outre susceptibles de demeurer influents chez l'adulte, lors de la réalisation de tâches numériques ou arithmétiques (Moeller et al., 2011).

Plusieurs études ont en tout état de cause montré que la performance à des tests mesurant la gnose des doigts est de nature à prédire la performance de tâches arithmétiques chez l'enfant (*e.g.* : Newman, 2016) et chez l'adulte (*e.g.* : Penner-Wilger et al., 2014). Dans le cas de sujets adultes, plusieurs résultats expérimentaux ont par ailleurs suggéré que les représentations spatiales impliquées dans l'addition et la soustraction, voire la comparaison de nombres, et le contrôle de la direction d'un mouvement vertical ou horizontal, segmentaire ou du corps dans la globalité, sont susceptibles de solliciter des mécanismes cérébraux similaires (*e.g.* : Anelli et al., 2014 ; Wiemers et al., 2014).

Une série d'études a ainsi suggéré l'existence d'une relation entre tâches numériques ou arithmétiques et mouvement, voire montré l'effet d'un mouvement à intensité non maximale sur un calcul concomitant. En revanche, ces études n'ont pas exploré le cas de mouvements à

intensité maximale, pas plus qu'elles n'ont examiné l'effet éventuel d'une tâche numérique ou arithmétique sur la performance d'un mouvement subséquent. Cette éventualité semblait d'autant plus à envisager que Rabahi et al. (2013) ont montré un effet positif de la soustraction mentale complexe, avec des nombres écrits en chiffres arabes, sur la performance en squat jump vertical chez de jeunes adultes.

La présente étude a ainsi visé à confirmer ce résultat ainsi qu'à examiner plus en détail cet éventuel effet de la soustraction mentale complexe sur la performance d'un mouvement à intensité maximale. La Série expérimentale 1 a ainsi cherché à déterminer si cet éventuel effet de la soustraction mentale complexe sur la performance d'un squat jump vertical était de nature à valoir dans le cas d'un autre mouvement à haute intensité (en l'occurrence un pointage manuel à vitesse maximale). Dans la mesure où la soustraction mentale complexe est de nature à requérir tout à la fois un traitement numérique et le recours à des procédures de calcul (*e.g.* : Arsalidou et al., 2018), la Série 1 a aussi examiné les influences respectives éventuelles de la lecture de nombres et de soustractions complexes portant sur ces nombres, sur la performance motrice. Enfin, puisque le format numérique est susceptible de jouer sur les processus cérébraux en jeu dans le traitement numérique et les tâches arithmétiques (*e.g.* : Dehaene, 1992), la Série 1 a examiné l'influence de ce format sur la performance motrice (nombres en chiffres arabes, d'une part, nombres écrits en toutes lettres, d'autre part).

En dépit de travaux montrant une influence des quantités liées à des nombres visualisés sur la cinématique de mouvements manuels de précision (Andres et al., 2008 ; Rugani et al., 2017), les résultats de la Série 1 ont montré que, dans le cas d'un mouvement à haute intensité, la lecture de nombres affecte très peu (lectures de chiffres en toutes lettres dans le cas du saut) ou n'affecte pas (lectures de chiffres en toutes lettres dans le cas du pointage et lecture de nombres en chiffres arabes dans le cas du saut et du pointage) la performance motrice. Par ailleurs, dans le cas du saut, comme dans celui du pointage, les résultats de la Série 1 ont montré que la soustraction mentale complexe avec nombres en chiffres arabes favorise la performance motrice, alors qu'aucun effet significatif sur celle-là n'a été trouvé lorsque les calculs étaient à effectuer à partir de nombres écrits en toutes lettres. La série 1 a ainsi confirmé les résultats de Rabahi et al. (2013) concernant l'effet de la soustraction mentale complexe avec chiffres arabes sur la performance d'un squat jump vertical. La Série 1 a en outre montré que cet effet vaut au-delà du seul cas du saut vertical, en l'occurrence dans le cas d'un pointage manuel à vitesse maximale. Cet effet de la soustraction mentale complexe sur la performance motrice est en outre apparu affecté par le format numérique puisqu'il a été trouvé dans le cas des nombres en

chiffres arabes mais pas dans celui de nombres écrits en toutes lettres. Celui-ci est enfin apparu lié à l'activité de résolution du problème arithmétique plutôt qu'au simple traitement des nombres impliqués.

La Série expérimentale 2 a visé à prolonger les investigations impulsées dans la Série 1 en se centrant sur le cas des nombres en chiffres arabes et de la performance en pointage manuel. La Série 2 s'est de ce fait ouverte à d'autres tâches arithmétiques que la seule soustraction mentale complexe. Elle a ainsi considéré, en sus, les cas de l'addition, de la multiplication et de la comparaison de quantités. Ces choix ont tenu, d'une part, à ce que les travaux montrant que le mouvement est de nature à interférer sur une tâche arithmétique concomitante ont été centrés à la fois sur l'addition et la soustraction (*e.g.* : Anelli et al., 2014 ; Wiemers et al., 2014). Il était par ailleurs naturel de chercher à prolonger l'investigation au-delà. Cela a conduit à s'intéresser au cas de la multiplication, susceptible de mobiliser des mécanismes singuliers en regard de l'addition et de la soustraction (*e.g.* : Li et al., 2018). Cela a également conduit à s'intéresser au cas de la comparaison de quantités, dont la performance est de nature à prédire la performance en calcul (*e.g.* : Morsanyi et al., 2017). Dans le cas de l'addition et de la multiplication, deux niveaux de difficulté ont été considérés (tâches simples, *i.e.* : calculs avec deux nombres à un chiffre, et tâches complexes, *i.e.* : calculs avec un nombre à un chiffre et un nombre à deux chiffres). Ce, dans la mesure où la difficulté des tâches arithmétiques est de nature à influencer sur les stratégies de résolution adoptées (Thevenot et al., 2010) et, par ce biais, sur les processus cérébraux impliqués (Tschentscher & Hauk, 2014). Le cas de la comparaison de quantités a enfin également permis d'envisager à nouveau l'influence du format numérique, en considérant le cas des quantités associées à des nombres en chiffres arabes (nombres à un chiffre) et celui des quantités associées à des ensembles de points.

Les résultats de la Série 2 ont de nouveau confirmé l'influence positive de la soustraction mentale complexe sur la performance motrice. De manière plus générale, les calculs complexes (soustraction, addition et multiplication) se sont avérés favoriser la performance motrice, alors qu'aucun effet des calculs simples (addition et multiplication) sur celle-là n'a été trouvé. Les résultats de la Série 2 ont en outre confirmé le poids du format numérique dans l'influence d'une tâche arithmétique sur la performance motrice. Un effet positif de la comparaison de quantités sur la performance motrice a en effet été trouvé dans le cas des nombres en chiffres arabes, alors qu'aucun effet de ce type n'a été repéré dans le cas des quantités associées à des ensembles de points.

On peut récapituler l'analyse des principaux résultats des Séries 1 et 2 comme suit :

- Un effet des tâches arithmétiques (soustraction, addition, multiplication et comparaison de quantités) sur la performance motrice a été trouvé exclusivement dans les cas où les nombres étaient présentés en chiffres arabes (pas d'effet des calculs avec nombres écrits en toutes lettres ou de la comparaison de quantités renvoyant à des ensembles de points). Un tel effet a été observé dans le cas des calculs complexes et de la comparaison de nombres mais pas dans le cas des calculs simples. Il est dès lors envisageable que les calculs complexes et la comparaison de nombres aient été présentées dans un format numérique usuel aux sujets (chiffres arabes) et que leur difficulté les ait challengé de façon optimale, favorisant ainsi le contrôle attentionnel (Deracksahn & Eysenck, 2009) et, de ce fait, la performance motrice subséquente.
- Le fait que la performance motrice n'ait été clairement favorisée que par des tâches avec nombres en chiffres arabes prend également sens en regard d'une pluralité de modèles de la cognition numérique (Campbell & Clark, 1988 ; Clark & Campbell, 1991 ; Dehaene, 1992 ; Noel & Seron, 1993 ; McCloskey et al., 1985 ; McCloskey, 1992). De ce point de vue, les résultats des Séries 1 et 2 quant au format numérique peuvent évoquer une influence, sur la performance motrice, de mécanismes d'encodage et/ou de représentation en mémoire de travail, lors des tâches arithmétiques considérées, qui seraient spécifiques des chiffres arabes.
- Si le format numérique des chiffres arabes est apparu conditionner l'influence de ces tâches arithmétiques sur la performance motrice, cette condition s'est cependant avérée non suffisante. Les résultats des Séries 1 et 2 suggèrent que cette influence est en outre conditionnée par une activité effective de manipulation mentale de quantités, via le recours à des stratégies procédurales, plutôt qu'au traitement numérique ou à une résolution par recours à des faits arithmétiques mémorisés.
- Il est de ce point de vue envisageable que l'activité de calcul suscitée par l'addition complexe, voire la soustraction complexe, ait mobilisé des processus attentionnels favorisant une centration sur le plan de mouvement optimal dans la performance motrice subséquente. Ces tâches arithmétiques sont susceptibles de susciter une représentation mentale des nombres sur une ligne verticale ou bien horizontale (*e.g.* : Wiemers et al., 2014). Les sujets connaissant le mouvement qu'ils avaient à réaliser à l'issue de celles-ci, cela a pu favoriser une représentation des nombres dans un plan congruent avec le plan en lequel ce mouvement serait idéalement à exécuter. Par ailleurs, les changements de focus attentionnel durant l'addition ont pu se surajouter à cela, à la différence de ceux

censés être opérés durant la soustraction (*e.g.* : Wiermers et al., 2014). Cela pourrait expliquer que la performance en pointage manuel après addition complexe ait été significativement meilleure qu'après soustraction complexe dans la Série 2 (temps de réponse plus court).

- L'idée que des processus d'attention spatiale puissent expliquer, au moins en partie, l'effet positif de la comparaison de nombres sur la performance motrice a également semblé envisageable (Masson et al., 2018). Elle s'est cependant avérée moins étayée que dans le cas de l'addition et de la soustraction en ce qu'elle ne peut suffire à expliquer que la performance en pointage après soustraction complexe se soit révélée meilleure qu'après comparaison de nombres (Série 2). En outre, l'éventualité d'une mobilisation de processus d'attention spatiale durant la multiplication complexe s'est révélée sujette à caution, notamment à la lumière des résultats expérimentaux de Li et al. (2018).
- Une hypothèse explicative complémentaire, voire alternative, tient à la possibilité que des processus cérébraux moteurs, mobilisés durant les tâches de calcul complexe et la comparaison de quantités, aient pu influencer sur la performance motrice subséquente. Cette hypothèse est cohérente avec les résultats de l'étude de Lugli et al. (2013), suggérant un possible lien entre les processus cérébraux sensori-moteurs à l'œuvre dans un déplacement et les processus qui sous-tendent une addition ou une soustraction complexe concomitante. Cette hypothèse est aussi apparue cohérente avec des travaux en neuro-imagerie montrant que l'addition et la multiplication sont susceptibles de susciter une activation fonctionnelle accrue du cortex prémoteur (*e.g.* : Hanakawa et al., 2002 ; Tschentscher & Hauk, 2014). Ce, d'autant que des méta-analyses relatives au cortex prémoteur ont suggéré que celui-là pourrait constituer le siège d'interactions entre réseaux cognitifs et moteurs (Hanakawa, 2011 ; Genon et al., 2017).
- Cette hypothèse est également étayée lorsqu'on met en perspective les résultats de Tschentscher et Hauk (2014) et ceux des Séries 1 et 2 de la présente étude. D'une part, ces auteurs-ci ont montré, dans le cas de l'addition et de la multiplication, que le recours à des stratégies procédurales suscite une activation fonctionnelle accrue des régions cérébrales motrices, comparativement au simple recouvrement de faits arithmétiques. D'autre part, les Séries 1 et 2 ont montré un effet positif de tâches arithmétiques qui sont de nature à favoriser les recours à des stratégies procédurales sur la performance motrice et n'ont pas avéré d'effet, sur celle-là, de tâches arithmétiques favorisant une résolution par recouvrement de faits arithmétique en mémoire. Les sujets des Séries 1

et 2 connaissaient le mouvement qu'ils avaient à réaliser après avoir effectué les tâches arithmétiques. Cela a ainsi pu favoriser une congruence entre processus cérébraux mobilisés dans la réalisation des tâches arithmétiques appelant le plus à des stratégies procédurales et processus cérébraux sous-tendant la préparation du mouvement.

On peut concevoir que les effets, avérés par les Séries 1 et 2, de l'addition complexe, de la soustraction complexe, de la multiplication complexe et de la comparaison de nombres, avec chiffres arabes, sur la performance motrice renvoient, au moins en partie, à des processus distincts, voire distinctifs. Il est possible qu'en chaque cas, le format numérique et le challenge constitué par les tâches arithmétiques aient suscité un état émotionnel favorable à une performance motrice consécutive. Des mécanismes d'encodage et/ou de représentation en mémoire de travail, spécifiques des chiffres arabes, mobilisés durant les calculs complexes et la comparaison de nombres, ont aussi pu influencer sur la performance motrice. Des processus d'attention spatiale ont également pu jouer, à minima dans le cas de l'addition complexe voire de la soustraction complexe. Enfin, il est envisageable que des processus cérébraux sollicités durant les tâches arithmétiques complexes des Séries 1 et 2, à fortiori dans le cas de l'addition et de la multiplication, aient pu favoriser la préparation du mouvement subséquent, notamment via le cortex prémoteur.

Ces possibilités appellent à de nouvelles études de nature à prolonger les investigations ici opérés quant aux effets du traitement numérique ou de la réalisation de tâches arithmétiques sur la performance motrice.

Compte tenu des résultats de la présente étude et des analyses que ces résultats ont suscitées, ces nouvelles études pourraient examiner l'effet des tâches arithmétiques sur la performance motrice, en particulier dans le cas de mouvements à haute intensité, en fonction du degré d'anxiété généré par ces tâches, compte tenu de leur complexité, objective et subjectivement perçue, et du ou des format(s) numérique(s) qu'elles convoquent. La présente étude incite en outre à un prolongement prenant en compte, éventuellement en appui sur des entretiens semi-structurés (*e.g.* : Edwards & Holland, 2013), les stratégies des sujets pour résoudre telle tâche arithmétique. Par ailleurs, à l'instar de quelques études portant sur des mouvements sans contrainte d'intensité et but métrique ou chronométrique (Andres et al., 2008 ; Rugani et al., 2017), il serait sans aucun doute enrichissant d'examiner l'influence de diverses tâches arithmétiques sur la cinématique d'un mouvement à haute intensité, voire sur sa dynamique, en sus de mesurer le résultat du mouvement (*e.g.* : hauteur de saut, temps de réponse en pointage).

Les résultats obtenus dans la présente étude quant à l'effet de certains tâches arithmétiques sur la performance d'un mouvement à haute intensité invitent par ailleurs à s'intéresser à l'effet réciproque éventuel de tels mouvements sur la performance arithmétique. Dans le cadre d'une étude préliminaire, à laquelle nous avons participé et qui a donné lieu à un chapitre publié dans des actes (Bal, Khayat, Rifai Sarraj, & Fargier, 2018 ; Partie Publications), il a ainsi été trouvé que la réalisation de squat jump verticaux améliore le temps de réponse en soustraction mentale (un nombre à un chiffre à ôter à un nombre à deux chiffres, avec nombres en chiffres arabes). Cette étude préliminaire pourrait ainsi notamment susciter une étude plus approfondie examinant un possible effet spécifique du mouvement sur la performance arithmétique. En tout état de cause, l'étude de l'influence d'un mouvement sur une tâche numérique ou arithmétique consécutive demeure un champ à explorer en l'état.

En définitive, en regard de la littérature, la présente étude autorise un apport original en investissant une relative zone d'ombre intéressant l'influence d'une tâche numérique ou arithmétique sur la performance d'un mouvement à intensité maximale. Cette étude a également l'originalité d'examiner cette influence en tenant compte du format numérique ainsi que de la complexité des tâches de calcul. Les résultats obtenus montrent l'intérêt de l'entrée adoptée en avérant : (1) un moindre effet ou une absence d'effet statistiquement significatif de la lecture d'un nombre sur la performance motrice, (2) un effet positif net et statistiquement significatif du calcul mental (soustraction, addition et multiplication) et de la comparaison de quantités conditionné par le format numérique (effet trouvé dans le cas des nombres écrits en chiffres arabes et pas dans celui des nombres écrits en toutes lettres ou représentés par des ensembles de points) et par les demandes des tâches (effet trouvé dans le cas des tâches favorisant une solution en recourant à des stratégies procédurales, donc à une manipulation mentales des quantités, et pas dans celui des tâches favorisant une solution par recouvrement de faits arithmétiques mémorisés). Ces résultats sont ainsi suffisamment suggestifs pour inviter à des nouvelles investigations.

REFERENCES

REFERENCES

- Andres, M., Davare, M., Pesenti, M., Olivier, E., & Seron, X. (2004). Number magnitude and grip aperture interaction. *Neuroreport*, *15*(18), 2773–2777.
- Andres, M., Michaux, N., & Pesenti, M. (2012). Common substrate for mental arithmetic and finger representation in the parietal cortex. *NeuroImage*, *62*(3), 1520–1528.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.05.047>.
- Andres, M., Ostry, D. J., Nicol, F., & Paus, T. (2008). Time course of number magnitude interference during grasping. *Cortex*, *44*(4), 414–419.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.cortex.2007.08.007>.
- Andres, M., Seron, X., & Olivier, E. (2007). Contribution of hand motor circuits to counting. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *19*(4), 563–576.
<https://dx.doi.org/10.1162/jocn.2007.19.4.563>.
- Anelli, F., Lugli, L., Baroni, G., Borghi, A. M., & Nicoletti, R. (2014). Walking boosts your performance in making additions and subtractions. *Frontiers in Psychology*, *5*, 1459.
<https://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01459>.
- Ardila, A., Concha, M., & Rosselli, M. (2000). Angular gyrus syndrome revisited: Acalculia, finger agnosia, right-left disorientation and semantic aphasia. *Aphasiology*, *14*(7), 743–754. <https://dx.doi.org/10.1080/026870300410964>.
- Arsalidou, M., & Taylor, M. J. (2011). Is $2 + 2 = 4$? Meta-analyses of brain areas needed for numbers and calculations. *NeuroImage*, *54*(3), 2382–2393.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.10.009>.
- Arsalidou, M., Pawliw-Levac, M., Sadeghi, M., & Pascual-Leone, J. (2018). Brain areas associated with numbers and calculations in children: Meta-analyses of fMRI studies. *Developmental Cognitive Neuroscience*, *30*, 239–250.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.dcn.2017.08.002>.
- Bächtold, D., Baumüller, M., & Brugger, P. (1998). Stimulus-response compatibility in representational space. *Neuropsychologia*, *36*(8), 731–735.
[https://dx.doi.org/10.1016/s0028-3932\(98\)00002-5](https://dx.doi.org/10.1016/s0028-3932(98)00002-5).
- Badets, A., Bouquet, C. A., Ric, F., & Pesenti, M. (2012). Number generation bias after action observation. *Experimental Brain Research*, *221*(1), 43–49.
<https://dx.doi.org/10.1007/s00221-012-3145-1>.

- Barsalou, L. W. (2008). Grounded cognition. *Annual Review of Psychology*, *59*, 617–645. <https://dx.doi.org/10.1146/annurev.psych.59.103006.093639>.
- Barsalou, L. W. (2010). Grounded cognition: Past, present, and future. *Topics in Cognitive Science*, *2*(4), 716–724. <https://dx.doi.org/10.1111/j.1756-8765.2010.01115.x>.
- Benson, D. F., & Denckla, M. B. (1969). Verbal Paraphasia as a. *Archives of Neurology*, *21*(1), 96–102. <https://dx.doi.org/10.1001/archneur.1969.00480130110011>.
- Bernardo, A. B. (2001). Asymmetric activation of number codes in bilinguals: further evidence for the encoding complex model of number processing. *Memory & Cognition*, *29*(7), 968–976. <https://dx.doi.org/10.3758/bf03195759>.
- Berteletti, I., & Booth, J. R. (2015). Perceiving fingers in single-digit arithmetic problems. *Frontiers in Psychology*, *6*, 226. <https://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00226>.
- Bjorklund, D. F., Hubertz, M. J., & Reubens, A. C. (2004). Young children's arithmetic strategies in social context: How parents contribute to children's strategy development while playing games, *International Journal of Behavioral Development*, *28*(4), 347–357. <https://dx.doi.org/10.1080/01650250444000027>.
- Bobbert, M., & van Soest, A. J. (2001). Why do people jump the way they do? *Exercise and Sport Sciences Reviews*, *29*(3), 95–102. <https://dx.doi.org/10.1097/00003677-2001070000-00002>.
- Bonato, M., Zorzi, M., & Umiltà, C. (2012). When time is space: evidence for a mental time line. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *36*(10), 2257–2273. <https://dx.doi.org/10.1016/j.neubiorev.2012.08.007>.
- Boulenger, V., Roy, A. C., Paulignan, Y., Deprez, V., Jeannerod, M., & Nazir, T. A. (2006). Cross-talk between language processes and overt motor behavior in the first 200 msec of processing. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *18*(10), 1607–1615. <https://dx.doi.org/10.1162/jocn.2006.18.10.1607>.
- Boulenger, V., Silber, B. Y., Roy, A. C., Paulignan, Y., Jeannerod, M., & Nazir, T. A. (2008). Subliminal display of action words interferes with motor planning: a combined EEG and kinematic study. *Journal of Physiology Paris*, *102*(1–3), 130–136. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jphysparis.2008.03.015>.
- Bretz, F., Hothorn, T., & Westfall, P. (2010). *Multiple Comparisons Using R*. Boca Raton, FL: Chapman & Hall/CRC Press.
- Brodmann, K. (1909). Vergleichende lokalisationslehre der grosshirnrinde in ihren prinzipien dargestellt auf grund des zellenbaues. Leipzig: Barth.
- Brooks, N. B., Barner, D., Frank, M., & Goldin-Meadow, S. (2018). The Role of Gesture in Supporting Mental Representations: The Case of Mental Abacus Arithmetic. *Cognitive Science*, *42*(2), 554–575. <https://dx.doi.org/10.1111/cogs.12527>.

- Brouillet, T., Heurley, L., Martin, S., & Brouillet, D. (2010). 'motion et cognition incarnée : la dimension motrice des réponses verbales « oui » et « non ». *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 64(2), 134-141. <https://dx.doi.org/10.1037/a0019732>.
- Butterworth, B., Varma, S., & Laurillard, D. (2011). Dyscalculia: From brain to education. *Science*, 332(6033), 1049–1053. <https://dx.doi.org/10.1126/science.1201536>.
- Cai, J., Morris, A., Hohensee, C., Hwang, S., Robison, V., & Hiebert, J. (2019). Research pathways that connect research and practice. *Journal for Research in Mathematics Education*, 50(1), 2-10.
- Calabria, M., & Rossetti, Y. (2005). Interference between number processing and line bisection: a methodology. *Neuropsychologia*, 43(5), 779–783. <https://dx.doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2004.06.027>.
- Campbell, A. W. (1905). *Histological studies on the localization of cerebral function*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Campbell, J. I. D., & Clark, J. M. (1988). An Encoding-Complex View of Cognitive Number Processing: Comment on McCloskey, Sokol, and Goodman. *Journal of Experimental Psychology: General*, 117(2), 204–214. <https://dx.doi.org/10.1037/0096-3445.117.2.204>.
- Campbell, J. I. D., & Epp, L. J. (2004). An encoding-complex approach to numerical cognition in Chinese-English bilinguals. *Canadian Journal of Experimental Psychology / Revue Canadienne De Psychologie Experimentale*, 58(4), 229–244. <http://dx.doi.org/10.1037/h0087447>.
- Campbell, J. I. D., Parker, H. R., & Doetzel, N. L. (2004). Interactive effects of numerical surface form and operand parity in cognitive arithmetic. *Journal of Experimental Psychology. Learning, Memory, and Cognition*, 30(1), 51–64. <https://dx.doi.org/10.1037/0278-7393.30.1.51>.
- Chen, F., Hu, Z., Zhao, X., Wang, R., Yang, Z., Wang, X., & Tang, X. (2006). Neural correlates of serial abacus mental calculation in children: A functional MRI study. *Neuroscience Letters*, 403, 46–51. <https://dx.doi.org/10.1016/j.neulet.2006.04.041>.
- Chen, Q., & Verguts, T. (2012). Spatial Intuition in Elementary Arithmetic: A Neurocomputational Account. *PLoS ONE*, 7(2). <https://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0031180>.
- Choi, E. Y., Yeo, B. T. T., & Buckner, R. L. (2012). The organization of the human striatum estimated by intrinsic functional connectivity. *Journal of Neurophysiology*, 108(8), 2242–2263. <https://dx.doi.org/10.1152/jn.00270.2012>.
- Chu, R. M., & Black, K. L. (2012). Current Surgical Management of High-Grade Gliomas. In A. Quiñones-Hinojosa (Ed.), *Schmidek and Sweet Operative Neurosurgical Techniques*, 6th edition (pp. 105–110). Elsevier, Saunders. <https://dx.doi.org/10.1016/B978-1-4160-6839-6.10008-5>.

- Clark, J. M., & Campbell, J. I. D. (1991). Integrated versus modular theories of number skills and acalculia. *Brain and Cognition*, *17*(2), 204–239. [https://dx.doi.org/10.1016/0278-2626\(91\)90075-J](https://dx.doi.org/10.1016/0278-2626(91)90075-J).
- Cook, S. W., Friedman, H. S., Duggan, K. A., Cui, J., & Popescu, V. (2017). Hand Gesture and Mathematics Learning: Lessons from an Avatar. *Cognitive Science*, *41*(2), 518–535. <https://dx.doi.org/10.1111/cogs.12344>.
- Craighero, L. (2014). The role of the motor cortex in cognitive functions. In L. Shapiro (Ed.), *The Routledge Handbook of Embodied Cognition* (pp. 51–58). Abingdon: Routledge.
- Daar, M., & Pratt, J. (2008). Digits affect actions: the SNARC effect and response selection. *Cortex*, *44*(4), 400–405. <https://dx.doi.org/10.1016/j.cortex.2007.12.003>.
- De Hevia, M. D., Vallar, G., & Girelli, L. (2008). Visualizing numbers in the mind's eye: the role of visuo-spatial processes in numerical abilities. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *32*(8), 1361–1372. <https://dx.doi.org/10.1016/j.neubiorev.2008.05.015>.
- De La Cruz, V. M., Di Nuovo, A., Di Nuovo, S., & Cangelosi, A. (2014). Making fingers and words count in a cognitive robot. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, *8*, 13. <https://dx.doi.org/10.3389/fnbeh.2014.00013>.
- Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, *44*(1–2), 1–42. [https://dx.doi.org/10.1016/0010-0277\(92\)90049-N](https://dx.doi.org/10.1016/0010-0277(92)90049-N).
- Dehaene, S., & Cohen, L. (1995). Towards an anatomical and functional model of number processing. *Mathematical cognition*, *1*, 83–120.
- Dehaene, S., Bossini, S., & Giraux, P. (1993). The Mental Representation of Parity and Number Magnitude. *Journal of Experimental Psychology*, *122*, 371–396. <https://dx.doi.org/10.1037//0096-3445.122.3.371>.
- Derakshan, N., & Eysenck, M. W. (2009). Anxiety, processing efficiency, and cognitive performance: New developments from attentional control theory. *European Psychologist*, *14*(2), 168–176. <https://dx.doi.org/10.1027/1016-9040.14.2.168>.
- Di Luca, S., & Pesenti, M. (2008). Masked priming effect with canonical finger numeral configurations. *Experimental Brain Research*, *185*(1), 27–39. <https://dx.doi.org/10.1007/s00221-007-1132-8>.
- Di Luca, S., Granà, A., Semenza, C., Seron, X., & Pesenti, M. (2006). Finger-digit compatibility in Arabic numeral processing. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *59*(9), 1648–1663. <https://dx.doi.org/10.1080/17470210500256839>.
- Dietrich, J. F., Huber, S., & Nuerk, H.-C. (2016). Methodological aspects to be considered when measuring the approximate number system (ANS) – a research review. *Frontiers in Psychology*, *6*, 295. <https://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00295>.
- Domahs, F., Krinzinger, H., & Willmes, K. (2008). Mind the gap between both hands: evidence for internal finger-based number representations in children's mental calculation. *Cortex*, *44*(4), 359–367. <https://dx.doi.org/10.1016/j.cortex.2007.08.001>.

- Domahs, F., Moeller, K., Huber, S., Willmes, K., & Nuerk, H.-C. (2010). Embodied numerosity: Implicit hand-based representations influence symbolic number processing across cultures. *Cognition*, *116*(2), 251–266. <https://dx.doi.org/10.1916/j.cognition.2010.05.007>.
- Driskell, J. E., & Radtke, P. H. (2003). The effect of gesture on speech production and comprehension. *Human Factors*, *45*(3), 445–454. <https://dx.doi.org/10.1518/hfes.45.3.445.27258>.
- Duffau, H. (2012). Cortical and Subcortical Brain Mapping. In A. Quiñones-Hinojosa (Ed.), *Schmidek and Sweet Operative Neurosurgical Techniques*, 6th edition (pp. 80-93). Elsevier, Saunders. <https://dx.doi.org/10.1016/B978-1-4160-6839-6.10006-1>.
- Edwards, R., & Holland, J. (2013). *What is qualitative interviewing?*. London: Bloomsbury.
- Everett, C. (2017). *Numbers and the making of us: Counting and the course of human cultures*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Fargier, P., Massarelli, R., Rabahi, T., Gemignani, A. & Fargier, E. (2016). Fast regulation of vertical squat jump during push-off in skilled jumpers. *Frontiers in Physiology*, *7*, 289. <https://dx.doi.org/10.3389/fphys.2016.00289>.
- Fargier, R., Ménolet, M., Boulenger, V., Nazir, T. A., & Paulignan, Y. (2012). Grasp it loudly! Supporting actions with semantically congruent spoken action words. *PLoS ONE*, *7*(1), e30663. <https://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0030663>.
- Ferro, J. M., & Botelho, M. A. S. (1980). Alexia for arithmetical signs. A cause of disturbed calculation. *Cortex*, *16*(1), 175–180. [https://dx.doi.org/10.1016/S0010-9452\(80\)80032-3](https://dx.doi.org/10.1016/S0010-9452(80)80032-3).
- Fias, W. (2001). Two routes for the processing of verbal numbers: evidence from the SNARC effect. *Psychological Research*, *65*(4), 250–259. <https://dx.doi.org/10.1007/s004260100065>.
- Finch, W. H., Bolin, J. E., & Kelley, K. (2014). *Multilevel Modeling Using R*. Boca Raton, FL: Chapman and Hall/CRC Press.
- Fischer, M. H. (2001). Number processing induces spatial performance biases. *Neurology*, *57*(5), 822–826. <https://dx.doi.org/10.1212/wnl.57.5.822>.
- Fischer, M. H. (2012). A hierarchical view of grounded, embodied, and situated numerical cognition. *Cognitive Processing*, *13*, Suppl 1, 161-164. <https://dx.doi.org/10.1007/s10339-012-0477-5>.
- Fischer, M. H. (2017). Why numbers are embodied concepts. *Frontiers in Psychology*, *8*, 2347. <https://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2017.02347>.

- 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. <https://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00260>.
- Fischer, M. H., Castel, A. D., Dodd, M. D., & Pratt, J. (2003). Perceiving numbers causes spatial shifts of attention. *Nature Neuroscience*, 6(6), 555–556. <https://dx.doi.org/10.1038/nn1066>.
- Fischer, M.H. (2003). Spatial representations in number processing: evidence from a pointing task. *Visual Cognition*, 10(4), 493–508. <https://dx.doi.org/10.1080/13506280244000186>.
- Fox, J., & Hong, J. (2009). Effect displays in R for multinomial and proportional-odds logit models: Extensions to the effects package. *Journal of Statistical Software*, 32(1), 1–24. <https://dx.doi.org/10.18637/jss.v032.i01>.
- Friedrich, R. M., & Friederici, A. D. (2013). Mathematical logic in the human brain: Semantics. *PLoS ONE*, 8(1). <https://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0053699>.
- Fulton, J. F. (1935). A note on the definition of the “motor” and “premotor” areas. *Brain*, 58(2), 311–316. <https://dx.doi.org/10.1093/brain/58.2.311>.
- Fuson, K. (1984). More complexities in subtraction. *Journal for Research in Mathematics Education*, 15(3), 214–225. <https://dx.doi.org/10.2307/748350>.
- Galton, F. (1880). Visualised numerals. *Nature*, 21(533), 252–256. <https://dx.doi.org/10.1038/021252a0>.
- Garrouste-Orgeas, M., Troché, G., Azoulay, E., Caubel, A., de Lassence, A., Cheval, C., ... Timsit, J.-F. (2004). Body mass index. An additional prognostic factor in ICU patients. *Intensive Care Medicine*, 30(3), 437–443. <https://dx.doi.org/10.1007/s00134-003-2095-2>.
- Genon, S., Li, H., Fan, L., Müller, V. I., Cieslik, E. C., Hoffstaedter, F., ..., & Eickhoff, S. B. (2017). The Right Dorsal Premotor Mosaic: Organization, Functions, and Connectivity. *Cerebral Cortex*, 27(3), 2095–2110. <https://dx.doi.org/10.1093/cercor/bhw065>.
- Goldin-Meadow, S., & Beilock, S. (2010). Action’s influence on thought: The case of gesture. *Perspectives on Psychological Science*, 5(6), 664–674. <https://dx.doi.org/10.1177/1745691610388764>.
- Goldin-Meadow, S., Cook, S. W., & Mitchell, Z. A. (2009). Gesturing gives children new ideas about math. *Psychological Science*, 20(3), 267–272. <https://dx.doi.org/10.1111/j.1467-9280.2009.02297.x>.
- Gonzalez, E. G., & Kolers, P. A. (1982). Mental manipulation of arithmetic symbols. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 8(4), 308–319. <https://dx.doi.org/10.1037/0278-7393.8.4.308>.

- Gonzalez, E. G., & Kolars, P. A. (1987). Notational constraints on mental operations. In G. Deloche & X. Seron (Eds.), *Mathematical disabilities: A cognitive neuropsychological perspective* (pp. 27–42). Hillsdale, NJ, US: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Gracia-Bafalluy, M., & Noël, M.-P. (2008). Does finger training increase young children's numerical performance? *Cortex*, *44*(4), 368–375.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.cortex.2007.08.020>.
- Guedin, N., Thevenot, C., & Fayol, M. (2017). Des doigts et des nombres. *Psychologie Française*, *63*(4), 379-399. <https://dx.doi.org/10.1016/j.psfr.2017.07.001>.
- Hanakawa T, Honda M, Okada T, Sawamoto N, Fukuyama H, Konishi J, & Shibasaki H (1999). Involvement of network for visuomotor control during mental calculation in Japanese abacus experts. *Society for Neuroscience Abstract* 25, 1893.
- Hanakawa, T. (2011). Rostral premotor cortex as a gateway between motor and cognitive networks. *Neuroscience Research*, *70*, 144–154.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.neures.2011.02.010>.
- Hanakawa, T., Honda, M., Okada, T., Fukuyama, H., & Shibasaki, T. (2003). Neural correlates underlying mental calculation in abacus experts: a functional magnetic resonance imaging study. *NeuroImage* *19*, 296-307. [https://dx.doi.org/10.1016/S1053-8119\(03\)00050-8](https://dx.doi.org/10.1016/S1053-8119(03)00050-8).
- Hanakawa, T., Honda, M., Sawamoto, N., Okada, T., Yonekura, Y., Fukuyama, H., & Shibasaki, H. (2002). The role of rostral Brodmann area 6 in mental-operation tasks: An integrative neuroimaging approach. *Cerebral Cortex*, *12*(11), 1157–1170.
<https://dx.doi.org/10.1093/cercor/12.11.1157>.
- Hartmann, M., Grabherr, L., & Mast, F. W. (2012). Moving along the mental number line: Interactions between whole-body motion and numerical cognition. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, *38*(6), 1416–1427.
<https://dx.doi.org/10.1037/a0026706>.
- Hatano, G., & Osawa, K. (1983). Digit Memory of Grand Experts in Abacus-Derived Mental Calculation. *Cognition*, *15*(1–3), 95–110. [http://dx.doi.org/10.1016/0010-0277\(83\)90035-5](http://dx.doi.org/10.1016/0010-0277(83)90035-5).
- Hubbard, E. M., Piazza, M., Pinel, P., & Dehaene, S. (2005). Interactions between number and space in parietal cortex. *Nature Reviews, Neuroscience*, *6*(6), 435–448.
<https://dx.doi.org/10.1038/nrn1684>.
- Ifrah, G. (1981). *Histoire universelle des chiffres*. Paris : Seghers.
- Imbo, I., Vandierendonck, A., & Fias, W. (2011). Passive hand movements disrupt adults' counting strategies. *Frontiers in Psychology*, *2*, 201.
<https://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00201>.

- Jordan, N. C., Kaplan, D., Ramineni, C., & Locuniak, M. N. (2008). Development of number combination skill in the early school years: when do fingers help? *Developmental Science*, *11*(5), 662–668. <https://dx.doi.org/10.1111/j.1467-7687.2008.00715.x>.
- Katz, C., & Knops, A. (2014). Operational Momentum in Multiplication and Division? *PLoS ONE*, *9*(8). <https://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0104777>.
- Kaufmann, L., Pixner, S., & Göbel, S. M. (2011). Finger usage and arithmetic in adults with math difficulties: Evidence from a case report. *Frontiers in Psychology*, *2*, 254. <https://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00254>.
- Kaufmann, S., & Wessolowski, S. (2006). *Rechenstörungen. Diagnose und Förderbausteine*. Seelze: Friedrich Verlag.
- Knops, A., Dehaene, S., Berteletti, I., & Zorzi, M. (2014). Can approximate mental calculation account for operational momentum in addition and subtraction? *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *67*(8), 1541–1556. <https://dx.doi.org/10.1080/17470218.2014.890234>.
- Krajcsi, A., Lengyel, G., & Kojouharova, P. (2018). Symbolic Number Comparison Is Not Processed by the Analog Number System: Different Symbolic and Non-symbolic Numerical Distance and Size Effects. *Frontiers in Psychology*, *9*, 124. <https://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00124>.
- Krauthausen, G., and Scherer, P. (2001). *Einführung in die Mathematik didaktik* Heidelberg: Spektrum.
- Landerl, K. (2013). Development of numerical processing in children with typical and dyscalculic arithmetic skills – A longitudinal study. *Frontiers in Psychology*, *4*, 459. <https://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00459>.
- LeFevre, J.-A., Skwarchuk, S.-L., Smith-Chant, B. L., Fast, L., Kamavar, D., & Bisanz, J. (2009). Home numeracy experiences and children’s math performance in the early school years. *Canadian Journal of Behavioural Science / Revue Canadienne des Sciences du Comportement*, *41*(2), 55-66. <https://dx.doi.org/10.1037/a0014532>.
- Li, M., Liu, D., Li, M., Dong, W., Huang, Y., & Chen, Q. (2018). Addition and Subtraction but Not Multiplication and Division Cause Shifts of Spatial Attention. *Frontiers in Human Neuroscience*, *12*, 183. <https://dx.doi.org/10.3389/fnhum.2018.00183>.
- Lindemann, O., Abolafia, J. M., Girardi, G., & Bekkering, H. (2007). Getting a grip on numbers: numerical magnitude priming in object grasping. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, *33*(6), 1400–1409. <https://dx.doi.org/10.1037/0096-1523.33.6.1400>.
- Lindemann, O., Alipour, A., & Fischer, M. H. (2011). Finger counting habits in middle eastern and western individuals: An online survey. *Journal of Cross-Cultural Psychology*, *42*(4), 566-578. <https://dx.doi.org/0022022111406254>.

- Loetscher, T., & Brugger, P. (2007). A disengagement deficit in representational space. *Neuropsychologia*, 45(6), 1299–1304. <https://dx.doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.09.020>
- Loetscher, T., Schwarz, U., Schubiger, M., & Brugger, P. (2008). Head turns bias the brain's internal random generator. *Current Biology*: 18(2), 60-62. <https://dx.doi.org/10.1016/j.cub.2007.11.015>.
- Logie, R. H., & Baddeley, A. D. (1987). Cognitive processes in counting. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 13(2), 310–326. <https://dx.doi.org/10.1037/0278-7393.13.2.310>.
- Lugli, L., Baroni, G., Anelli, F., Borghi, A. M., & Nicoletti, R. (2013). Counting Is Easier while Experiencing a Congruent Motion. *PLoS ONE*, 8(5). <https://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0064500>.
- Marghetis, T., Núñez, R., & Bergen, B. K. (2014). Doing arithmetic by hand: hand movements during exact arithmetic reveal systematic, dynamic spatial processing. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 67(8), 1579–1596. <https://dx.doi.org/10.1080/17470218.2014.897359>.
- Marinthe, C., Fayol, M., & Barrouillet, P. (2001). Gnosies digitales et développement des performances arithmétiques. In A. Van Hout & C. Meljac (Eds.), *Troubles Du Calcul et Dyscalculies Chez l'Enfant* (pp. 239–254). Paris: Masson.
- Marsh, L. G., & Maki, R. H. (1976). Efficiency of arithmetic operations in bilinguals as a function of language. *Memory & Cognition*, 4(4), 459–464. <https://dx.doi.org/10.3758/BF03213203>.
- Masson, N., Letesson, C., & Pesenti, M. (2018). Time course of overt attentional shifts in mental arithmetic: Evidence from gaze metrics. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 71(4), 1009–1019. <https://dx.doi.org/10.1080/17470218.2017.1318931>.
- Maulder, P., & Cronin, J. (2005). Horizontal and vertical jump assessment: reliability, symmetry, discriminative and predictive ability. *Physical Therapy in Sport*, 6(2), 74–82. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ptsp.2005.01.001>.
- McClain, L., & Huang, J. Y. S. (1982). Speed of simple arithmetic in bilinguals. *Memory & Cognition*, 10(6), 591–596. <https://dx.doi.org/10.3758/BF03202441>.
- McCloskey, M. (1992). Cognitive mechanisms in numerical processing: evidence from acquired dyscalculia. *Cognition*, 44(1–2), 107–157. [https://dx.doi.org/10.1016/0010-0277\(92\)90052-J](https://dx.doi.org/10.1016/0010-0277(92)90052-J).
- McCloskey, M., Caramazza, A., & Basili, A. (1985). Cognitive mechanisms in number processing and calculation: evidence from dyscalculia. *Brain and Cognition*, 4(2), 171–196. [https://dx.doi.org/10.1016/0278-2626\(85\)90069-7](https://dx.doi.org/10.1016/0278-2626(85)90069-7).
- McCloskey, M., Sokol, S. M., & Goodman, R. A. (1986). Cognitive processes in verbal-number production: Inferences from the performance of brain-damaged subjects.

- Journal of Experimental Psychology: General*, 115(4), 307-330.
<http://dx.doi.org/10.1037/0096-3445.115.4.307>.
- Michaux, N., Masson, N., Pesenti, M., & Andres, M. (2013). Selective interference of finger movements on basic addition and subtraction problem solving. *Experimental Psychology*, 60(3), 197–205. <https://dx.doi.org/10.1027/1618-3169/a000188>.
- Michels, L., O’Gorman, R., & Kucian, K. (2018). Functional hyperconnectivity vanishes in children with developmental dyscalculia after numerical intervention. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 30, 291-303. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dcn.2017.03.005>.
- Mihailoff, G. A., & Haines, D. E. (2018). Motor System II: Corticofugal Systems and the Control of Movement. In D. E. Haines, & G. A. Mihailoff (Eds.), *Fundamental neuroscience for basic and clinical applications*, 5th edition (pp. 360-376). Philadelphia, P.A.: Elsevier. <https://dx.doi.org/10.1016/C2014-0-03718-5>.
- Miller, C. J., & Hynd, G. W. (2004). What Ever Happened to Developmental Gerstmann’s Syndrome? Links to Other Pediatric, Genetic, and Neurodevelopmental Syndromes. *Journal of Child Neurology*, 19(4), 282–289.
<https://dx.doi.org/10.1177/088307380401900408>.
- Moeller, K., Fischer, U., Link, T., Wasner, M., Huber, S., Cress, U., & Nuerk, H.-C. (2012). Learning and development of embodied numerosity. *Cognitive Processing*, 13, Suppl 1, 271-274. <https://dx.doi.org/10.1007/s10339-012-0457-9>.
- Moeller, K., Martignon, L., Wessolowski, S., Engel, J., & Nuerk, H.-C. (2011). Effects of finger counting on numerical development - the opposing views of neurocognition and mathematics education. *Frontiers in Psychology*, 2, 328.
<https://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00328>.
- Moeller, K., Willmes, K., & Klein, E. (2015). A review on functional and structural brain connectivity in numerical cognition. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9, 227.
<https://dx.doi.org/10.3389/fnhum.2015.00227>.
- Morrissey, K. R., Liu, M., Kang, J., Hallett, D., & Wang, Q. (2016). Cross-cultural and intra-cultural differences in finger-counting habits and number magnitude processing: Embodied numerosity in Canadian and Chinese university students. *Journal of Numerical Cognition*, 2 (1), 1–19. <https://dx.doi.org/10.5964/jnc.v2i1.14>.
- Morsanyi, K., O’Mahony, E., & McCormack, T. (2017). Number comparison and number ordering as predictors of arithmetic performance in adults: Exploring the link between the two skills, and investigating the question of domain-specificity. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 70(12), 2497–2517.
<https://dx.doi.org/10.1080/17470218.2016.1246577>.
- Moyer, R. S., & Landauer, T. K. (1967). Time required for judgements of numerical inequality. *Nature*, 215(5109), 1519–1520. <http://dx.doi.org/10.1038/2151519a0>.
- Myers, T., & Szűcs, D. (2015). Arithmetic Memory Is Modality Specific. *PloS ONE*, 10(12), e0145614. <https://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0145614>.

- Namdar, G., & Ganel, T. (2017). Numerical magnitude affects online execution, and not planning of visuomotor control. *Psychological Research*, 82(3), 488-495. <https://dx.doi.org/10.1007/s00426-016-0837-3>.
- Nazir, T. A., Boulenger, V., Roy, A., Silber, B., Jeannerod, M., & Paulignan, Y. (2008). Language-induced motor perturbations during the execution of a reaching movement. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 61(6), 933-943. <https://dx.doi.org/10.1080/17470210701625667>.
- Newman, S. D. (2016). Does finger sense predict addition performance? *Cognitive Processing*, 17(2), 139-146. <https://dx.doi.org/10.1007/s10339-016-0756-7>.
- Nieder, A., & Dehaene, S. (2009). Representation of number in the brain. *Annual Review of Neuroscience*, 32, 185-208. <https://dx.doi.org/10.1146/annurev.neuro.051508.135550>.
- Noël, M.-P. (2005). Finger gnosis: a predictor of numerical abilities in children? *Child Neuropsychology*, 11(5), 413-430. <https://dx.doi.org/10.1080/09297040590951550>.
- Noel, M.-P., & Seron, X. (1993). Arabic number reading deficit: A single case study or when 236 is read (2306) and judged superior to 1258. *Cognitive Neuropsychology*, 10(4), 317-339. <https://dx.doi.org/10.1080/02643299308253467>.
- Nuerk, H.-C., Wood, G., & Willmes, K. (2005). The universal SNARC effect: the association between number magnitude and space is amodal. *Experimental Psychology*, 52(3), 187-194. <https://dx.doi.org/10.1027/1618-3169.52.3.187>.
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1), 97-113. [https://dx.doi.org/10.1016/0028-3932\(71\)90067-4](https://dx.doi.org/10.1016/0028-3932(71)90067-4).
- Opfer, J. E., & Thompson, C. A. (2008). The trouble with transfer: insights from microgenetic changes in the representation of numerical magnitude. *Child Development*, 79(3), 788-804. <https://dx.doi.org/10.1111/j.1467-8624.2008.01158.x>.
- Orban, G. A., & Caruana, F. (2014). The neural basis of human tool use. *Frontiers in Psychology*, 5, 310. <https://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00310>.
- Özçalışkan, Ş., Adamson, L. B., & Dimitrova, N. (2016). Early deictic but not other gestures predict later vocabulary in both typical development and autism. *Autism: The International Journal of Research and Practice*, 20(6), 754-763. <https://dx.doi.org/10.1177/1362361315605921>.
- Pacioli, L. (1494). *Summa de Arithmetica Geometria. Proportioni et Proportionalita*. Paganino de' Paganini:Venise.
- Penfield, W., & Boldrey, E. (1937). Somatic motor and sensory representation in the cerebral cortex of man as studied by electrical stimulation. *Brain*, 60(4), 389-443. <https://dx.doi.org/10.1093/brain/60.4.389>.

- Penner-Wilger, M., Waring, R. J., & Newton, A. T. (2014). Subitizing and finger gnosis predict calculation fluency in adults. In P. Bello, M. Guarini, M. McShane, & B. Scassellati (Eds.). *CogSci 2014. Proceedings of the 36th Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 1150–1155). Austin, TX: Cognitive Science Society.
- Piazza, M., Fumarola, A., Chinello, A., & Melcher, D. (2011). Subitizing reflects visuo-spatial object individuation capacity. *Cognition*, *12*(1), 147-153. <https://dx.doi.org/10.1016/j.cognition.2011.05.007>.
- Ping, R., & Goldin-Meadow, S. (2010). Gesturing saves cognitive resources when talking about nonpresent objects. *Cognitive Science*, *34*(4), 602–619. <https://dx.doi.org/10.1111/j.1551-6709.2010.01102.x>.
- Pinhas, M., & Fischer, M. H. (2008). Mental movements without magnitude? A study of spatial biases in symbolic arithmetic. *Cognition*, *109*(3), 408–415. <https://dx.doi.org/10.1016/j.cognition.2008.09.003>.
- Pinhas, M., Shaki, S., & Fischer, M. H. (2014). Heed the signs: Operation signs have spatial associations. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *67*(8), 1527–1540. <https://dx.doi.org/10.1080/17470218.2014.892516>.
- Pinheiro, J. C., & Bates D. M. (2000). *Mixed-effects models in S and S-PLUS*. New York: Springer-V erlag
- Pressman, P., & J. Rosen, H. (2015). Disorders of Frontal Lobe Function. In M. J. Zigmond, L. P. Rowland, & J. T. Coyle (Eds.), *Neurobiology of Brain Disorders, Biological Basis of Neurological and Psychiatric Disorders* (pp. 542–557). Cambridge, MA: Academic Press. <https://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-398270-4.00033-1>.
- Previtali, P., Rinaldi, L., & Girelli, L. (2011). Nature or nurture in finger counting: A review on the determinants of the direction of number-finger mapping. *Frontiers in Psychology*, *2*, 363. <https://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00363>.
- R Core Team (2017). *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing <https://www.R-project.org/>.
- Rabahi, T., Fargier, P., Rifai Sarraj, A., Clouzeau, C., & Massarelli, R. (2013). Effect of action verbs on the performance of a complex movement. *PloS ONE*, *8*(7), e68687. <https://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0068687>.
- Ramani, G. B., & Siegler, R. S. (2008). Promoting broad and stable improvements in low-income children’s numerical knowledge through playing number board games. *Child Development*, *79*(2), 375–394. <https://dx.doi.org/10.1111/j.1467-8624.2007.0&131.x>.
- Reeve, R., & Humberstone, J. (2011). Five- to 7-year-olds’ finger gnosis and calculation abilities. *Frontiers in Psychology*, *2*, 359. <https://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00359>.
- Restle, F. (1970). Speed of adding and comparing numbers. *Journal of Experimental Psychology*, *83*(2), 274–278. <https://dx.doi.org/10.1037/h0028573>.

- Rugani, R., Betti, S., Ceccarini, F., & Sartori, L. (2017). Act on Numbers: Numerical Magnitude Influences Selection and Kinematics of Finger Movement. *Frontiers in Psychology*, 8, 1481. <https://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01481>.
- Sanders, R. H., & Wilson, B. D. (1992). Modification of movement patterns to accommodate to a change in surface compliance in a drop jumping task. *Human Movement Science*, 11(5), 593–614. [https://dx.doi.org/10.1016/0167-9457\(92\)90017-6](https://dx.doi.org/10.1016/0167-9457(92)90017-6).
- Sargent, D. A. (1921). The physical test of a man. *American Physical Education Review*, 26(4), 188–194. <https://dx.doi.org/10.1080/23267224.1921.10650486>.
- Sargent, L. W. (1924). Some Observations on the Sargent Test of Neuromuscular Efficiency. *American Physical Education Review*, 29(2), 47–56. <https://dx.doi.org/10.1080/23267224.1924.10652218>.
- Sato, M., Cattaneo, L., Rizzolatti, G., & Gallese, V. (2007). Numbers within our hands: modulation of corticospinal excitability of hand muscles during numerical judgment. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19(4), 697–693. <https://dx.doi.org/10.1162/jocn.2007.19.4.684>.
- Schwarz, W., & Keus, I. M. (2004). Moving the eyes along the mental number line: comparing SNARC effects with saccadic and manual responses. *Perception & Psychophysics*, 66(4), 651–664. <https://dx.doi.org/10.3758/bf03194909>.
- Shaki, S., & Fischer, M. H. (2017). Competing Biases in Mental Arithmetic: When Division Is More and Multiplication Is Less. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11, 37. <https://dx.doi.org/10.3389/fnhum.2017.00037>.
- Siegler, R. S., & Booth, J. L. (2004). Development of numerical estimation in young children. *Child Development*, 75(2), 428–444. <https://dx.doi.org/10.1111/j.1467-8624.2004.00684.x>.
- Singer, H. D., & Low, A. A. (1933). Acalculia. *Archives of Neurology and Psychiatry*, 29, 467–498. <https://dx.doi.org/10.1001/archneurpsyc.1933.02240090037003>.
- Skagerlund, K., Karlsson, T., & Träff, U. (2016). Magnitude Processing in the Brain: An fMRI Study of Time, Space, and Numerosity as a Shared Cortical System. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10:500. <https://dx.doi.org/10.3389/fnhum.2016.00500>.
- Sokol, S. M., McCloskey, M., Cohen, N. J., & Alimonsa, D. (1991). Cognitive representations and processes in arithmetic: inferences from the performance of brain-damaged subjects. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 17(3), 355–376. <http://dx.doi.org/10.1037/0278-7393.17.3.355>.
- Song, J.-H., & Nakayama, K. (2008). Numeric comparison in a visually-guided manual reaching task. *Cognition*, 106(2), 994–1003. <https://dx.doi.org/10.1016/j.cognition.2007.03.014>.

- Soylu, F., Lester, F. K., Jr., & Newman, S. D. (2018). You can count on your fingers: The role of fingers in early mathematical development. *Journal of Numerical Cognition*, 4, 107–135. <https://dx.doi.org/10.5964/jnc.v4i1.85>.
- Soylu, F., Raymond, D., Gutierrez, A., & Newman, S. D. (2018). The Differential Relationship Between Finger Gnosis, and Addition and Subtraction: An fMRI Study. *Journal of Numerical Cognition*, 3(3), 694–715. <https://dx.doi.org/10.5964/jnc.v3i3.102>.
- Starkey, P., Klein, A., & Wakeley, A. (2004). Enhancing young children's mathematical knowledge through a pre-kindergarten mathematics intervention. *Early Childhood Research Quarterly*, 19(1), 99-120. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ecresq.2004.01.002>.
- Szucs, D., & Csépe, V. (2004). Access to numerical information is dependent on the modality of stimulus presentation in mental addition: a combined ERP and behavioral study. *Brain Research. Cognitive Brain Research*, 19(1), 10–27. <https://dx.doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2003.11.002>.
- Thevenot, C., Castel, C., Fanget, M., & Fayol, M. (2010). Mental subtraction in high- and lower skilled arithmetic problem solvers: verbal report versus operand-recognition paradigms. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 36(5), 1242–1255. <https://dx.doi.org/10.1037/a0020447>.
- Thompson, C. A., & Opfer, J. E. (2010). How 15 hundred is like 15 cherries: effect of progressive alignment on representational changes in numerical cognition. *Child Development*, 81(6), 1768–1786. <https://dx.doi.org/10.1111/j.1467-8624.2010.01509.x>.
- Tschentscher, N., & Hauk, O. (2014). How are things adding up? Neural differences between arithmetic operations are due to general problem solving strategies. *NeuroImage*, 92, 369–380. <https://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2014.01.061>.
- Tschentscher, N., Hauk, O., Fischer, M. H., & Pulvermüller, F. (2012). You can count on the motor cortex: Finger counting habits modulate motor cortex activation evoked by numbers. *NeuroImage*, 59, 3139–3148. <https://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.11.037>.
- Van Rooijen, M., Verhoeven, L., Smits, D.-W., Ketelaar, M., Becher, J. G., & Steenberg, B. (2012). Arithmetic performance of children with cerebral palsy: The influence of cognitive and motor factors. *Research in Developmental Disabilities*, 33(2), 530–537. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ridd.2011.10.020>.
- Verguts, T., & Fias, W. (2005). Interacting neighbors: a connectionist model of retrieval in single-digit multiplication. *Memory & Cognition*, 33, 1–16. <https://dx.doi.org/10.3758/BF03195293>.
- Warrington, E. K. (1982). The fractionation of arithmetical skills: a single case study. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 34A(1), 31–51. <http://dx.doi.org/10.1080/14640748208400856>.

- Wasner, M., Moeller, K., Fischer, M. H., & Nuerk, H.-C. (2014). Aspects of situated cognition in embodied numerosity: The case of finger counting. *Cognitive Processing*, *15*(3), 317-328. <https://dx.doi.org/10.1007/s10339-014-0599-z>.
- Wasner, M., Nuerk, H.-C., Martignon, L., Roesch, S., & Moeller, K. (2016). Finger gnosis predicts a unique but small part of variance in initial arithmetic performance. *Journal of Experimental Child Psychology*, *146*, 1–16. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jecp.2016.01.006>.
- Wiemers, M., Bekkering, H., & Lindemann, O. (2014). Spatial interferences in mental arithmetic: Evidence from the motion-arithmetic compatibility effect. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *67*(8), 1557–1570. <https://dx.doi.org/10.1080/17470218.2014.889180>.
- Wiesendanger, M., Wicki, U., & Rouiller, E. (1994). Are there unifying structures in the brain responsible for interlimb coordination? In S. P. Swinnen, H. Heuer, J. Massion, & P. Casaer (Eds.), *Interlimb coordination: Neural, dynamical, and cognitive constraints* (pp. 179–207). San Diego, CA, US: Academic Press. <https://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-679270-6.50014-0>.
- Winter, B., & Matlock, T. (2013). More is up... and right: Random number generation along two axes. In M. Knauff, M. Pauen, N. Sebanz, & I. Wachsmuth (Eds.), *CogSci 2013. Proceedings of the 35th Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 3789-3974). Austin, TX: Cognitive Science Society.
- Wise, S. P. (2001). Motor cortex. In M. J. Smelser, & P. B. Baltes (Eds.), *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences* (pp. 10137–10140). Oxford: Pergamon Press.
- Wood, G., Willmes, K., Nuerk, H.-C., & Fischer, M. H. (2008). On the cognitive link between space and number: A meta-analysis of the SNARC effect. *Psychology Science Quarterly*, *50*(4), 489–525.
- Yanuarto, W. N. (2017). How a brain says: Fingermath for empowering children's creativity. *Journal of Education and Learning (EduLearn)*, *11*(4), 404–409. <https://dx.doi.org/10.11591/edulearn.v11i4.4558>.
- Yeo, B. T., Krienen, F. M., Sepulcre, J., Sabuncu, M. R., Lashkari, D., Hollinshead, M., ..., & Buckner, R. L. (2011). The organization of the human cerebral cortex estimated by intrinsic functional connectivity. *Journal of Neurophysiology*, *106*(3), 1125–1165. <https://dx.doi.org/10.1152/jn.00338.2011>.
- Young, C. J., & Opfer, J. E. (2011). Psychophysics of numerical representation: A unified approach to single- and multi-digit magnitude estimation. *Zeitschrift Für Psychologie / Journal of Psychology*, *219*(1), 58–63. <https://dx.doi.org/10.1027/2151-2604/a000047>.
- Zhao, Y., Li, Z., Yang, T., Wang, M., & Xi, X. (2018). Is body mass index associated with outcomes of mechanically ventilated adult patients in intensive critical units? A systematic review and meta-analysis. *PLoS ONE*, *13*(6), e0198669. <https://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0198669>.

Zebian, S. (2005). Linkages between number concepts, spatial thinking, and directionality of writing: The SNARC effect and the REVERSE SNARC effect in English and Arabic monoliterates, biliterates, and illiterate Arabic speakers. *Journal of Cognition and Culture*, 5(1–2), 165–190. <https://dx.doi.org/10.1163/1568537054068660>.

Zhou, X., Chen, C., Chen, L., & Dong, Q. (2008). Holistic or compositional representation of two-digit numbers? Evidence from the distance, magnitude, and SNARC effects in a number-matching task. *Cognition*, 106(3), 1525–1536. <https://dx.doi.org/10.1016/j.cognition.2007.06.003>.

PUBLICATIONS

Publication 1

Khayat, J., Champely, S., Diab, A., Rifai Sarraj, A., & Fargier, P. (2019). Effect of mental calculus on the performance of complex movements. *Human Movement Science*, 66, 347-354. <https://dx.doi.org/10.1016/j.humov.2019.05.008>.



Contents lists available at ScienceDirect

Human Movement Science

journal homepage: www.elsevier.com/locate/humov

Effect of mental calculus on the performance of complex movements

Joy Khayat^a, Stéphane Champely^b, Ahmad Diab^a, Ahmad Rifai Sarraj^a,
Patrick Fargier^{c,*}

^a Lebanese University, Rafic Hariri Campus, Faculty of Public Health, Lebanon

^b Université de Lyon, Université Lyon 1, LVIS – EA 7428, SFR CRIS – FED 4272, 69 622 Villeurbanne Cedex, France

^c Université de Lyon, Université Lyon 1, LIBM – EA 7424, SFR CRIS – FED 4272, 69 622 Villeurbanne Cedex, France

1. Introduction

Several everyday activities require the mental computation of arithmetical calculations. For example, a subtraction may be useful for determining the exact amount of money remaining after a purchase or the remaining time before the beginning of a scheduled activity. Mental calculation is included in school curricula and as a consequence it is also a topic of interest for educational research (e.g. Fuson, 1984). Several authors have also aimed at understanding the neurofunctional mechanisms of mental arithmetic (e.g. Arsalidou & Taylor, 2011; Arsalidou, Pawliw-Levac, Sadeghi, & Pascual-Leone, 2018) and the neural bases of dyscalculia (e.g. Butterworth, 2010; Butterworth, Varma, & Laurillard, 2011).

These studies have suggested the possible involvement of the same cerebral mechanisms during both mental calculation and movement preparation. A possibility that is consistent with the hypothesis that any conceptual representation is grounded to sensorimotor experience (Barsalou, 2008, 2010; Wiemers, Bekkering, & Lindemann, 2014). This might explain the use of fingers to learn simple arithmetic operations, as it has been observed among children of different cultures (e.g. Previtali, Rinaldi, & Girelli, 2011). This might also explain the positive effect of training with an abacus on the performance of mental calculation (Hanakawa et al., 2002). These mechanisms learned from infancy may remain influential during calculation in adults (e.g. Moeller, Martignon, Wessolowski, Engel, & Nuerk, 2011).

This is supported by behavioral studies in the case of fingers where it was shown that finger gnosis (the ability to represent, differentiate and name the fingers, e.g. Ardila, Concha, & Rosselli, 2000) may predict the performance of arithmetical tasks in both children and adults (e.g. Newman, 2016; Noël, 2005; Penner-Wilger et al., 2007; Penner-Wilger, Waring, & Newton, 2014). This is consistent with neuroimaging studies that showed, in the brain cortex, a significant functional activation of finger somatosensory areas during both mental subtractions and multiplications performed without explicit movement by children (Berteletti & Booth, 2015) and adults (Andres, Michaux, & Pesenti, 2012). Berteletti and Booth (2015) also found significant functional activations of finger motor areas in children during mental subtraction. Similarly Hanakawa et al. (2002) found a significant activation of the dorsolateral Premotor Cortex in adults performing arithmetical additions (usually overlapping the Primary Motor area active during actual finger movements).

Spatial representations involved during mental calculation and during control of movement direction might also require similar cerebral attentional mechanisms. During mental calculation such representation of number space may lead to right- or upward and left- or downward attentional shifts (e.g. Knops, Viarouge, & Dehaene, 2009). This might interfere with the attentional control of movement direction, as it is supported by the study by Wiemers et al. (2014) showing the effect of the direction of arm motion on the performance of mental calculation. These authors found that the performance of subtraction tasks was impaired by right- and upward arm movements, while mental additions were impaired by left- and downward movements. Such effects were confirmed with up- and

* Corresponding author.

E-mail address: patrick.fargier@univ-lyon1.fr (P. Fargier).

<https://doi.org/10.1016/j.humov.2019.05.008>

Received 22 December 2018; Received in revised form 15 May 2019; Accepted 16 May 2019

0167-9457/ © 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.

downward passive motions of the whole body (Lugli, Baroni, Anelli, Borghi, & Nicoletti, 2013) and with right- and leftward walk (Anelli, Lugli, Baroni, Borghi, & Nicoletti, 2014), again during mental additions and subtractions.

Overall while both neuroimaging and behavioral studies have suggested a possible link between mental calculation and movement these studies did not consider the case of high-intensity movements and the influence of mental calculation upon the performance of a subsequent movement remained to be examined. To our knowledge only Rabahi, Fargier, Rifai Sarraj, Clouzeau, and Massarelli (2013) have produced results regarding this possible influence in the case of a complex movement (see Wulf & Shea, 2002) of squat vertical jump (SVJ) with maximal intensity. Rabahi et al. (2013) examined the possible effect of action verbs upon jump height in adult subjects and the results showed for example that SVJ height was higher after reading the verb «jump» than after watching a black screen (baseline). Different words were used as controls and mental subtraction as a control of attentional task. It was interestingly found that mental subtraction increased SVJ height almost as much as the verb “jump”, a result that required both confirmation and further examination.

The present study thus aimed at examining the respective influence, upon SVJ performance, of number processing (e.g. number viewing) and the application of operation rules (Arsalidou et al., 2018) as both are involved during mental subtraction. The present study also examined whether the effect of mental subtraction on SVJ performance is affected by the numerical format (i.e. numbers written in Arabic digits or numbers written as words) as Rabahi et al. (2013) considered the case of Arabic digits only. The possible influence of the numerical format was tested in the present study as studies on numerical cognition (e.g. Dehaene, 1992) have suggested that cerebral mechanisms involved in number processing and/or calculation may partly differ depending on the used numerical format.

In addition the investigation was extended to a simpler movement than SVJ, i.e. an upper limb motion (manual-pointing task, MPT), in accordance with previous studies suggesting a link between cognitive stimuli and motor performance (e.g. Boulenger et al., 2006, 2008; Nazir et al., 2008).

2. Materials and methods

The study was approved by the ethical committee of the AZM Center for Research in Biotechnology and its Application (Tripoli, Lebanon). The total number of subjects was of 161 undergraduate male students, from the Faculty of Public Health of the Lebanese University (Beyrouth, Lebanon). They further gave their written and informed consent. All subjects were healthy, had normal or corrected-to-normal vision and were English-speaking.

2.1. Experimental design

The possible effect of mental subtraction upon motor performance was studied in two separate series of experiments respectively concerning the performance of SVJ and MPT (named Series SVJ and Series MPT). Before each experiment the subjects were informed of the scope of the study and of the experimental tasks, but they were left unaware of possible effects of any stimulus used in the experimental protocol. In each experiment the subjects realized some warm-up trials and particularly of the movement performed during the experiment to obtain a correct performance of this movement. All of them were systematically asked to achieve the highest possible SVJ and to realize the MPT reaching movement as fast as possible.

After warm-up each subject performed three series of either six SVJs (Series SVJ), or six MPTs (Series MPT), each series of six being thereafter called a block (Fig. 1). Between two consecutive blocks there was a 3 mn rest. In each block the first three movements were performed without any previous cognitive task (subjects in front of a black screen during 10 s). The measured performance of the movements constituted a baseline. The three ensuing movements were performed after a cognitive task, i.e. each of them was performed after a mental subtraction or after reading loudly a number (during 10 s) or an action verb (specific to the movement realized in the experiment, i.e. “jump” in Series SVJ and “reach” in Series MPT; performed during 10 s). The latter was taken as control (see Rabahi et al., 2013). The blocks and the numerical stimuli inside a block were randomly assigned.

2.2. Series SVJ

The 101 subjects participating to this series of experiments were randomly distributed into three groups of 21, 40 and 40, forming respectively a control group and experimental groups 1 and 2. The mean age (years \pm SD) of the participants was respectively of 20.1 ± 1.7 , 20.1 ± 1.5 and 20.3 ± 1.5 and the mean body-mass index (BMI \pm SD in kg/m^2) was respectively 24 ± 1.0 , 24 ± 1.2 and 23.5 ± 1.0 (considered to be the normal BMI; e.g. Garrouste-Orgeas et al., 2004; Zhao, Li, Yang, Wang, & Xi, 2018).

2.2.1. Experimental procedure

The control experiment was done to check a possible effect of movement repetition on SVJ performance. This was performed according to the experimental protocol described in Fig. 1 (§ 2.1.) with the exception that no cognitive stimulus was given (subjects simply stood in front of a black screen). Experiments 1 and 2 were done also as described in Fig. 1 (§ 2.1.). In experiment 1, each number was written as word. The numbers to be read and the subtractions were respectively: (a) “four”, “seven” and “seventeen” and (b) “seventeen - eight”, “sixteen - nine” and “twelve - four” (only number notation differed between experiments 1 and 2 to verify the possible influence of the numerical format on motor performance). In experiment 2, the same numbers and mental subtractions as in experiment 1 were written in Arabic digits.

Each stimulus was written in white (Times New Roman, font size 96) and it was projected on a black wall. The image was 1.3 m in

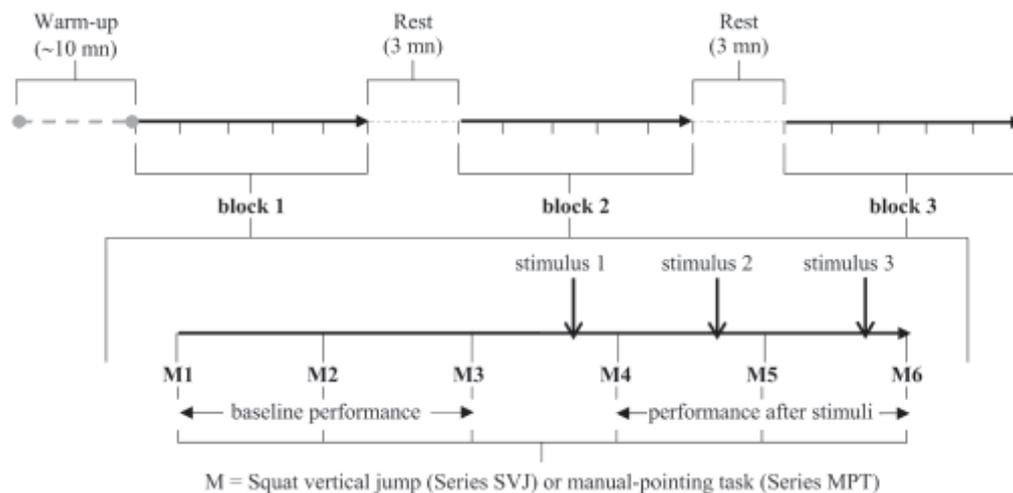


Fig. 1. Experimental protocol. Before the start of the experiment the subjects were requested to realize a warm-up during ~10 mn. They further performed three series of six movements ($M = SVJ$ in Series SVJ and MPT in Series MPT), i.e. three blocks of movements separated by 3 mn rest. Each block began by the realization of three movements (M1 to M3) without any previous cognitive task (subjects in front of a black screen during 10 s). The performance of these movements constituted a baseline. Each of the ensuing three movements was realized after a cognitive task, i.e. for each of M4 to M6: either after a mental subtraction, or after reading loudly a number during 10 s, or after reading loudly an action verb during 10 s (“jump” in Series SVJ, “reach” in Series MPT).

diagonal and the subjects stood at 3.5 m from the wall, in accordance with the specifications of the manufacturer (Optoma®/ThemeSceneH projector, 92,100 Boulogne-Billancourt, France).

2.2.2. Squat vertical jump

The jumps realized in Series SVJ were performed as described and analyzed by Fargier, Massarelli, Rabahi, Gemignani, and Fargier (2016). Jump height was determined by measuring the time of flight by an Optojump Next® apparatus (Microgate France, 38,330 St-Ismier) connected to a laptop.

2.3. Series MPT

The participants (a total number of 60 other subjects participated to these experiments of the MPT Series) were randomly distributed in three groups of 20 subjects, respectively forming a control group and experimental groups 3 and 4 similarly to Series SVJ.

The mean age (years \pm SD) of the participants to the control experiment and to the experiments 3 and 4 was respectively 20.1 ± 2.0 , 20.8 ± 1.8 and 20.2 ± 1.8 . The subjects were right handed as it was assessed by using the Edinburgh Inventory (Oldfield, 1971). The mean scores obtained with the Edinburgh Inventory (number of points \pm SD) of the participants to the control experiment and to experiments 3 and 4 were respectively of 78.1 ± 10.0 , 78.2 ± 9.8 and 72.9 ± 9.6 . All subjects declared a preference for the right handedness and performed MPT accordingly. The MPT measurement system was home-made and will be described in the following.

2.3.1. Manual-pointing task

Each subject sat on a chair behind a desk. In front of the subject two wooden parallelepipeds (5 cm in height each) were fixed one following the other upon the desk top board. The first parallelepiped was at a distance of 25 cm from the chest of the subject. At the center of the superior face of each parallelepiped a circular button was fixed. The distance between the centers of the two buttons was of 25 cm. During each cognitive task (Fig. 1, § 2.1.) the subjects were asked to touch the button fixed on the first parallelepiped with the index finger, the middle finger and the ring finger of the right hand. At the end of each cognitive task the subjects were required to press the button of the second parallelepiped as fast as possible.

2.3.2. Performance measurement

The beginning of the movement was determined by a three-axis accelerometer (Vernier®; 13,979 SW Millikan Way, Beaverton, OR 97005, USA) fixed on a mitten that each subject wore on the right hand. The Response Time (RT) was determined when the button on the distal parallelepiped was pressed. The acquisition and the analysis of the measures were made with a data acquisition card (DAQ®; data acquisition, National Instruments, 11,500 Mopac Expwy, Austin, Texas) connected to Labview® software [Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench 2009 (32-bit), National Instruments, Austin, Texas] and Matlab® script (Matlab R2016a, MathWorks incorporation, Natick, Massachusetts).

2.4. Statistical analysis

The data collected from each experiment were analyzed by using a multilevel linear mixed-effect model (Finch, Bolin, & Kelley, 2014; Pinheiro & Bates, 2000). The response variables in Series SVJ and MPT were respectively the height of jump (cm) and the RT (ms).

In each case three levels of variability were considered and represented by three nested random effects in the statistical model. The effect at the first level was the subject effect. The effect at the second level considered the performance of each series of three consecutive movements in the same experimental condition (see Fig. 1, § 2.1.). At the third level the effect was a residual effect, considering the individual performance in the same experimental condition. All nested random effects followed non-correlated normal distributions with zero expectation.

The data obtained from the control experiment of each Series were analyzed by considering two fixed-effect and the corresponding interaction. A block fixed-effect was examined to control a possible effect of block repetition (i.e. effect of fatigue or of training) during the experiments. An intra-block fixed-effect was also examined to allow a comparison of the two successive series of three movements (black wall) in the same block. Finally the interaction effect between block and intra-block was considered.

The absence of statistically significant intra-block and interaction effects would show the stability of the baseline. A statistically significant block effect would lead to check such possible effect during experiments 1–4. In any case the statistical analysis of the data of each of the experiments 1–4 aimed at examining a fixed-effect regarding the experimental conditions (see Fig. 1, § 2.1.), i.e. black screen (baseline), action verb reading, number reading and mental subtraction.

All multilevel linear mixed-effect models were fitted by using restricted maximum likelihood estimation (Pinheiro & Bates, 2000, p. 75). Fixed-effects were tested by using conditional F-tests (Pinheiro & Bates, 2000, p. 90) at the 5% level. The method of Bretz, Hothorn, and Westfall (2010) was used to carry out post-hoc tests (single-step method; family-wise error rate set at 5%). All computations were performed by using the R statistical software 3.4.3 (R Core Team, 2017) and the packages nlme, lme4, multcomp and effects.

3. Results

3.1. Series SVJ

In the SVJ control experiment the test of the block fixed-effect reached statistical significance ($F(2,100) = 3.61, p < .05$) suggesting that the repetition of three blocks of SVJs (see Fig. 1, § 2.1.) may influence jump height. From the first block to the third one SVJ heights in cm (mean \pm SD) were respectively: 28.97 ± 2.04 , 29.42 ± 1.85 and 29.31 ± 1.97 . All-pairwise comparisons showed that only the difference between the first and the second blocks was significant. Although this difference was only 0.45 cm, its statistical significance imposed to control a possible effect of blocks repetition in experiments 1 and 2. No intra-block fixed-effect (controlling a possible order effect of the two series of three jumps in the same block) and no interaction between block and intra-block were found with respectively: $F(1,100) = 2.06, p > .05$ and $F(2,100) = 1.00, p > .05$. As a consequence the mean baseline of each block of both experiments 1 and 2 was used as reference.

In both experiments 1 (numbers written as words) and 2 (numbers written in Arabic digits) no influence of block repetition (block fixed-effect) was found with respectively: $F(2,195) = 0.29, p > .05$ and $F(2,195) = 0.65, p > .05$. The condition (cognitive tasks) effect reached statistical significance with respectively: $F(3,195) = 24.51, p < .001$ and $F(3,195) = 23.22, p < .001$ (see Fig. 2).

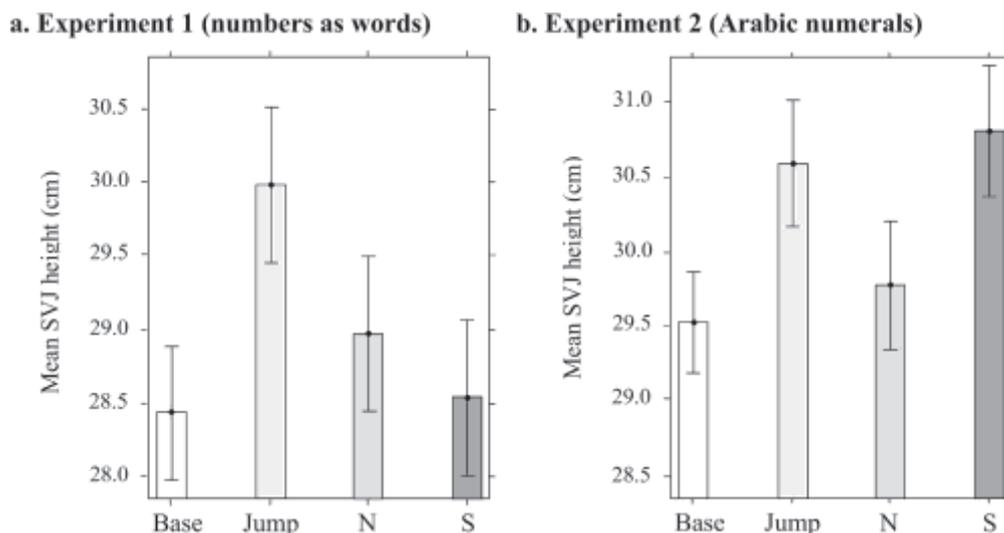


Fig. 2. Effect of cognitive tasks on SVJ height. The graphical display, called “effect plot” by Fox and Hong (2009), shows the adjusted mean heights of jump in SVJ after: watching a black screen (Base: baseline performance), reading the verb “jump” (Jump), reading a number (N) and mental subtraction (S). In experiments 1 (Fig. 2. a) and 2 (Fig. 2. b) the numbers were respectively written as words and in Arabic digits. The vertical bars indicate ± 0.95 confidence interval.

Regarding experiment 1 (numbers written as words; Fig. 2. a.) all-pairwise comparisons (Table 1. a.) showed that SVJ height was significantly higher (1.57 cm) after reading “jump” than in the baseline condition, $p < .001$. SVJ height was also significantly higher after reading a number written as word than in the baseline condition, $p < .05$. This difference was of 0.53 cm only and SVJ height after reading “jump” was significantly higher than SVJ height after numbers read as words, $p < .001$. In addition SVJ height after mental subtraction of numbers written as words was not significantly different than in the baseline condition, $p > .05$.

In experiment 2 (numbers written in Arabic digits; Fig. 2. b.) all-pairwise comparisons (Table 1. b.) showed again that SVJ height was higher after reading “jump” than in the baseline condition, $p < .001$. In contrast with experiment 1 (numbers written as words), in this experiment 2 it was found that SVJ height after reading a number written in Arabic digits was not significantly different than in the baseline condition, $p > .05$. It was also found that mental subtraction with numbers written in Arabic digits was higher than in the baseline condition, $p < .001$ and after the reading of a number written in Arabic digits, $p < .001$.

Table 1
All-pairwise comparisons in experiments 1 and 2.

Differences	a. Experiment 1 (numbers as words)			b. Experiment 2 (Arabic numerals)				
	Estim. (cm)	SE	z-score		Estim. (cm)	SE	z-score	
Jump - Base	1.57	0.19	8.36	***	1.06	0.18	5.98	***
N - Base	0.53	0.19	2.84	*	0.25	0.18	1.41	
S - Base	0.10	0.19	0.55		1.26	0.18	7.02	***
N - Jump	-1.04	0.23	-4.51	***	-0.81	0.22	-3.66	**
S - Jump	-1.47	0.23	-6.35	***	0.20	0.22	0.91	
S - N	-0.43	0.23	-1.86		1.01	0.22	4.48	***

The results of the multiple comparisons (pairwise comparisons) of SVJ heights among Base (baseline performance), Jump (jump height after reading the word “jump”), N (jump height after reading a number) and S (jump height after mental subtraction) are shown. The multiple comparisons were carried out using the method of Bretz et al. (2010) and the family-wise error rate was set at 5%. Regarding Estim. (Estimate, differences in cm) differences between two SE (standard error) may occur after the second decimal (for example in experiment 1 the SE for Jump - Base and N - Base are respectively 0.1877 and 0.1874). Regarding z-scores the adjusted p-values [single-step method; $p (> |z|)$] of the statistically significant differences are indicated by * = $p < .05$, ** = $p < .01$ and *** = $p < .001$.

3.2. Series MPT

In the control experiment no statistically significant effect of block repetition (block effect) was found, $F(2,59) = 1.19, p > .05$. However considering that a significant block effect was found in the control experiment of Series SVJ it was decided to check again such possible effect in the experiments 3 and 4 of Series MPT. Similarly to the control experiment of Series SVJ the control experiment of Series MPT showed no statistically significant intra-block effect and interaction effect between block and intra-block. As a consequence the mean baseline of each block of both experiments 3 and 4 was used as reference.

In both experiments 3 (numbers written as words) and 4 (numbers written in Arabic digits) no influence of block repetition (block fixed-effect) was found with respectively: $F(2,59) = 2.56, p > .05$ and $F(2,59) = 0.41, p > .05$, while the condition (cognitive tasks) effect was significant with respectively: $F(3,59) = 43.34, p < .001$ and $F(3,59) = 51.24, p < .001$ (see Fig. 3).

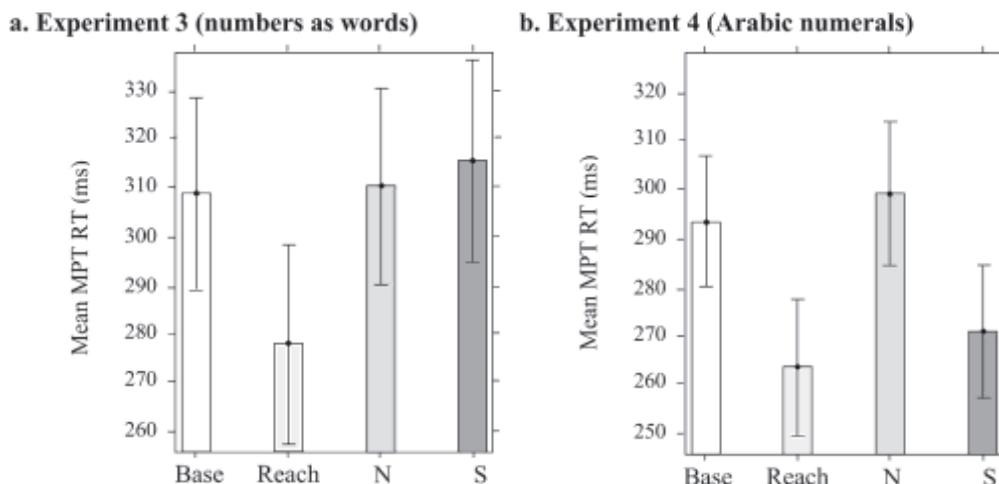


Fig. 3. Effect of cognitive tasks on MPT response time. The graphical display, called “effect plot” by Fox and Hong (2009), shows the mean response time (RT) in MPT after: watching a black screen (Base, baseline performance), reading the verb “reach” (Reach), reading a number (N) and mental subtraction (S). In experiments 3 (Fig. 3. a.) and 4 (Fig. 3. b.) the numbers were respectively written as words and in Arabic digits. The vertical bars indicate ± 0.95 confidence interval.

In experiment 3 (numbers written as words; Fig. 3. a.) all-pairwise comparisons (Table 2. a.) showed only the influence of reading the word “reach” upon MPT performance (RT) when compared to the baseline, $p < .001$. In addition the RT observed after reading “reach” was significantly faster than the RT measured after reading a number written as word and after mental subtraction with numbers written as words (Table 2.a).

In experiment 4 (numbers written in Arabic digits; Fig. 3. a.) all-pairwise comparisons (Table 2. b.) showed again that MPT RT was faster after reading “reach” than in the baseline condition, $p < .001$. Interestingly RT after reading a number written in Arabic digits was not significantly different than in the baseline while RT after mental subtraction with numbers written in Arabic digits was significantly faster than the baseline RT, $p < .001$. In addition the RTs after reading “reach” and after mental subtraction with numbers written in Arabic digits were significantly faster than the baseline RT and the RT after reading a number written in Arabic digits (Table 2. b.).

Table 2
All-pairwise comparisons in experiments 3 and 4.

Differences	a. Experiment 3 (numbers as words)			b. Experiment 4 (Arabic numerals)				
	Estim. (ms)	SE	z-score	Estim. (ms)	SE	z-score		
Reach - Base	-30.92	3.06	-10.09	***	-30.26	3.06	-9.88	***
N - Base	1.43	3.06	0.47		5.21	3.06	1.70	
S - Base	6.97	3.08	2.26		-22.91	3.06	-7.49	***
N - Reach	32.35	3.75	8.63	***	35.47	3.76	9.42	***
S - Reach	37.89	3.79	10.00	***	7.35	3.75	1.96	
S - N	5.55	3.79	1.46		-28.12	3.75	-7.50	***

The results of the multiple comparisons of MPT response times (RTs) among Base (baseline performance), Reach (RT after reading the word “reach”), N (RT after reading a number) and S (RT after mental subtraction) are shown. The multiple comparisons were carried out using the method of Bretz et al. (2010) and the family-wise error rate was set at 5%. Regarding Estim. (Estimate, differences in ms) differences between two SE (standard error) may occur after the second decimal. Regarding z-scores the adjusted p-values [single-step method; $p (> |z|)$] of the statistically significant differences are indicated by *** = $p < .001$.

4. Discussion

The aim of the present study was to examine the possible effect of mental subtraction on the performance of a complex movement of squat vertical jump with maximal intensity (SVJ) and of a manual-pointing task with maximal velocity (MPT). Two series of experiments, respectively including SVJ (Series SVJ) and MPT (Series MPT), examined this possible effect when numbers were written as words or in Arabic digits. Each experiment allowed comparisons among motor performance after viewing a black screen (baseline), reading a specific action verb (control), reading a number and after mental subtraction.

In each experiment of Series SVJ (experiments 1 and 2) the subjects performed higher SVJs after reading the word “jump” than in the baseline condition (see Fig. 2 and Table 1, § 3.1.) as it has been previously shown (Rabahi et al., 2013). In each experiment of Series MPT (experiments 3 and 4) the subjects also performed faster RTs after reading “reach” than in the baseline condition (see Fig. 3 and Table 2, § 3.2.). The present results thus confirmed the influence of reading a specific action verb on motor performance.

A statistically significant influence of number reading upon motor performance was in addition found in experiment 1 but not in experiments 2, 3 and 4. This influence, found in the case of SVJ and when numbers were written as words, was rather small as the performance of SVJ after number reading was only 0.53 cm higher than the baseline, $p < .05$ (see Table 1. a., § 3.1.). Especially so when considering that SVJ performance after reading the word “jump” was: 1.57 cm higher than the baseline, $p < .001$, and 1.04 cm higher than after reading a number written as word, $p < .001$ (see Table 1. a., § 3.1.). The present study thus shows that simple number reading may have either no effect, or a weak effect, on motor performance. It should be mentioned that previous results have shown indirectly that a link might exist between number processing and lateral and/or vertical movement, but a real motor performance was not actually measured (e.g. Loetscher, Schwarz, Schubiger, & Brugger, 2008; Winter & Matlock, 2013).

The main finding of the present study was that mental subtraction with numbers written in Arabic digits influenced both SVJ and MPT performance while mental subtraction with numbers written as words did not (see Tables 1, § 3.1., and 2, § 3.2.). After mental subtraction with Arabic digits the subjects performed SVJ 1.06 cm higher than the baseline, $p < .001$, and MPT RTs 30.26 ms faster than the baseline, $p < .001$.

The positive effect of mental subtraction with numbers written in Arabic digits upon SVJ performance confirmed the findings of Rabahi et al. (2013) and showed that such an effect on motor performance was not limited to a complex movement of SVJ as it also influenced the simpler MPT performance.

This effect might be linked to the difficulty level of the calculations to be done that were presented in a classical form (e.g. 12–4) and were of medium difficulty level according to Thevenot, Castel, Fanget, and Fayol (2010). The calculations may thus have fostered a feeling of accomplishment in the experimental undergraduate subjects possibly favoring their attentional control (Derakshan & Eysenck, 2009). On the other hand mental subtractions with numbers written as words were certainly unusual to the subjects increasing thus a state of anxiety that might hamper the stimulation effect of the subtractions on performance.

In the case of the more usual operation with Arabic digits the mental subtraction might instead have directed the subjects’ attention on the optimal path of movement in SVJ and MPT as the operation may involve a spatial representation of numbers oriented vertically (as in SVJ; e.g. Wiemers et al., 2014) or horizontally (as in MPT; e.g. Anelli et al., 2014).

However previous studies have suggested that the performance of a mental subtraction may be either impaired by upward movements (Lugli et al., 2013; Wiemers et al., 2014) or forward ones (Anelli et al., 2014), but only when they were performed concomitantly to the calculation. In the present study the subjects were initially aware of the movement that they would have to perform. They were also required to execute it with maximal intensity after mental calculation [contrary to the studies of Anelli et al. (2014), Lugli et al. (2013), and Wiemers et al. (2014)]. This might have favored, during calculation, a mental representation of numbers (see § 1.) in a spatial plane congruent with the plane in which the subsequent movement would be optimally executed (i.e. vertical plane in SVJ and horizontal plane in MPT).

Concerning the presentation of the operation with numbers written as Arabic digits or as words McCloskey and colleagues (e.g. McCloskey, 1992) have proposed a model in which numbers, regardless the numerical modality used to present them, are encoded into a unique abstract format to allow the mental calculation. Conversely Campbell and colleagues (e.g. Clark & Campbell, 1991) have proposed a model composed of a network of mechanisms specific to different modalities of number presentation each of them supporting number comprehension and calculation.

The results observed in the present study in this respect with Arabic and written numbers might only be explained, if interpreted with the McCloskey's model, by the influence of distinct encoding mechanisms of Arabic and of written numbers before calculation (see also Dehaene, 1992). Interpreted with the Campbell's model instead the present results might also be explained by the involvement of a memory specific for Arabic digits during calculation (see also Myers & Szűcs, 2015), differently located from the language areas of the brain.

In conclusion the present study showed that mental subtraction, rather than number reading, may influence SVJ and MPT performance when numbers are written in Arabic digits (and not when numbers are written as words). Mental subtractions of moderate difficulty presented in a usual format (i.e. Arabic digits) possibly led subjects to an emotional state favoring attention to elements relevant to perform SVJ and MPT. Among such elements attention to the optimal path of movement might have been favored by the spatial representation of numbers used to calculate. The influence of mental subtraction with Arabic digits on motor performance might also be linked to mechanisms of encoding and/or memorization specific to this numerical format. The results of the present study are in any case in accordance with neuroimaging studies showing an increased functional activation of the Premotor Cortex during calculation with Arabic digits (e.g. Hanakawa et al., 2002). Whether attention, numbers encoding and/or memorization might contribute to such activation remains an opened question.

Acknowledgment

The authors express their grateful thanks to Emeritus Professor Raphaël Massarelli for his key support in this study.

References

- Andres, M., Michaux, N., & Pesenti, M. (2015). Common substrate for mental arithmetic and finger representation in the parietal cortex. *NeuroImage*, 62(3), 1520–1528. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.05.047>.
- Anelli, F., Lugli, L., Baroni, G., Borghi, A. M., & Nicoletti, R. (2014). Walking boosts your performance in making additions and subtractions. *Frontiers in Psychology*, 5, 1459. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01459>.
- Ardila, A., Concha, M., & Rosselli, M. (2000). Angular gyrus syndrome revisited: Acalculia, finger agnosia, right-left disorientation and semantic aphasia. *Aphasiology*, 14(7), 743–754. <https://doi.org/10.1080/026870300410964>.
- Arsalidou, M., Pawliw-Levac, M., Sadeghi, M., & Pascual-Leone, J. (2018). Brain areas associated with numbers and calculations in children: Meta-analyses of fMRI studies. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 30, 239–250. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2017.08.002>.
- Arsalidou, M., & Taylor, M. J. (2011). Is $2 + 2 = 4$? Meta-analyses of brain areas needed for numbers and calculations. *NeuroImage*, 54(3), 2382–2393. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.10.009>.
- Barsalou, L. W. (2008). Grounded cognition. *Annual Review of Psychology*, 59, 617–645. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.59.103006.093639>.
- Barsalou, L. W. (2010). Grounded cognition: Past, present, and future. *Topics in Cognitive Science*, 2(4), 716–724. <https://doi.org/10.1111/j.1756-8765.2010.01115.x>.
- Berteletti, I., & Booth, J. R. (2015). Perceiving fingers in single-digit arithmetic problems. *Frontiers in Psychology*, 6, 226. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00226>.
- Boulenger, V., Roy, A. C., Paulignan, Y., Deprez, V., Jeannerod, M., & Nazir, T. A. (2006). Cross-talk between language processes and overt motor behavior in the first 200 msec of processing. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18(10), 1607–1615. <https://doi.org/10.1162/jocn.2006.18.10.1607>.
- Boulenger, V., Silber, B. Y., Roy, A. C., Paulignan, Y., Jeannerod, M., & Nazir, T. A. (2008). Subliminal display of action words interferes with motor planning: A combined EEG and kinematic study. *Journal of Physiology-Paris*, 102(1–3), 130–136. <https://doi.org/10.1016/j.jphysparis.2008.03.015>.
- Bretz, F., Hothorn, T., & Westfall, P. (2010). *Multiple comparisons using R*. Boca Raton, FL: Chapman & Hall/CRC Press.
- Butterworth, B. (2010). Foundational numerical capacities and the origins of dyscalculia. *Trends in Cognitive Sciences*, 14(12), 534–541. <https://doi.org/10.1037/h0087447>.
- Butterworth, B., Varma, S., & Laurillard, D. (2011). Dyscalculia: From brain to education. *Science*, 332(6033), 1049–1053. <https://doi.org/10.1126/science.1201536>.
- Clark, J. M., & Campbell, J. I. D. (1991). Integrated versus modular theories of number skills and acalculia. *Brain & Cognition*, 17(2), 204–239. [https://doi.org/10.1016/0278-2626\(91\)90075-J](https://doi.org/10.1016/0278-2626(91)90075-J).
- Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44(1–2), 1–42. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(92\)90049-N](https://doi.org/10.1016/0010-0277(92)90049-N).
- Derakshan, N., & Eysenck, M. W. (2009). Anxiety, processing efficiency, and cognitive performance: New developments from attentional control theory. *European Psychologist*, 14(2), 168–176. <https://doi.org/10.1027/1016-9040.14.2.168>.
- Fargier, P., Massarelli, R., Rabahi, T., Gemignani, A., & Fargier, E. (2016). Fast regulation of vertical squat jump during push-off in skilled jumpers. *Frontiers in Physiology*, 7, 289. <https://doi.org/10.3389/fphys.2016.00289>.
- Finch, W. H., Bolin, J. E., & Kelley, K. (2014). *Multilevel modeling using R*. Boca Raton, FL: Chapman and Hall/CRC Press.
- Fox, J., & Hong, J. (2009). Effect displays in R for multinomial and proportional-odds logit models: Extensions to the effects package. *Journal of Statistical Software*, 32(1), 1–24. <https://doi.org/10.18637/jss.v032.i01>.
- Fuson, K. (1984). More complexities in subtraction. *Journal for Research in Mathematics Education*, 15(3), 214–225. <https://doi.org/10.2307/748350>.
- Garroute-Orgeas, M., Troché, G., Azoulay, E., Caubel, A., de Lassence, A., Cheval, C., ... Timsit, J.-F. (2004). Body mass index. An additional prognostic factor in ICU patients. *Intensive Care Medicine*, 30(3), 437–443. <https://doi.org/10.1007/s00134-003-2095-2>.
- Hanakawa, T., Honda, M., Sawamoto, N., Okada, T., Yonekura, Y., Fukuyama, H., & Shibasaki, H. (2002). The role of rostral Brodmann area 6 in mental-operation tasks: An integrative neuroimaging approach. *Cerebral Cortex*, 12(11), 1157–1170. <https://doi.org/10.1093/cercor/12.11.1157>.
- Knops, A., Viarouge, A., & Dehaene, S. (2009). Dynamic representations underlying symbolic and nonsymbolic calculation: Evidence from the operational momentum effect. *Attention Perception & Psychophysics*, 71(4), 803–821. <https://doi.org/10.3758/APP.71.4.803>.
- Loetscher, T., Schwarz, U., Schubiger, M., & Brugger, P. (2008). Head turns bias the brain's internal random generator. *Current Biology*, 18(2), 60–62. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2007.11.015>.

- Lugli, L., Baroni, G., Anelli, F., Borghi, A. M., & Nicoletti, R. (2013). Counting is easier while experiencing a congruent motion. *PLoS One*, 8(5), e64500. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0064500>.
- McCloskey, M. (1992). Cognitive mechanisms in numerical processing: Evidence from acquired dyscalculia. *Cognition*, 44(1–2), 107–157. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(92\)90052-J](https://doi.org/10.1016/0010-0277(92)90052-J).
- Moeller, K., Martignon, L., Wesselowski, S., Engel, J., & Nuerk, H.-C. (2011). Effects of finger counting on numerical development – The opposing views of neuro-cognition and mathematics education. *Frontiers in Psychology*, 2, 328. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00328>.
- Myers, T., & Szűcs, D. (2015). Arithmetic memory is modality specific. *PLoS One*, 10(12), e0145614. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0145614>.
- Nazir, T. A., Boulenger, V., Roy, A., Silber, B., Jeannerod, M., & Paulignan, Y. (2008). Language-induced motor perturbations during the execution of a reaching movement. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 61(6), 933–943. <https://doi.org/10.1080/17470210701625667>.
- Newman, S. D. (2016). Does finger sense predict addition performance? *Cognitive Processing*, 17(2), 139–146. <https://doi.org/10.1007/s10339-016-0756-7>.
- Noël, M.-P. (2005). Finger gnosia: A predictor of numerical abilities in children? *Child Neuropsychology*, 11(5), 413–430. <https://doi.org/10.1080/09297040590951550>.
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1), 97–113. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(71\)90067-4](https://doi.org/10.1016/0028-3932(71)90067-4).
- Penner-Wilger, M., Fast, L., LeFevre, J.-A., Smith-Chant, B. L., Skwarchuk, S.-L., Kamawar, D., & Bisanz, J. (2007). The foundations of numeracy: Subitizing, finger gnosia, and fine motor ability. In D. S. McNamara, & J. G. Trafton (Eds.). *Proceedings of the 29th Annual Cognitive Science Society* (pp. 1385–1390). Austin, TX: Cognitive Science Society.
- Penner-Wilger, M., Waring, R. J., & Newton, A. T. (2014). Subitizing and finger gnosia predict calculation fluency in adults. In P. Bello, M. Guarini, M. McShane, & B. Scassellati (Eds.). *Proceedings of the 36th annual conference of the cognitive science society* (pp. 1150–1155). Austin, TX: Cognitive Science Society.
- Pinheiro, J. C., & Bates, D. M. (2000). *Mixed-effects models in S and S-PLUS*. New York: Springer-Verlag.
- Previtali, P., Rinaldi, L., & Girelli, L. (2011). Nature or nurture in finger counting: A review on the determinants of the direction of number-finger mapping. *Frontiers in Psychology*, 2, 363. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00363>.
- Rabahi, T., Fargier, P., Rifai Sarraj, A., Clouzeau, C., & Massarelli, R. (2013). Effect of action verbs on the performance of a complex movement. *PLoS One*, 8(7), e68687. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0068687>.
- R Core Team (2017). *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing <https://www.R-project.org/>.
- Thevenot, C., Castel, C., Fanget, M., & Fayol, M. (2010). Mental subtraction in high- and lower skilled arithmetic problem solvers: Verbal report versus operand-recognition paradigms. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 36(5), 1242–1255. <https://doi.org/10.1037/a0020447>.
- Wiemers, M., Bekkering, H., & Lindemann, O. (2014). Spatial interferences in mental arithmetic: Evidence from the motion-arithmetic compatibility effect. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 67(8), 1557–1570. <https://doi.org/10.1080/17470218.2014.889180>.
- Winter, B., & Matlock, T. (2013). More is up... and right: Random number generation along two axes. In M. Knauff, M. Pauen, N. Sebanz, & I. Wachsmuth (Eds.). *Proceedings of the 35th Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 3789–3974). Austin, TX: Cognitive Science Society.
- Wulf, G., & Shea, C. H. (2002). Principles derived from the study of simple skills do not generalize to complex skill learning. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9(2), 185–211. <https://doi.org/10.3758/BF03196276>.
- Zhao, Y., Li, Z., Yang, T., Wang, M., & Xi, X. (2018). Is body mass index associated with outcomes of mechanically ventilated adult patients in intensive critical units? A systematic review and meta-analysis. *PLoS One*, 13(6), <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198669> e0198669.

Publication 2

Khayat, J., Champely, S., Diab, A., Rifai Sarraj, A., & Fargier, P. (soumis). Effect of mental calculation and number comparison on a manual-pointing movement. *Motor Control*.



Effect of mental calculation and number comparison on a manual-pointing movement.

Journal:	<i>Motor Control</i>
Manuscript ID:	Draft
Manuscript Type:	Article
Keywords:	mental calculation, number comparison, manual-pointing

SCHOLARONE™
Manuscripts

Effect of mental calculation and number comparison on a manual-pointing movement.**Abstract**

The present study aimed at examining the effect of mental calculation and number comparison on motor performance measured as the response time (RT) of a manual-pointing movement (MPM). Three experiments (1-3), involving a total number of 65 undergraduate subjects, examined the effect of mental subtraction (complex) and, respectively, of: (1) mental addition (simple or complex), (2) mental multiplication (simple or complex) and (3) the comparison of dot sets and number comparison. Each number was written in Arabic. The RTs were analyzed by using a Multilevel Linear Mixed-Effect Model. The results showed a statistically significant improvement of MPM performance only after the complex calculations and after number comparison. Possible implication of cerebral mechanisms specific to this arithmetical activity is further discussed.

Keywords: mental calculation, number comparison, manual-pointing

Numbers and calculus contribute, in everyday life, to shape the relation of the individual to the environment (Everett, 2017). It is thus unexceptional that several studies aimed at understanding the mechanisms of numerical cognition in the human brain (for a review, see Moeller, Willmes, & Klein, 2015) and in particular those concerning the neural basis of dyscalculia (for a review, see Butterworth, Varma, & Laurillard, 2011). Overall these studies have suggested that mathematical representations may be rooted in bodily movements that have been previously experienced (e.g., Soylu, Lester, & Newman, 2018) and/or that numerical cognition and movement preparation may share similar cerebral mechanisms (e.g., Andres, Seron, & Olivier, 2007).

This might explain the positive influence of some board games, which require manual moves on a checkerboard, upon the numerical knowledge in children (e.g., Ramani & Siegler, 2008). The possible helpful role of gesturing during the learning of a math lesson (Goldin-Meadow, Cook, & Mitchell, 2009) may also suggest a link among bodily movements and numerical cognition. A hypothesis that is confirmed by the recurrent use of fingers, in different cultures, to learn to count and to calculate (for a review see Previtali, Rinaldi, & Girelli, 2011).

This is consistent with the results of Berteletti and Booth (2015) showing a significant functional activation in finger-related somatosensory areas, during mental subtractions, realized without overt movement by 8-13 years old subjects. The results further suggested the use of finger-based strategies related, during mental calculus without actual movement, to the ability of these subjects to perceive and differentiate their own fingers (finger gnosis). A hypothesis supported by the finding that the performance of arithmetical tasks may be linked to finger gnosis in children (Newman, 2016; Reeve & Humberstone, 2011; Soylu, Raymond, Gutierrez, & Newman, 2017; Wasner, Nuerk, Martignon, Roesch, & Moeller, 2016).

Other studies have suggested that finger counting habits may influence the performance of arithmetical tasks realized without overt movement in adults (e.g., in the case of number

comparison: Domahs, Moeller, Huber, Willmes, & Nuerk, 2010; Morrissey, Liu, Kang, Hallett, & Wang, 2016). This was confirmed by the results of neuroimaging studies performed during mental calculation in the absence of bodily movements. Several studies thus found increased functional activations in the Premotor Cortex during mental addition in adult subjects (Chen et al., 2006; Hanakawa et al., 2002; Hanakawa, Honda, Okada, Fukuyama, & Shibasaki, 2003). In the study of Hanakawa et al. (2002) such activations, in the absence of actual movement, were moreover found to overlap the cerebral regions active during complex finger movements. Functional activations in motor areas of the brain were furthermore found to be enhanced during complex calculations when compared to simpler calculations (Tschentscher & Hauk, 2014). The involvement of cerebral sensorimotor processes during arithmetical tasks is also consistent with the results of Penner-Wilger, Waring, and Newton (2014) showing that finger gnosis, in adults, may predict calculation performance.

Other studies showed that passive movement of a hand (i.e., a hand moved clockwise by the experimenter; Imbo, Vandierendonck, & Fias, 2011) and active finger movements (i.e., subjects flexing successively each finger of the hand; Michaux, Masson, Pesenti, & Andres, 2013) during mental calculation may impair the performance of both additions and subtractions in adults. The results of Wiemers, Bekkering, and Lindemann (2014) further suggested that such interference may be linked to attentional processes required by both the control of movement direction and the possible involvement of a spatial representation of numbers during calculation.

Overall several studies have suggested a possible link between finger and/or arm movement and arithmetical tasks. The possible effect of arithmetical tasks upon the performance of a movement of the upper-limb remained to be examined especially as previous results of Rabahi, Fargier, Rifai Sarraj, Clouzeau, and Massarelli (2013) showed a direct and positive influence of mental subtraction upon the height of a squat vertical jump realized by adult

subjects. The aim of the present study was thus to consider the effect of various arithmetical tasks upon the performance of a manual-pointing movement (MPM) by adult subjects. This physical task was chosen as previous studies showed a possible link between cognitive stimuli and the increased performance of a movement of the upper-limb (e.g., Boulenger et al., 2008; Fargier, Ménoret, Boulenger, Nazir, & Paulignan, 2012).

Materials and method

The study was approved by the ethical committee of the AZM Center of Research in Biotechnology and its Application (Tripoli, Lebanon). The participants were 65 undergraduate male students from the Faculty of Public Health of the Lebanese University (Beyrouth, Lebanon). These participants gave their written and informed consent. All of them were healthy and had normal or corrected to normal vision.

Subjects

The 65 participants were divided in four groups forming a control group (20 subjects; mean age \pm SD: 20.2 ± 1.9 years) and four experimental groups, i.e., group 1 (15 subjects; 20.2 ± 2.2 years), 2 (15 subjects; 20.4 ± 1.6 years) and 3 (15 subjects; 20.3 ± 1.6 years).

Before each experiment the subjects were informed of the scope of the study but remained uninformed of possible effect of any experimental stimulus used to measure the MPM performance.

General experimental design

After a short warm-up session (~10 mn) the subjects (both the control group and the experimental groups) performed three series of six MPMs (i.e., three blocks of MPMs) with 3 mn rest between two consecutive blocks (Figure 1).

The subjects of the control group remained immobile 10 sec in front of a black screen and then executed the MPM task. This was done to control a possible effect of movement repetition (inside a block and from one block to the others) on MPM performance.

The subjects of the experimental groups 1 to 3 realized the first three MPMs of each block remaining immobile in front of a black wall, as in the control group; the measured performance was then used as a baseline. Subsequently the subjects performed three MPMs each after a cognitive task (Figure 1).

Insert Figure 1 here

Cognitive tasks in experiments 1 to 3

In each experiment the subjects performed three cognitive tasks (Figure 2). During these tasks the stimuli were projected on a screen by an Optoma[®]/ThemeSceneH projector (92100 Boulogne-Billancourt, France). Each stimulus was written in white on a black background (image size of 1.3 m in diagonal, subjects at 3.5 m from the screen) and the digits (Times New Roman, font size 96) were written in Arabic (see Rabahi et al., 2013).

In each experiment (1 to 3) the subjects performed the MPM after the mental subtraction of a one-digit number from a two-digit number (thereafter called “complex” subtraction, i.e., more difficult than mental subtraction with two one-digit numbers; Thevenot, Castel, Fanget, & Fayol, 2010). This aimed at confirming the results of Rabahi et al. (2013) showing a positive influence of complex subtraction on the performance of a squat vertical jump. Experiment 1 was more particularly made to study the possible effect of mental addition and experiment 2 that of mental multiplication on MPM (Figure 2). In both experiments two operations of different difficulty levels were proposed (thereafter called “simple” and “complex”; see Thevenot et al., 2010; Tschentscher & Hauk, 2014). Experiment 3 included the comparison of

dot ensembles and number comparison. The performance of such tasks has been shown to possibly predict arithmetical performance (e.g., Penner-Wilger et al., 2014; Morsanyi, O'Mahony, & McCormack, 2017). The task of comparison of dot ensembles required to compare two sets of dots presented simultaneously (Figure 2) and was designed in accordance with Dietrich, Huber, and Nuerk (2015). The task of number comparison required as well to compare two Arabic digits shown simultaneously (Figure 2).

Insert Figure 2 here

Manual-pointing movement

The subjects of each group were all right-handed according to the Edinburgh inventory (Oldfield, 1971). They also declared a preference for the right handiness to realize the MPM task (Figure 3) and performed MPM accordingly.

Insert Figure 3 here

In each block, during the visualization of a black screen (baseline) or the realization of each cognitive task (see Figures 1 and 2), the subjects were asked to touch the button of a first cuboid (Figure 3) with the tips of the index, middle and ring fingers. The MPM task was realized directly after that and ended by pushing the button of a second cuboid (Figure 3) as fast as possible.

The response time (RT) was measured from the instant when the reaching movement began to the instant when the button of the second cuboid was pushed (see Appendix 1).

Statistical analysis

The obtained RTs from the control experiment and from experiments 1 to 3 were analyzed by using the same statistical model, i.e., Multilevel Linear Mixed-Effect Model (MLME Model; Finch, Bolin, & Kelley, 2014; Pinheiro & Bates, 2000). In each statistical model three variability levels were considered (represented by three nested random effects that followed non-correlated normal distributions with zero expectation). The first level effect concerned the variation in RTs due to individual differences (subject effect). The second level dealt with the performance of each series of three consecutive movements in the same experimental condition (thereafter called “triplet”; see Figure 1). The third level pertained to the residual effect regarding the individual performance in each triplet.

In the control experiment the statistical analysis considered two fixed-effects and the corresponding interaction. A block fixed-effect and an intra-block fixed effect were explored to compare, respectively, the three blocks of MPMs in the same experiment and the two triplets in the same block. The block fixed-effect was measured to control a possible influence of movement repetition upon MPM performance during the experiments and the intra-block and interaction effects, to control the stability of the baseline. In each of the experiments 1 to 3 the statistical analysis considered a fixed-effect regarding the experimental conditions (condition effect).

All MLME Models thus obtained were fitted by using restricted maximum likelihood estimation (Pinheiro & Bates, 2000, p. 75). Fixed-effects were first tested by using a likelihood ratio (LR) test. Post-hoc tests were then carried out by using the method of Bretz, Hothorn, and Westfall (2010); the single-step method was used and the family-wise error rate was set at 5%. This led to obtain, in each experiment, the estimated differences among RTs (Estimate), the Z scores and adjusted *p*-values.

The R statistical software 3.4.3 (packages nlme, lme4, multcomp and effects) was used to perform all computations.

Results

The results obtained in the control experiment (LR tests; see also Appendix 2) showed no effect of movement repetition upon MPM performance. No statistically significant effect of interaction between block and intra-block was found, $\chi^2(2) = 5.48, p > .05$. In addition no effect of block repetition was found, $\chi^2(2) = 0.89, p > .05$, indicating that the repetition of the three blocks of six MPMs during the experimental protocol induced no fatigue or training effect. It was moreover found no significant intra-block effect, $\chi^2(1) = 1.92, p > .05$; as a consequence the mean baseline of each block of experiments 1 to 3 was used as reference in the statistical analysis.

In the experiments 1 to 3 the LR tests systematically reached significance with the respective $\chi^2(3)$ values: 98.31, $p < .001$; 89.81, $p < .001$ and 57.10, $p < .001$ (see Figure 4).

Insert Figure 4 here

In both experiments 1 and 2 all-pairwise comparisons (Table 1) showed that the RT was significantly faster after mental subtraction than in the baseline condition (Sc - Base).

Insert Table 1 here

In experiments 1 (see Table 1.a.) and 2 (see Table 1.b.) the increased complexity in addition and multiplication, respectively, produced significantly faster RTs than after simple calculation. No statistically significant effect was found on RTs after simple calculations

when compared to the baseline (As - Base and Ms - Base), while after complex calculation the RTs were significantly shorter than the baseline (Ac - Base and Mc - Base).

The all-pairwise comparisons in experiment 3 (Table 2) further confirmed that the RT after mental subtraction was significantly shorter than in the baseline condition (Sc - Base). In addition the RT after the comparison of dot ensembles was not significantly different from baseline (Cd - Base) while the RT after number comparison was significantly shorter (Cn - Base). Moreover it should be noted that the RT after mental subtraction was significantly shorter than the RT after number comparison (Cn - Sc).

Insert Table 2 here

Discussion

This study aimed at examining the possible effect of mental calculus and quantity comparison on the response time (RT) of a manual-pointing movement (MPM) at maximal velocity.

Three separate experiments (1 to 3) allowed comparisons among RTs after viewing a black screen (baseline), after complex subtraction and, respectively, after: (1) simple and complex additions, (2) simple and complex multiplications, (3) the comparison of a pair of dot ensembles and the comparison of two numbers.

Consistently with the results of Rabahi et al. (2013) the results of the experiments 1, 2 and 3 showed that the RT after complex subtraction was significantly shorter than the baseline RT (Tables 1 and 2). Solving a subtraction problem may favor either the use of memorized results of calculations, or procedures of actual calculation, depending on the difficulty level of the subtraction to be done. According to Thevenot et al. (2010) retrieval and procedural strategies would be respectively favored by easy problems (e.g., 5 - 3) and by greater levels of difficulty. In the present study the effect of mental subtraction of a one-digit number from a

two-digit number (e.g., 17 - 8) on RT might thus be linked to the calculation itself. This is supported by the results of experiments 1 and 2 (Table 1) that showed, on the one hand, no influence of simple calculations (addition and multiplication of a pair of one-digit numbers) on RT and, on the other hand, significantly shorter RTs after complex calculations (addition and multiplication of a one-digit number and a two-digit number) than the baseline RT. Complex subtraction (experiments 1 to 3) and both complex addition (experiment 1) and multiplication (experiment 2) might have challenged optimally the undergraduate subjects to lead them to an emotional state favoring attentional control (Derakshan & Eysenck, 2009). A spatial representation of numbers in a horizontal plane, possibly involved during calculation, might further have favored the attention of the subjects to the optimal plane of movement during MPM, in particular in the case of addition (e.g., Anelli, Lugli, Baroni, Borghi, & Nicoletti, 2014). A possibility that appears however weakened in the case of multiplication as the existence of a link between space and multiplication remains controversial (Li et al., 2018).

It should be further considered that previous studies showed a possible involvement, during arithmetical calculation, of cerebral mechanisms also involved in movement preparation (e.g., Hanakawa et al., 2002). The results of Tschentscher and Hauk (2014) furthermore showed an increased functional activation of motor regions in the brain during complex calculation when compared to simple calculation. In this respect premotor regions might support number sequencing and/or the processing of syntactic structures during the performance of complex calculation (Tschentscher & Hauk, 2014). This might thus explain the results of the present study regarding arithmetical calculation as it was found no influence of the simpler calculations on RT and shorter RTs than the baseline after the more complex calculations. In any case the results of experiments 1, 2 and 3 suggest that RT is influenced by actual calculation (and not by the retrieval of arithmetical facts). This is consistent with the results of

experiment 3 regarding number comparison (Table 2). On the one hand number comparison in experiment 3 required the factual determination of a mathematical relation between two quantities. On the other hand the moderate difficulty level of this task (one-digit numbers only) might explain that, in experiment 3, RT after subtraction (of a one-digit number from a two-digit number) was significantly faster than after number comparison (Table 2).

In experiment 3 not only number comparison, but also the comparison of dot ensembles, required a factual activity to determine a mathematical relation between two quantities.

However only the task of number comparison was found to influence RT (Table 2) possibly because the task of comparison of dot ensembles was less usual to the subjects. In any case number comparison (Arabic digits) and the comparison of dot ensembles might elicit and be processed from two different types of mental representations (Krajcsi, Lengyel, & Kojouharova, 2018).

Moreover in the present study each task favoring actual calculation or quantity comparison and MPM performance involved numbers exclusively written in Arabic digits. This leads to consider that MPM performance might be favored by cerebral mechanisms specific to Arabic digits, possibly involved in encoding (e.g., McCloskey, 1992) and/or memorization (e.g., Campbell and Epp, 2004), during actual calculation or comparison.

The results of the present study showed the influence of mental calculus (subtraction, addition, and multiplication) and of number comparison, with numbers written in Arabic digits, on the performance of a high-intensity reaching movement of the upper-limb. Such influence was found to be conditioned by the requirement of factual calculation and/or comparison (rather than by the retrieval of arithmetical facts). The corresponding arithmetical activity might have favored attentional control and, consequently, motor performance. This influence on motor performance might also be driven by a possible involvement, during

1.

actual calculation and comparison, of motor regions in the brain and/or of cerebral mechanisms specific to symbolic numbers.

Appendices

Appendix 1

The response time in the task of MPM was the duration between the initialization and the end of movement (from a first cuboid to a second cuboid). The initialization of the movement was determined by a 3-D accelerometer (Vernier®; 175 13979 SW Millikan Way, Beaverton, OR 97005, USA) fixed on a mitten (right hand). The end of the movement was determined when pushing the button on the second cuboid, thus opening an electric circuitry. The measures were acquired and analyzed with a data acquisition card DAQ® connected to Labview software® and Matlab® script [respectively: National Instruments, 11500 Mopac Expwy, Austin, Texas; Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench 2009 (32-bit), National Instruments, Austin, Texas; Matlab R2016a, MathWorks incorporation, Natick, Massachusetts].

Appendix 2

The response times in the control group are shown Table 3.

Insert Table 3 here

Appendix 3

The response times in the experimental groups 1 to 3 are shown Table 4.

Insert Table 4 here

References

- Andres, M., Seron, X., & Olivier, E. (2007). Contribution of hand motor circuits to counting. *Journal of Cognitive Neuroscience, 19*(4), 563–576. PubMed ID: [17381248](#) doi: [10.1162/jocn.2007.19.4.563](#)
- Anelli, F., Lugli, L., Baroni, G., Borghi, A. M., & Nicoletti, R. (2014). Walking boosts your performance in making additions and subtractions. *Frontiers in Psychology, 5*, 1459. PubMed ID: [25566137](#) doi: [10.3389/fpsyg.2014.01459](#)
- Berteletti, I., & Booth, J. R. (2015). Perceiving fingers in single-digit arithmetic problems. *Frontiers in Psychology, 6*, 226. PubMed ID: [25852582](#) doi:[10.3389/fpsyg.2015.00226](#)
- Boulenger, V., Silber, B. Y., Roy, A. C., Paulignan, Y., Jeannerod, M., & Nazir, T. A. (2008). Subliminal display of action words interferes with motor planning: A combined EEG and kinematic study. *Journal of Physiology-Paris, 102*(1–3), 130–136. PubMed ID: [18485678](#) doi: [10.1016/j.jphysparis.2008.03.015](#)
- Bretz, F., Hothorn, T., & Westfall, P. (2010). *Multiple Comparisons Using R*. Boca Raton, FL: Chapman & Hall/CRC Press.
- Butterworth, B., Varma, S., & Laurillard, D. (2011). Dyscalculia: From brain to education. *Science, 332*(6033), 1049–1053. PubMed ID: [21617068](#) doi: [10.1126/science.1201536](#)
- Campbell, J. I. D., & Epp, L. J. (2004). An encoding-complex approach to numerical cognition in Chinese-English bilinguals. *Canadian Journal of Experimental Psychology, 58*(4), 229–244. PubMed ID: [15648727](#) doi:[10.1037/h0087447](#)
- Chen, C. L., Wu, T. H., Cheng, M. C., Huang, Y. H., Sheu, C. Y., Hsieh, J. C., & Lee, J. S. (2006). Prospective demonstration of brain plasticity after intensive abacus-based mental calculation training: An fMRI study. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 569*(2), 567–571. doi: [10.1016/j.nima.2006.08.101](#)

- Derakshan, N., & Eysenck, M. W. (2009). Anxiety, processing efficiency, and cognitive performance: New developments from attentional control theory. *European Psychologist, 14*(2), 168–176. doi: [10.1027/1016-9040.14.2.168](https://doi.org/10.1027/1016-9040.14.2.168)
- Dietrich, J. F., Huber, S., & Nuerk, H.-C. (2015). Methodological aspects to be considered when measuring the approximate number system (ANS) – a research review. *Frontiers in Psychology, 6*, 295. PubMed ID: [25852612](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25852612/) doi: [10.3389/fpsyg.2015.00295](https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00295)
- Domahs, F., Moeller, K., Huber, S., Willmes, K., & Nuerk, H.-C. (2010). Embodied numerosity: Implicit hand-based representations influence symbolic number processing across cultures. *Cognition, 116*(2), 251–266. PubMed ID: [20513381](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20513381/) doi: [10.1016/j.cognition.2010.05.007](https://doi.org/10.1016/j.cognition.2010.05.007)
- Everett, C. (2017). *Numbers and the making of us – Counting and the course of human culture*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Fargier, R., Ménoret, M., Boulenger, V., Nazir, T. A., & Paulignan, Y. (2012). Grasp it loudly! Supporting actions with semantically congruent spoken action words. *PLoS ONE, 7*(1), e30663. PubMed ID: [22292014](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22292014/) doi: [10.1371/journal.pone.0030663](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0030663)
- Finch, W. H., Bolin, J. E., & Kelley, K. (2014). *Multilevel Modeling Using R*. Boca Raton, FL: Chapman & Hall/CRC Press.
- Fox, J., & Hong, J. (2009). Effect displays in R for multinomial and proportional-odds logit models: Extensions to the effects package. *Journal of Statistical Software, 32*(1), 1–24. doi: [10.18637/jss.v032.i01](https://doi.org/10.18637/jss.v032.i01)
- Goldin-Meadow, S., Cook, S. W., & Mitchell, Z. A. (2009). Gesturing gives children new ideas about math. *Psychological Science, 20*(3), 267–272. PubMed ID: [19222810](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19222810/) doi: [10.1111/j.1467-9280.2009.02297.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2009.02297.x)
- Hanakawa, T., Honda, M., Okada, T., Fukuyama, H., & Shibasaki, H. (2003). Neural correlates underlying mental calculation in abacus experts: A functional magnetic

- resonance imaging study. *Neuroimage* 19(2), 296–307. PubMed ID: [12814580](#) doi: [10.1016/S1053-8119\(03\)00050-8](#)
- Hanakawa, T., Honda, M., Sawamoto, N., Okada, T., Yonekura, Y., Fukuyama, H., & Shibasaki, H. (2002). The role of rostral Brodmann area 6 in mental-operation tasks: An integrative neuroimaging approach. *Cerebral Cortex*, 12(11), 1157–1170. PubMed ID: [12379604](#) doi: [10.1093/cercor/12.11.1157](#)
- Imbo, I., Vandierendonck, A., & Fias, W. (2011). Passive hand movements disrupt adults' counting strategies. *Frontiers in Psychology*, 2, 201. PubMed ID: [21927607](#) doi: [10.3389/fpsyg.2011.00201](#)
- Krajcsi, A., Lengyel, G., & Kojouharova, P. (2018). Symbolic number comparison is not processed by the analog number system: Different symbolic and non-symbolic numerical distance and size effects. *Frontiers in Psychology*, 9, 124. PubMed ID: [29491845](#) doi: [10.3389/fpsyg.2018.00124](#)
- Li, M. [Megjin], Liu, D., Li, M. [Min], Dong, W., Huang, Y., & Chen, Q. (2018). Addition and subtraction but not multiplication and division cause shifts of spatial attention. *Frontiers in Human Neuroscience*, 12, 183. PubMed ID: [29773985](#) doi: [10.3389/fnhum.2018.00183](#)
- McCloskey, M. (1992). Cognitive mechanisms in numerical processing: Evidence from acquired dyscalculia. *Cognition*, 44(1–2), 107–157. PubMed ID : [1511584](#) doi: [10.1016/0010-0277\(92\)90052-J](#)
- Michaux, N., Masson, N., Pesenti, M., & Andres, M. (2013). Selective interference of finger movements on basic addition and subtraction problem solving. *Experimental Psychology*, 60(3), 197–205. PubMed ID: [23261950](#) doi: [10.1027/1618-3169/a000188](#)

- Moeller, K., Willmes, K., & Klein, E. (2015). A review on functional and structural brain connectivity in numerical cognition. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9, 227. PubMed ID: [26029075](#) doi: [10.3389/fnhum.2015.00227](#)
- Morrissey, K. R., Liu, M., Kang, J., Hallett, D., & Wang, Q. (2016). Cross-cultural and intra-cultural differences in finger-counting habits and number magnitude processing: Embodied numerosity in Canadian and Chinese university students. *Journal of Numerical Cognition*, 2, 1–19. doi: [10.5964/jnc.v2i1.14](#)
- Morsanyi, K., O'Mahony, E., & McCormack, T. (2017). Number comparison and number ordering as predictors of arithmetic performance in adults: Exploring the link between the two skills, and investigating the question of domain-specificity. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 70(12), 2497–2517. PubMed ID: [27734751](#) doi: [10.1080/17470218.2016.1246577](#)
- Newman, S. D. (2016). Does finger sense predict addition performance?. *Cognitive Processing*, 17(2), 139–146. PubMed ID: [26993292](#) doi: [10.1007/s10339-016-0756-7](#)
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1), 97–113. PubMed ID: [5146491](#) doi: [10.1016/0028-3932\(71\)90067-4](#)
- Penner-Wilger, M., Waring, R. J., & Newton, A. T. (2014). Subitizing and finger gnosis predict calculation fluency in adults. In P. Bello, M. Guarini, M. McShane, & B. Scassellati (Eds.). *CogSci 2014. Proceedings of the 36th Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 1150–1155). Austin, TX: Cognitive Science Society.
- Pinheiro, J. C., & Bates D. M. (2000). *Mixed-effects models in S and S-PLUS*. New York: Springer-Verlag.

- Previtali, P., Rinaldi, L., & Girelli, L. (2011). Nature or nurture in finger counting: A review on the determinants of the direction of number-finger mapping. *Frontiers in Psychology*, 2, 363. PubMed ID: [22319502](#) doi : [10.3389/fpsyg.2011.00363](#)
- Rabahi, T., Fargier, P., Rifai Sarraj, A., Clouzeau, C., & Massarelli, R. (2013). Effect of action verbs on the performance of a complex movement. *PLoS ONE*, 8(7), e68687. PubMed ID: [23844233](#) doi: [10.1371/journal.pone.0068687](#)
- Ramani, G. B., & Siegler, R. S. (2008). Promoting broad and stable improvements in low-income children's numerical knowledge through playing number board games. *Child Development*, 79(2), 375–394. PubMed ID: [18366429](#) doi: [10.1111/j.1467-8624.2007.01131.x](#)
- Reeve, R., & Humberstone, J. (2011). Five- to 7-year-olds' finger gnosis and calculation abilities. *Frontiers in Psychology*, 2, 359. PubMed ID: [22171220](#) doi:[10.3389/fpsyg.2011.00359](#)
- Soylu, F., Lester, F. K., Jr., & Newman, S. D. (2018). You can count on your fingers: The role of fingers in early mathematical development. *Journal of Numerical Cognition*, 4, 107–135. doi: [10.5964/jnc.v4i1.85](#)
- Soylu, F., Raymond, D., Gutierrez, A., & Newman, S. D. (2017). The differential relationship between finger gnosis, and addition and subtraction: An fMRI study. *Journal of Numerical Cognition*, 3, 694–715. doi: [10.5964/jnc.v3i3.102](#)
- Thevenot, C., Castel, C., Fanget, M., & Fayol, M. (2010). Mental subtraction in high- and lower skilled arithmetic problem solvers: Verbal report versus operand-recognition paradigms. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 36(5), 1242–1255. PubMed ID: [20804294](#) doi: [10.1037/a0020447](#)

1!

Tschentscher, N., & Hauk, O. (2014). How are things adding up? Neural differences between arithmetic operations are due to general problem solving strategies. *NeuroImage*, 92, 369-380. PubMed ID: [24525170](#) doi: [10.1016/j.neuroimage.2014.01.061](#)

Wasner, M., Nuerk, H.-C., Martignon, L., Roesch, S., & Moeller, K. (2016). Finger gnosis predicts a unique but small part of variance in initial arithmetic performance. *Journal of Experimental Child Psychology*, 146, 1–16. PubMed ID: [26895483](#) doi: [10.1016/j.jecp.2016.01.006](#)

Wiemers, M., Bekkering, H., & Lindemann, O. (2014). Spatial interferences in mental arithmetic: Evidence from the motion-arithmetic compatibility effect. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 67(8), 1557–1570. PubMed ID: [24483946](#) doi: [10.1080/17470218.2014.889180](#)

Acknowledgments

The authors express their grateful thanks to Emeritus Professor Raphaël Massarelli for his permanent support during this study.

For Peer Review

Figure Captions

Figure 1 – Experimental protocol.

Before the experiment the subjects realized a warm-up during ~10 mn. They further performed three series of six manual-pointing movements (MPMs). Each series constituted a block and two consecutive blocks were separated by 3 mn rest. The control group performed each MPM after watching a black screen (10 sec). In the experimental groups 1 to 3 each block began with three MPMs, executed in the same condition as the control group, and used as a baseline control. Each of the three consecutive MPMs was realized after a cognitive task. The experiments 1 to 3 included three cognitive tasks and each subject realized the three cognitive tasks in a random order from one block to another.

Figure 2 – Cognitive tasks in experiments 1 to 3.

Three tasks were used in each experiment (indicated by the arrow ↓). Experiment 1: Sc (“complex” subtraction, i.e., mental subtraction of a one-digit number from a two-digit number). As (“simple” addition, i.e., mental addition of two one-digit numbers), and Ac (complex addition). Experiment 2: Sc, Ms (simple multiplication), and Mc (complex multiplication). Experiment 3: Sc, comparison of two sets of dots (Cd), and number comparison (Cn). The subjects performed three different versions (a. to c.) of Sc, As, Ac, Ms, Mc, Cd and of Cn. Inside a block the order of the stimuli was randomly assigned.

Figure 3 – MPM task.

Each subject sat behind a desk and, in front of the subject, two 5 cm high wooden cuboids (□) were placed one following the other (proximal cuboid at a distance of ~25 cm from the chest of the subject). At the center of the superior face of each cuboid a button was fixed

(distance between the centers of the two buttons = 25 cm). The manual-pointing movement (MPM; ←) started from the proximal cuboid (1st button) and ended by pushing the button of the distal cuboid (2nd button) as fast as possible.

Figure 4 – Effect of cognitive stimuli on MPM response time.

The “effect plots” (Fox & Hong, 2009) show the mean response times (MPM: manual-pointing movement) in experiments 1 (Figure 4.a), 2 (Figure 4.b) and 3 (Figure 4.c) after watching a black screen (Base), complex subtraction (Sc), simple addition (As), complex addition (Ac), simple multiplication (Ms), complex multiplication (Mc), comparisons of dot ensembles (Cd) and between numbers (Cn). The vertical bars indicate ± 0.95 confidence interval.

2.

Table 1 – All-pairwise comparisons in experiments 1 and 2.

a. Experiment 1					b. Experiment 2				
Differences	Estimate (ms)	SE	Z	p	Differences	Estimate (ms)	SE	Z	p
Sc - Base	-20.79	3.72	-5.60	< .001	Sc - Base	-23.92	3.65	-6.55	< .001
As - Base	1.36	3.74	0.36	.98	Ms - Base	-3.51	3.63	-0.97	.76
Ac - Base	-32.50	3.74	-8.68	< .001	Mc - Base	-28.72	3.63	-7.90	< .001
As - Sc	22.15	4.60	4.82	< .001	Ms - Sc	20.40	4.50	4.53	< .001
Ac - Sc	-11.72	4.60	-2.55	.051	Mc - Sc	-4.80	4.52	-1.06	.71
Ac - As	-33.87	4.66	-7.26	< .001	Mc - Ms	-25.21	4.46	-5.66	< .001

Results of all-pairwise comparisons of MPM response times (RTs) in experiments 1 and 2, i.e., respectively: among Base (RT after watching a black screen; baseline performance), Sc (RT after complex subtraction), As (RT after simple addition) and Ac (RT after complex addition) (Table 1.a.) and among Base, Sc, Ms (RT after simple multiplication) and Mc (RT after complex multiplication) (Table 1.b.). Differences between two SEs (standard error) in the Estimates (differences between two RTs in ms) may occur after the second decimal. The adjusted *p*-values of the *Z* scores are indicated [single-step method; $p (Z > |z|)$].

Table 2 – All-pairwise comparisons in experiment 3.

Differences	Estimate (ms)	SE	Z	p
Sc - Base	-17.78	2.43	-7.31	<.001
Cd - Base	-3.07	2.43	-1.26	.58
Cn - Base	-8.36	2.43	-3.44	.003
Cd - Sc	14.71	2.98	4.93	<.001
Cn - Sc	9.42	2.97	3.17	.008
Cn - Cd	-5.29	2.97	-1.78	.28

Results of all-pairwise comparisons of MPM response times (RTs) among Base (RT after watching a black screen; baseline performance), Sc (RT after mental subtraction), Cd (RT after comparison of dot ensembles) and Cn (RT after number comparison). Differences between two SEs (standard error) in the Estimates (differences between two RTs in ms) may occur after the second decimal. The adjusted *p*-values of the *Z* scores are indicated [single-step method; $p(Z > |z|)$].

Table 3 - Response times in the control experiment.

	RTs in ms (n = 20)		
	Block 1	Block 2	Block 3
Whole block	305.5 ± 48.8	304.8 ± 42.4	307.2 ± 44.0
Triplet 1	304.3 ± 44.5	306.1 ± 43.8	308.7 ± 44.0
Triplet 2	306.6 ± 43.4	303.5 ± 41.3	303.8 ± 43.9

In each block of manual-pointing movements (MPMs), i.e. in Block 1, Block 2, and Block 3, the mean response times (RT ± SD) in ms are shown regarding the whole block (series of six MPMs each realized after remaining immobile 10 sec in front of a black screen) and for the first and the last three MPMs of the block (respectively: triplet 1 and triplet 2).

Table 4 – Response times in experiments 1 to 3.

Experiment 1 (n = 15)		Experiment 2 (n = 15)		Experiment 3 (n = 15)	
Task	RT (ms)	Task	RT (ms)	Task	RT (ms)
Base	275.9 ± 32.8	Base	294.1 ± 46.8	Base	260.5 ± 33.8
Sc	255.3 ± 34.4	Sc	269.9 ± 43.3	Sc	242.8 ± 35.5
As	276.7 ± 38.5	Ms	289.7 ± 48.3	Cd	257.4 ± 35.5
Ac	243.6 ± 34.8	Mc	266.5 ± 45.7	Cn	252.2 ± 38.7

The mean response time (manual-pointing movements) in ms (RT ± SD) after each experimental condition (task) are given, i.e. Base (watching a black screen; baseline), Sc (complex subtraction), As (simple addition), Ac (complex addition), Ms (simple multiplication), Mc (complex multiplication), Cd (comparison of dot ensembles) and Cn (number comparison).

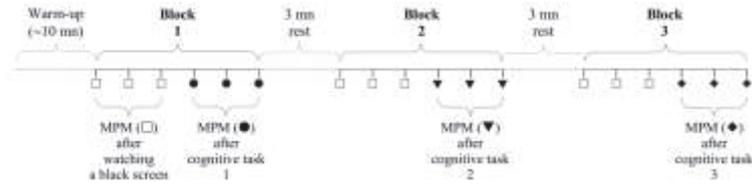


Figure 1 – Experimental protocol.

Before the experiment the subjects realized a warm-up during ~10 mn. They further performed three series of six manual-pointing movements (MPMs). Each series constituted a block and two consecutive blocks were separated by 3 mn rest. The control group performed each MPM after watching a black screen (10 sec). In the experimental groups 1 to 3 each block began with three MPMs, executed in the same condition as the control group, and used as a baseline control. Each of the three consecutive MPMs was realized after a cognitive task. The experiments 1 to 3 included three cognitive tasks and each subject realized the three cognitive tasks in a random order from one block to another.

180x44mm (600 x 600 DPI)

Task	Stimuli			Experiment		
	a.	b.	c.	1	2	3
Sc	17 - 8	16 - 9	12 - 4	↓	↓	↓
As	4 + 3	5 + 7	6 + 3	↓		
Ac	17 + 8	16 + 9	12 + 4	↓		
Ms	4 x 3	5 x 7	6 x 3		↓	
Mc	17 x 8	16 x 9	12 x 4		↓	
Cd						↓
Cn	8 6	5 8	4 7			↓

Figure 2 – Cognitive tasks in experiments 1 to 3. Three tasks were used in each experiment (indicated by the arrow ↓). Experiment 1: Sc (“complex” subtraction, i.e., mental subtraction of a one-digit number from a two-digit number), As (“simple” addition, i.e., mental addition of two one-digit numbers), and Ac (complex addition). Experiment 2: Sc, Ms (simple multiplication), and Mc (complex multiplication). Experiment 3: Sc, comparison of two sets of dots (Cd), and number comparison (Cn). The subjects performed three different versions (a. to c.) of Sc, As, Ac, Ms, Mc, Cd and of Cn. Inside a block the order of the stimuli was randomly assigned.

163x98mm (600 x 600 DPI)

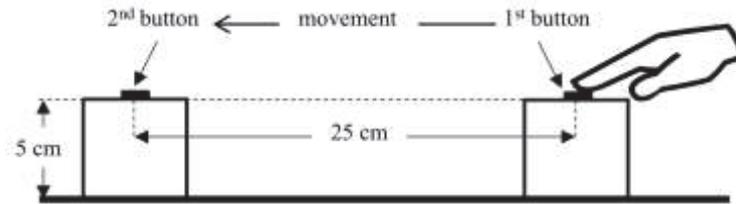


Figure 3 – MPM task.

Each subject sat behind a desk and, in front of the subject, two 5 cm high wooden cuboids () were placed one following the other (proximal cuboid at a distance of ~ 25 cm from the chest of the subject). At the center of the superior face of each cuboid a button was fixed (distance between the centers of the two buttons = 25 cm). The manual-pointing movement (MPM; ←) started from the proximal cuboid (1st button) and ended by pushing the button of the distal cuboid (2nd button) as fast as possible.

113x33mm (600 x 600 DPI)

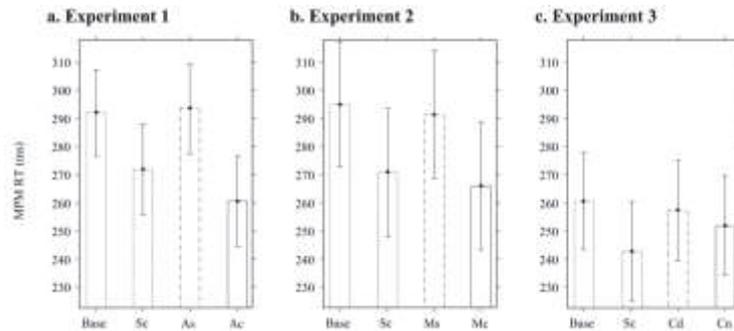


Figure 4 – Effect of cognitive stimuli on MPM response time. The “effect plots” (Fox & Hong, 2009) show the mean response times (MPM: manual-pointing movement) in experiments 1 (Figure 4.a), 2 (Figure 4.b) and 3 (Figure 4.c) after watching a black screen (Base), complex subtraction (Sc), simple addition (As), complex addition (Ac), simple multiplication (Ms), complex multiplication (Mc), comparisons of dot ensembles (Cd) and between numbers (Cn). The vertical bars indicate ± 0.95 confidence interval.

160x70mm (600 x 600 DPI)

Publication 3

Bal, O., Khayat, J., Rifai Sarraj, A., & Fargier, P. (2018). Mental calculus and physical education (PE) – Effect of physical exercise. In L. Gómez Chova, A. López Martínez & I. Candel Torres (Eds.), EDULEARN18 Proceedings. IATED Academy.
<https://dx.doi.org/10.21125/edulearn.2018.1860>.

MENTAL CALCULUS AND PHYSICAL EDUCATION (PE) – EFFECT OF PHYSICAL EXERCISE

O. Bal¹, J. Khayat², A. Rifai-Sarraj², P. Fargier³

¹Université de Lyon, Université Lyon 1, UFR STAPS (FRANCE)

²Lebanese University, Rafic Hariri Campus, Faculty of Public Health (LEBANON)

³Université de Lyon, Université Lyon 1, LIBM - EA 7424, SFR CRIS - FED 4272 (FRANCE)

Abstract

Several everyday activities (e.g.: shopping or board games) require mathematical abilities (Lefevre et al., 2009). These abilities may be grounded in sensorimotor experiences such as finger-counting (e.g.: Berteletti et al., 2015; Wasner et al., 2014). This is supported by experimental results showing that mental calculation in adults involve cerebral circuits responsible of hand movements (e.g.: Andres et al., 2012; Imbo et al., 2011). Another possible influence of sensorimotor experience on mental arithmetic may depend on a spatial representation of numerical magnitude (from the left to the right in the European culture and, more generally, along a vertical axis; Wiemers et al., 2014). Anelli et al. (2014) thus showed an enhancement of mental subtraction performance and of mental addition performance respectively during a leftward walk and during a rightward walk. Lugli et al. (2013) also found such influence of a descending displacement on mental subtraction and of an ascending displacement on mental addition. Beyond this so-called congruency effect, it was found that the height of a vertical squat jump is improved after a mental subtraction (Rabahi et al., 2013).

Such results raised the question of a possible physical preparation before performing mental calculations. The aim of the present study was thus to determine the possible influence of vertical squat jump on the performance of mental subtractions.

Fourty subjects participated to the study (19-22 years of age). All of them performed 2 series of 5 subtractions. These series were the following: (1) 17 – 8; 24 – 6; 34 – 7; 45 – 6; 56 – 8; (2) 15 – 6; 26 – 8; 36 – 7; 46 – 8; 53 – 6. The order of presentation of the 2 series was counterbalanced from one subject to another and the order of the subtractions in a given series was randomly assigned for each subject. The experimental task was designed by using the software SuperLab4®. The subtractions were shown on the screen of a 13 inches laptop and the subjects answered by using the keypad of an external keyboard.

The 40 subjects were divided in 2 groups:

(1) 25 subjects (experimental group, EG) realized a first series of 5 subtractions, followed by 5 vertical squat jumps (1 mn rest between 2 jumps), then by a second series of 5 subtractions,

(2) 15 control subjects (CG) performed the 2 series of 5 subtractions and simply sat during 5 mn between a series and the following one.

The results of a mixed-design analysis of variance (ANOVA with repeated measures and a between-subjects factor) showed both a main effect of time (i.e.: of the repetition of the two series of subtraction; $p < 0.01$) and an interaction effect between time and groups ($p < 0.05$). A between-subjects effects was also found ($p < 0.05$). The CG subjects improved RT by 5% from one series of subtractions to the other thus showing a possible effect of habituation. The EG subject improved RT by 15% thus showing a possible influence of vertical squat jumps and implying a possible influence of PE on mental calculation.

Keywords: Mathematics, Mental subtraction, Physical Education.

1 INTRODUCTION

Several usual activities such as shopping, or card games, require mathematical abilities. For example, a mental subtraction may be useful for determining the exact amount of money that one will have after a given purchase. Reciprocally, several studies suggested that numeracy-related activities practised at home by children may provide them bases for mathematical learning at school (e.g.: Bjorklund et al., 2004; Ramani & Siegler, 2008). In the case of young Canadian children (either in kindergarten, or in Grade 1, or in Grade 2) LeFevre et al. (2009) found a correlation between: (1) the capacity of the

subjects to respond correctly and quickly to addition problems and (2) the frequency of their informal activities (e.g.: board games) involving mathematical components. The acquisition of mathematics and/or the performance in maths may be favored by such informal activities. Following an embodied view on cognition (e.g.: Barsalou, 2008, 2010) these activities may provide sensorimotor experiences supporting the development of abstract representations relevant in mathematics.

The use of fingers to learn to count or to calculate may be considered as emblematic of such sensorimotor experiences. For centuries, human beings of different cultures have used their fingers to support their representations of numbers and quantities, to count objects and/or to make calculations (Buttenworth, 1999; Ifrah, 1994). Fingers are thus used to help Occidental children in the acquisition of number concepts or to solve arithmetic problems (e.g.: Imbo et al., 2011; Sato and Lalain, 2008). In addition, Noel (2005) showed that the score of children in finger discrimination tests evaluating finger gnosis (i.e.: the ability of a subject to mentally represent his/her fingers) may predict their numerical abilities (e.g.: digit comparison) and arithmetical abilities (addition task). Although adults generally do not use their fingers overtly to solve arithmetic problems such link between mathematical abilities and finger gnosis was found to be independent from age (Chinello et al., 2013; see also Penner-Wilger et al., 2014).

Other studies showed a link between finger counting and numerical abilities or arithmetical abilities in the case of adults. For example, Domahs et al. (2010) compared the response times (RTs) in a task of numbers comparison among three groups of adult subjects: (G1) Chinese one-hand counters (1 to 5 counted on the fingers of the right hand, 6 to 9 counted on the same hand by symbolic fingers configurations and 10 meant by crossing the forefingers of both hands); (G2) and (G3) German subjects, respectively hearing and deaf subjects, counting on their two hands without using any finger configuration in a symbolic way. Results showed that both G2 and G3 subjects were slower (RTs) than G1 subjects to compare pairs of numbers including at least one number superior to 5. Although such results might be modulated by individual and/or situational factors (e.g.: Wasner et al, 2014) the results of Domahs et al. (2010) were confirmed by Morissey et al. (2016). Imbo et al. (2011) also showed that adult subjects realized slower mental additions and subtractions during passive hand movements (generated by the experimenter) when using counting-based strategies (e.g.: counting one-by-one to solve $8 + 3$).

Neuroimaging studies also suggested that hand motor circuits (e.g.: Hanakawa et al., 2002; Kansanku et al., 2007) and the brain circuits underlying the representation of hand configurations and of fingers (e.g.: Andres et al., 2012; Tschentscher et al., 2012) may be involved in numerical tasks and/or arithmetic tasks. For example, by using Functional Magnetic Resonance Imagery (fMRI) Berteletti and Booth (2015) compared in 8-13 years old subjects the functional activations in finger somatosensory and motor cerebral areas during the calculation of subtractions and of multiplications. An increased functional activation was observed in motor areas during the subtraction problems (which generally favor the involvement of finger-based strategies as they require more quantity manipulation and less verbal retrieval than multiplication problems). A significant functional activation in the somatosensory area was also found during both subtraction and multiplication problems which suggests a possible involvement of finger representation.

A spatial representation of numerical magnitude may also be rooted in sensorimotor experience of the physical space. An example of such spatial-numerical relation, known as effect of Spatial Numerical Association of Response Codes (SNRAC), was found by Dehaene et al. (1993). The experimental task was an odd-even classification task of numbers from 0 to 9. In some trials the subjects used their left hand to answer "odd" and their right hand to answer "even" while it was the opposite in the other trials. It was found that the hand used to answer interfered on RT whether the answer was "odd" or "even". The subjects answered faster: (1) with their left hand in the case of small numbers (e.g.: 2) and (2) with their right hand in the case of large numbers (e.g.: 8). This effect was identical for left- and right-handed subjects and it was also found not to change when the subjects' hands were crossed. Such results thus suggested the existence of a representation of numbers along a so-called mental (horizontal) number line (for a meta-analysis, see: Wood et al., 2008), the increasing order of the numbers along this line (from left to right vs from right to left) being culturally dependant (e.g.: Zebian, 2005). Moreover, the relative location of the hands of a subject in the physical space was the determining factor of RT, which suggests a possible influence of sensorimotor experience.

Other studies suggested that such spatial codes, possibly rooted in sensorimotor experience, play a role in mental arithmetic (e.g.: McCrink et al., 2007). For example, in a study by Pinhas and Fischer (2008) subjects had to point to where the outcome of either an addition, or a subtraction, was located on a visually given number line. The results showed leftward spatial biases after subtracting and

rightward spatial biases after adding. Pinhas et al. (2014) also found that such compatibility effect may be produced by arithmetical operation signs (- and +). More supports were given by studies examining the possible influence of body movements on number processing (for a review, see: Tran et al., 2017). For example, Loetscher et al. (2008) showed that when subjects had to name numbers (between 1 and 30) in a random order they produced smaller numbers when their head turned to the left and larger numbers when their head turned to the right. Anelli et al. (2014) also found such compatibility effect in the case of additions and subtractions performed while walking rightward vs leftward, this effect being however mainly observed in the case of additions. Such interference of movements of body parts or of the whole body during arithmetical tasks thus suggest: (1) a representation of numerical magnitude and/or of mathematical calculations organised along a virtual horizontal axis and (2) the possible influence of sensorimotor experience in the elaboration and use of this representation.

Several studies also suggested that such representation may be organised along a vertical axis. This was supported by a study by Wiemers et al. (2014) including two experiments during which the subjects calculated additions and subtractions while: (1) continuously moving their right arm left- right-up- or downwards, (2) the statement of the arithmetical problem (shown on a screen) was moving in one of these four directions. In experiment (1) a compatibility effect was observed during spatial actions along both the horizontal and vertical axes. In experiment (2) a compatibility effect was found in the case of vertical displacements only. Winter and Matlock (2013) moreover found a stronger compatibility effect of vertical head movements than of horizontal head movements in the production of random numbers. In the case of down- and upward movements of the whole body Lugli et al. (2013) found such compatibility effect during additions and subtractions. In this study the subjects performed additions or subtractions either during (on-line condition), or after (off-line condition), an ascending or a descending motion produced either by walking in stairs (active mode) or by taking an elevator (passive mode). Results showed a compatibility effect in the passive mode in on-line condition.

While several studies examined the influence of motion on numerical cognition the reverse influence has been less studied. However, Hartman et al. (2012) observed a compatibility effect in subjects having to detect the direction of a passive motion of their whole body (leftward vs rightward direction) while hearing numbers. In a study of the influence of action verbs on the performance of a squat vertical jump (SVJ) Rabahi et al. (2013) found an improvement of SVJ height after mental subtraction. This finding cannot be explained by any compatibility effect as the results showed an influence of subtraction on the performance of an upward motion of the subject's center of mass (from the push-off phase of the SVJ to the apex of the flight phase). This improvement might however be explained by a direction of attention on the vertical direction during and following mental subtraction. Rabahi et al. (2013) found in any case an improvement of SVJ height after pronouncing the verb "win" as after pronouncing its antonym "lose" while they found no statistically significant influence of verbs not specifically linked to the task (SVJ).

Several studies suggested that numerical cognition may be rooted in sensorimotor experiences. Such experiences may for example favour the elaboration of spatial codes useful for the representation of numerical magnitude or for the mental calculation (e.g.: Fischer and Brugger, 2011; Hubbard et al., 2005; McCrink et al., 2007). Reciprocally numerical tasks and/or arithmetical tasks may involve motor and/or somatosensory areas (e.g.: Berteletti and Booth, 2015). Such analyses led researchers to consider possible implications for mathematical education (e.g.: Wiemers et al., 2014). For example, Goldin-Meadow et al. (2009) showed that gestures can improve mathematical learning. These findings also raise the question of a possible physical preparation *before* performing mental calculations. The aim of the present study was thus to determine the possible influence of SVJ on the performance of subsequent mental subtractions.

2 METHODOLOGY

This study was approved by the Institutional Review Board of Claude Bernard University and the subjects asked to participate to the experimental protocol gave their informed consent. To determine the possible influence of SVJ on the performance of mental subtractions a two-group experimental design was used.

2.1 Subjects and experimental procedure

A group of 40 undergraduate Sport Science students (19-22 years) took part to the experiment. After a phase of familiarization all subjects performed a series of 5 mental subtractions as a pre-test (Pre-T). Subsequently, 15 subjects, defined as reference subjects (control group, CG), remained comfortably

seated during 5 mn and 25 subjects performed 5 squat vertical jumps (SVJs) with 1 mn rest between 2 consecutive jumps (experimental group, EG). Directly after that both groups performed another series of 5 mental subtractions as a post-test (Post-T). Each subject was alone with the experimenter to perform these tasks. The subjects were left unaware of any expected result of the experiment.

2.2 Pre and post tests

Both CG and EG subjects performed 2 series of 5 mental subtractions (respectively as a Pre-T and as a Post-T, see: §2.1). The subjects were instructed to find the correct result of each subtraction as fast as possible. Before experiment they realized 2 trials to ensure their understanding of the experimental task and to familiarize them with this task.

The 2 series of 5 subtractions were designed by using the software SuperLab4©. These 2 series were the following: (1) $17 - 8$; $24 - 6$; $34 - 7$; $45 - 6$; $56 - 8$; (2) $15 - 6$; $26 - 8$; $36 - 7$; $46 - 8$; $53 - 6$. Each subtraction was different from the others to avoid an influence of the memorization of a result on a following calculation. In return there were similarities between the 2 series of subtractions to limit a possible influence of the difficulty: (1) In each mental calculation a single-digit number had to be subtracted from a two-digit number, (2) the single-digit numbers were the same in both series (6 was used twice, 7 was used once and 8 was used twice), (3) the tens of the two-digit numbers were the same in both series (10, 20, 30, 40 and 50), (4) the sums of the single-digit numbers as well as the sums of the two-digit numbers were the same in both series (respectively 35 and 17). In addition, the order of presentation of the 2 series (Pre-T vs Post-T) was counterbalanced from one subject to another and the order of the subtractions in a given series was randomly assigned by the software.

Each subtraction to be calculated was presented on the screen of a 13 inches laptop put on a desk. Before each subtraction a cross of fixation (Calibri, Font size 90) was shown at the center of the screen during 3 s (Figure 1.a). This cross allowed the subjects to get ready for the calculation. The statement of the subtraction to be done appeared thereafter at the centre of the screen (Calibri, Font size 48, Figure 1.b). The subjects sat in front of the screen and used the numeric keypad of an external keyboard with their dominant hand to give the result of each calculation (Figure 1.c). This external keyboard was placed on the desk so that the numeric keypad was in front of the median part of the laptop (Figure 1.d).

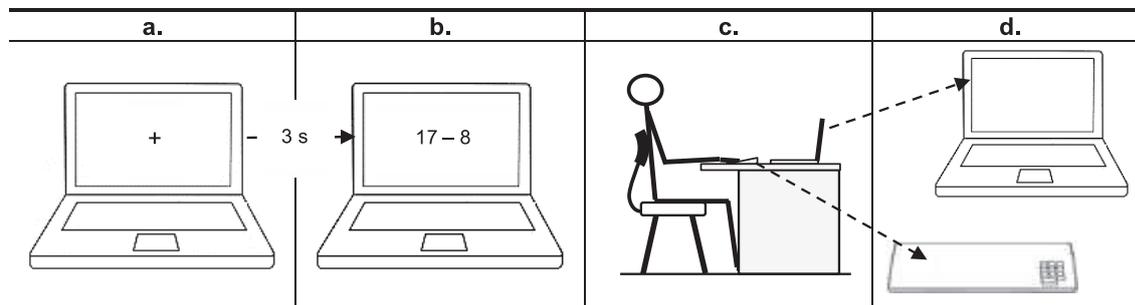


Figure 1 – Pre and Post tests: general procedure.

Figure 1 shows the general procedure to organize the subtraction tasks: (a) cross of fixation shown at the center of the screen of the laptop during 3 s, (b) statement of a subtraction shown at the center of the screen, (c) subject sat in front of a 13 inches laptop (put on a desk) with his/her dominant hand at the level of the numeric keypad of an external keyboard, (d) numeric keypad in front of the median part of the laptop.

The software determined whether a given response was correct or not (by comparing this response with the corresponding correct response previously saved). For each subtraction RT was processed by the software from the appearance of the statement of the subtraction on the screen to the instant when any keypad key was pressed by the subject. A cross of fixation was shown on the screen 2 s after the response was given by the subject (*i.e.*: after 2 s of inactivity of the keypad following its use by the subject). These time marks are recapitulated Figure 2.

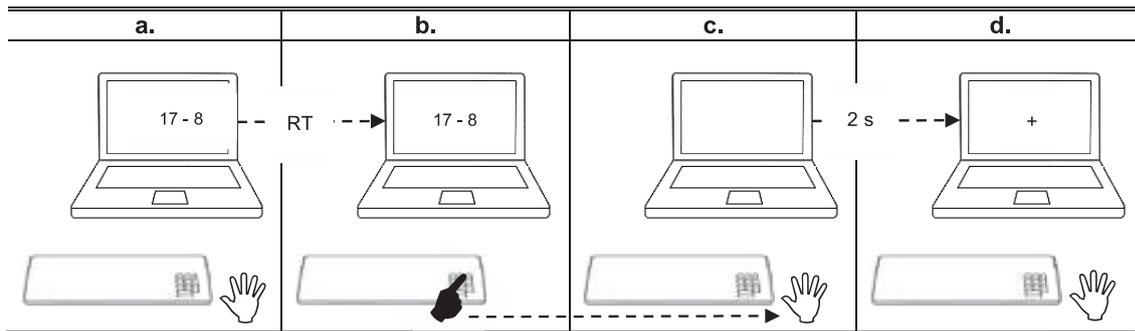


Figure 2 – Pre and Post tests: time marks.

Figure 2 shows the used time marks: (a) computation of the response time (RT) beginning from the appearance of the statement of a subtraction on the screen of the laptop (before the use of the keypad by the subject, ) (b) computation of RT ending when the subject started to press a key of the numeric keypad (, even when 2 keys had to be pressed to type the result of a subtraction, e.g.: 56 – 8), (c) when the subject stopped to use the keypad the screen of the laptop remained blank during 2 s () (d) appearance of a cross of fixation () (hand icon).

2.3 Squat Vertical Jump (SVJ)

After Pre-T the EG subjects performed 5 squat vertical jumps (SVJs, Figure 3). SVJs were realized after a demonstration by the experimenter. Before each SVJ the experimenter encouraged the subject to jump high (the height of jump was not measured).

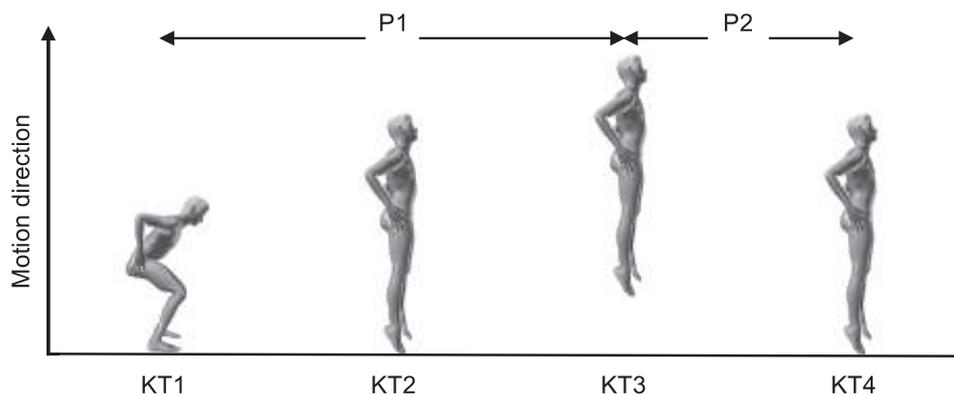


Figure 3 – Squat vertical jump.

Figure 3 shows the key times (KT) and phases (P) of a SVJ. P1: push-off phase (realized without initial countermovement, it starts when the subject's segments start to rotate and ends at take-off). P2: flight phase (it starts at take-off and ends at the instant of landing). KT1: initial position (the subject stands steel, heels on the ground, knee joint angle of $\sim 90^\circ$, hands on hips). KT2: take-off, *i.e.*: end of contact between the ground and the subject. KT3: peak of the flight phase, *i.e.*: the mass center of the subject reaches its maximal height of flight. KT4: landing, *i.e.*: moment at which the feet of the subject touch again the ground.

2.4 Statistical analysis

A mixed-design analysis of variance (ANOVA) with repeated measures (Pre-T vs Post-T) and a between-subjects factor (EG vs CG) was performed.

3 RESULTS

The mean error rate of the calculations was lower than 4% in both Pre-T and Post-T. The RTs of the correct responses only were considered to perform the statistical analysis. In Pre-T the mean RT was of 2657.3 ± 637.03 in EG and of 2909.28 ± 700.99 in CG (Table 1). In Post-T the mean RT was of

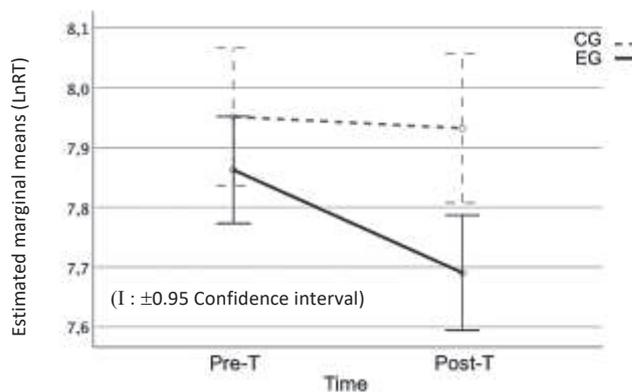
2242.2±541.94 in EG and of 2878.71±854.27 in CG (Table 1). The RTs were log-transformed (natural logarithm, Ln) to obtain a normal distribution of the data (Table 1).

Table 1. Response Times in Pre and Post tests

	Pre-T		Post-T	
	RT (ms)	LnRT	RT (ms)	LnRT
EG	2657.3±637.03	7.86±0.22	2242.2±541.94	7.69±0.22
CG	2909.28±700.99	7.95±0.23	2878.71±854.27	7.93±0.26

Mean RTs (\pm Standard Deviation) and mean log-transformed RTs (LnRT, \pm Standard Deviation) in pre- and post -tests (Pre-T and Post-T) for both experimental group (EG) and control group (CG).

The results of the performed mixed-design ANOVA (repeated measures with a between subject factor) showed a main effect across the two time points [*i.e.*: Pre-T vs Post-T; $F(1,38) = 15.977$; $p < 0.01$] and an interaction between time and groups [$F(1,38) = 10.172$, $p = 0.03$]. A difference between groups (EG vs CG) was also found [$F(1, 38) = 5.410$, $p = 0.025$]. Pairwise comparisons showed: (1) no significant difference between EG and CG in Pre-T [Mean difference (CG – EG) = 0.072, $p = 0.225$], (2) a significant difference between EG and CG in Post-T [Mean difference (CG – EG) = 0.242, $p = 0.004$], (3) no significant difference between Pre-T and Post-T in CG [Mean difference (Pre-T – Post-T) = 0.019, $p = 0.662$], and (4) a significant difference between Pre-T and Post-T in EG [Mean difference (Pre-T – Post-T) = 0.172, $p < 0.01$]. These differences between EG and CG / Pre-T and Post-T are shown Figure 4.



CG = Control Group; EG = Experimental group; Pre-T = Pre test; Post-T = post test

Figure 4 – Comparisons of log-transformed response times

4 CONCLUSIONS

Several studies suggested: (1) the existence of a possible link between sensorimotor experiences and mathematical abilities and (2) the involvement of somatosensory and/or motor areas during numerical tasks and arithmetical tasks. Such studies suggested that sensorimotor experiences may lead to the elaboration of spatial codes supporting a representation of numerical magnitude and/or the realization of mathematical calculations. It was in addition shown that: (1) such spatial codes may be linked to the physical experience of the vertical dimension of the space and (2) motions of the body in the vertical direction may influence the realization of different mathematical tasks. The aim of this study was thus to examine the possible influence of the realization of squat vertical jumps (SVJs) on the subsequent realization of mental subtractions. Subjects of the experimental group (EG) performed successively: (1) a series of 5 mental subtractions (Pre-T), (2) 5 SVJs, (3) another series of 5 mental subtractions (Post-T). Subjects of the control group (CG) performed these series of mental subtractions but simply remained seated during the whole experiment.

This study examined the log-transformed response times (LnRTs) of the correct calculations in Pre-T and Post-T. With this aim a mixed-design ANOVA with repeated measures (Pre-T vs Post-T) and a

between-subjects factor (EG vs CG) was performed. The results showed that the mean LnRT of EG subjects was significantly faster than the mean LnRT of CG subjects in Post-T (respectively: 7.69 ± 0.22 and 7.93 ± 0.26) while the mean LnRT of EG subjects and the mean LnRT of CG subjects were not significantly different in Pre-T (respectively: 7.86 ± 0.22 and 7.95 ± 0.23). A slight improvement of the mean LnRT from Pre-T to Post-T was found in CG subjects (respectively: 7.95 ± 0.23 and 7.93 ± 0.26), which was not statistically significant. Conversely a statistically significant improvement of the mean LnRT from Pre-T to Post-T was observed in EG subjects (respectively: 7.86 ± 0.22 and 7.69 ± 0.22).

This study thus showed an improvement of LnRT in mental subtractions after the realization of SVJs while Rabahi et al. (2013) found an influence of mental subtraction on the subsequent performance of a SVJ (*i.e.*: on jump height). Both results might be explained by a direction of attention on a vertical component (see: §1.). In addition, the present study suggests a possible compatibility effect as the realization of a SVJ includes a downward motion of the body (phase of landing, see: §2.3). More experimental data are needed to support such hypotheses. Lugli et al. (2013) observed a compatibility effect during a passive motion realized by taking an elevator but not after such motion. Finally, while several studies stimulated the reflection upon sensorimotor experiences supporting mathematical learning, the present study emphasizes the possible interest of a physical preparation (PE) before performing mental calculations.

REFERENCES

- [1] M. Andres, N. Michaux, & M. Pesenti, "Common substrate for mental arithmetic and finger representation in the parietal cortex", *NeuroImage*, vol. 62, no. 3, pp. 1520-1528, 2012. doi:10.1016/j.neuroimage.2012.05.047
- [2] F. Anelli, L. Lugli, G. Baroni, A. M. Borghi, & R. Nicoletti, "Walking boosts your performance in making additions and subtractions", *Frontiers in Psychology*, vol. 5, no. 1459, 2014, doi: 10.3389/fpsyg.2014.01459
- [3] L. W. Barsalou, "Grounded cognition", *Annual Review of Psychology*, vol. 59, pp. 617-645, 2008. doi: 10.1111/j.1756-8765.2010.01115.x
- [4] L. W. Barsalou, "Grounded Cognition: Past, Present, and Future", *Topics in Cognitive Science*, vol. 2, no. 4, pp. 716-724, 2010. doi: 10.1111/j.1756-8765.2010.01115.x
- [5] I. Berteletti, & J. R. Booth, "Perceiving fingers in single-digit arithmetic problems", *Frontiers in Psychology*, vol. 6, no. 226, 2015, doi: 10.3389/fpsyg.2015.00226
- [6] D. F. Bjorklund, M. J. Hubertz, & A. C. Reubens, "Young children's arithmetic strategies in social context: How parents contribute to children's strategy development while playing games", *International Journal of Behavioral Development*, vol. 28, no. 4, pp. 347-357, 2004. doi: 10.1080/01650250444000027
- [7] B. Butterworth, *The Mathematical Brain*. London: Macmillan, 1999.
- [8] S. Dehaene, S. Bossini, & P. Giroux, "The mental representation of parity and number magnitude", *Journal of Experimental Psychology: General*, vol. 122, no. 3, pp. 371-396, 1993. doi: 10.1037/0096-3445.122.3.371
- [9] F. Domahs, E. Klein, K. Moeller, H. C. Nuerk, B.-C. Yoon, & K. Willmes, "Multimodal semantic quantity representations: Further evidence from Korean sign language", *Frontiers in Psychology*, vol. 2, no. 389, 2010. doi:10.3389/fpsyg.2011.00389
- [10] S. Goldin-Meadow, S. W., Cook, & Z. A. Mitchell, "Gesturing gives children new ideas about math", *Psychological Science*, vol. 20, no. 3, pp. 267-272, 2009. doi: 10.1111/j.1467-9280.2009.02297.x
- [11] T. Hanakawa, M. Honda, N. Sawamoto, T. Okada, Y. Yonekura, H. Fukuyama, & H. Shibasaki, "The role of rostral Brodmann area 6 in mental-operation tasks: an integrative neuroimaging approach", *Cerebral Cortex*, vol. 12, no. 11, pp. 1157-1170, 2002. doi: 10.1093/cercor/12.11.1157
- [12] M. Hartman, L. Grabherr, & F. W. Mast, "Moving along the mental number line: Interactions between whole-body motion and numerical cognition", *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, vol. 36, no. 6, pp. 1416-1427, 2012. doi:10.1037/a0026706

- [13] E. M. Hubbard, M. Piazza, P. Pinel, & S. Dehaene, "Interactions between number and space in parietal cortex", *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 6, no. 6, pp. 435-448, 2005. doi:10.1038/nrn1684
- [14] G. Ifrah, *Histoire des chiffres*, 2nd Ed. Paris: Robert Laffont, 1994.
- [15] I. Imbo, A. Vandierendonck, & W. Fias, "Passive Hand Movements Disrupt Adults' Counting Strategies", *Frontiers in Psychology*, vol. 2, no. 201, 2011, doi: 10.3389/fpsyg.2011.00201
- [16] K. Kansaku, B. Carver, A. Johnson, K. Matsuda, N. Sadato, & M. Hallett, "The role of the human ventral premotor cortex in counting successive stimuli", *Experimental Brain Research*, vol. 178, no. 3, pp. 339-350, 2007. doi: 10.1007/s00221-006-0736-8
- [17] J.-A. LeFevre, S.-L. Skwarchuk, B.L. Smith-Chant, L. Fast, D. Kamawar, & J. Bisanz, "Home numeracy experiences and children's math performance in the early school years", *Canadian Journal of Behavioural Science*, vol. 41, no. 2, pp. 55-66, 2009. doi: 10.1037/a0014532
- [18] T. Loetscher, U. Schwarz, M. Schubiger, & P. Brugger, "Head turns bias the brain's internal random generator", *Current Biology*, vol. 18, no. 2, pp. 60-62, 2008. doi: 10.1016/j.cub.2007.11.015
- [19] L. Lugli, G. Baroni, F. Anelli, A. M. Borghi, & R. Nicoletti "Counting Is Easier while Experiencing a Congruent Motion", *PLoS ONE*, vol. 8, no. 5, 2013, doi: 10.1371/journal.pone.0064500
- [20] K. McCrink, S. Dehaene, & G. Dehaene-Lambertz, "Moving along the number line: Operational momentum in nonsymbolic arithmetic", *Perception and Psychophysics*, vol. 69, no. 8, pp. 1324-1333, 2007. Doi: 10.3758/BF03192949
- [21] K. R. Morrissey, M. Liub, J.i Kangc, D. Halletta, & Q Wang, "Cross-Cultural and Intra-Cultural Differences in Finger-Counting Habits and Number Magnitude Processing: Embodied Numerosity in Canadian and Chinese University Students", *Journal of Numerical Cognition*, vol. 2, no. 1, pp. 1-19, 2016. doi:10.5964/jnc.v2i1.14
- [22] M.-P. Noël, "Finger gnosis: a predictor of numerical abilities in children?" *Child Neuropsychology*, vol. 11, no. 4, pp. 413-430, 2005. doi: 10.1080/09297040590951550
- [23] M. Penner-Wilger, R. J. Waring, & A. T. Newton, "Subitizing and finger gnosis predict calculation fluency in adults" in *Proceedings of the 36th Annual Conference of the Cognitive Science Society* (P. Bello, M. Guarini, M. McShane, & B. Scassellati eds.), pp. 1150-1155, Austin, TX, USA: Cognitive Science Society, 2014.
- [24] M. Pinhas, & M. H. Fischer, "Mental movements without magnitude? A study of spatial biases in symbolic arithmetic", *Cognition*, vol. 109, pp. 408-415, 2008. doi: 10.1016/j.cognition.2008.09.003
- [25] M. Pinhas, S., Shaki, & M. H. Fischer, "Heed the signs: operation signs have spatial associations", *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, vol. 67, no. 8, pp. 1527-1540, 2014. doi: 10.1080/17470218.2014.892516
- [26] T. Rabahi, P. Fargier, A. Rifai Sarraj, C. Clouzeau, & R. Massarelli, "Effect of Action Verbs on the Performance of a Complex Movement", *PLoS ONE*, vol. 8, no. 7, 2013, doi: 10.1371/journal.pone.0068687
- [27] G. Ramani, & R. S. Siegler, "Promoting broad and stable improvements in low-income children's numerical knowledge through playing number board games", *Child Development*, vol. 79, no. 2, pp. 375-394, 2008. doi: 10.1111/j.1467-8624.2007.01131.x
- [28] C. Tran, B. Smith, & M. Buschkuehl, "Support of mathematical thinking through embodied cognition: Nondigital and digital approaches", *Cognitive Research: Principles and Implications*, vol. 2, no. 16, 2017. doi: 10.1186/s41235-017-0053-8
- [29] N. Tschentscher, O. Hauk, M. H. Fischer, & F. Pulvermüller, "You can count on the motor cortex: finger counting habits modulate motor cortex activation evoked by numbers", *Neuroimage*, vol. 59, no. 4, pp. 3139-3148, 2012. doi: 10.1016/j.neuroimage.2011.11.037
- [30] M. Wasner, K. Moeller, M. H. Fischer, & H.-C. Nuerk, "Aspects of situated cognition in embodied numerosity: the case of finger counting", *Cognitive Processing*, vol. 15, no. 3, pp.317-328, 2014. doi: 10.1007/s10339-014-0599-z

- [31] M. Wiemers, H. Bekkering, & O. Lindemann, "Spatial interferences in mental arithmetic: evidence from the motion-arithmetic compatibility effect", *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, vol. 67, no. 8, pp. 1557-1570, 2014. doi: 10.1080/17470218.2014.889180
- [32] B. Winter, & T. Matlock, "More is up... and right: Random number generation along two axes", in *Proceedings of the 35th Annual Conference of the Cognitive Science Society* (M. Knauff, M. Pauen, N. Sebanz, & I. Wachsmuth eds.), pp. 3789-3974, Austin, TX: Cognitive Science Society, 2013.
- [33] G. Wood, K. Willmes, H. C. Nuerk, & M. H. Fischer, "On the cognitive link between space and number: a meta-analysis of the SNARC effect", *Psychology Science Quarterly*, vol. 50, no. 4, pp. 489-525, 2008.
- [34] S. Zebian, "Linkages between Number Concepts, Spatial Thinking, and Directionality of Writing: The SNARC Effect and the REVERSE SNARC Effect in English and Arabic Monoliterates, Biliterates, and Illiterate Arabic Speakers", *Journal of Cognition and Culture*, vol. 5, no. 1, pp. 165-190, 2005. doi: 10.1163/1568537054068660