

Université de Montréal

**Lien entre l'activité pariéto-occipitale enregistrée pendant
une tâche de mémoire à court terme visuelle et les habiletés
mathématiques : une étude en magnétoencéphalographie**

par

Aubrée Boulet-Craig

Département de psychologie
Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de maîtrise
en psychologie

Août, 2014

© Aubrée Boulet-Craig, 2014

Résumé

La mémoire à court terme visuelle (MCTv) est un système qui permet le maintien temporaire de l'information visuelle en mémoire. La capacité en mémoire à court terme se définit par le nombre d'items qu'un individu peut maintenir en mémoire sur une courte période de temps et est limitée à environ quatre items. Il a été démontré que la capacité en MCTv et les habiletés mathématiques sont étroitement liées. La MCTv est utile dans beaucoup de composantes liées aux mathématiques, comme la résolution de problèmes, la visualisation mentale et l'arithmétique. En outre, la MCTv et le raisonnement mathématique font appel à des régions similaires du cerveau, notamment dans le cortex pariétal. Le sillon intrapariétal (SIP) semble être particulièrement important, autant dans la réalisation de tâches liées à la MCTv qu'aux habiletés mathématiques. Nous avons créé une tâche de MCTv que 15 participants adultes en santé ont réalisée pendant que nous enregistrions leur activité cérébrale à l'aide de la magnétoencéphalographie (MEG). Nous nous sommes intéressés principalement à la composante SPCM. Une évaluation neuropsychologique a également été administrée aux participants. Nous souhaitons tester l'hypothèse selon laquelle l'activité cérébrale aux capteurs pariéto-occipitaux pendant la tâche de MCTv en MEG sera liée à la performance en mathématiques. Les résultats indiquent que l'amplitude de l'activité pariéto-occipitale pendant la tâche de MCTv permet de prédire les habiletés mathématiques ainsi que la performance dans une tâche de raisonnement perceptif. Ces résultats permettent de confirmer le lien existant entre les habiletés mathématiques et le fonctionnement sous-jacent à la MCTv.

Mots-clés : Mémoire à court terme visuelle, capacité en mémoire à court terme, magnétoencéphalographie, champs magnétiques reliés aux événements, habiletés mathématiques, attention visuelle, vitesse de traitement

Abstract

Visual short-term memory (VSTM) is a memory system that permits the temporary retention of visual information. Short-term memory capacity can be defined by the amount of information that an individual can remember over a short period of time and is limited to about four items. It was shown that VSTM capacity and mathematical abilities are closely related. VSTM is useful for a lot of components linked to mathematical skills like word problem solving, mental visualisation and arithmetic. Moreover, VSTM and mathematical reasoning activate similar brain regions, mainly within the parietal cortex. The intraparietal sulcus (IPS) appears to be particularly important both in the realization of VSTM tasks and mathematical reasoning tasks. We created a VSTM task which 15 healthy adult participants completed while we recorded their brain activity using magnetoencephalography (MEG). We were mainly interested in the SPCM component. A neuropsychological assessment was also administrated to the participants. We wanted to verify the hypothesis stipulating that cerebral activity recorded at parieto-occipital sensors during the VSTM task should be linked to performance in mathematics. The results indicate that parieto-occipital activity during the VSTM tasks predicted mathematical abilities as well as performance on a perceptive reasoning task. These results confirmed the link existing between mathematical abilities and VSTM functioning.

Keywords : Visual short-term memory, short-term memory capacity, magnetoencephalography, event-related magnetic fields, mathematical abilities, visual attention, processing speed

Table des matières

Résumé	i
Abstract	ii
Liste des tables et figures	v
Liste des abréviations	vi
Remerciements	viii
Introduction générale	1
Historique de l'étude de la mémoire à court terme.....	1
Mémoire à court terme visuelle	2
SPCM.....	3
MCTv et activation pariétale	4
Habilités mathématiques et activation pariétale.....	5
Habilités mathématiques et MCTv	6
Magnétoencéphalographie	8
Design expérimental et tests préliminaires	9
Hypothèses	11
Contributions à l'article	12
Article	13
Abstract	14
Introduction	14
Material and Methods	16
Participants	16
Procedure	16
Neuropsychological assessment	16
MEG Procedure : visual short-term memory task	17
MEG Recordings	18
MEG Analysis	18
Statistical Analysis	20

Results	20
Behavior	20
Neuropsychological assessment	20
Cowan's k	21
ERF – Event-related fields	22
Analysis of ERF's and neuropsychological measures	22
Discussion	24
SPCM's amplitude and memory load	24
Global parieto-occipital activity and mathematical abilities	25
SPCM's amplitude, visual attention and processing speed	26
Conclusion.....	27
Acknowledgements	28
References	28
Discussion générale	32
Champs magnétiques reliés aux évènements : SPCM.....	32
MCTv et performance mathématique.....	33
MCTv et apprentissage verbal.....	36
MCTv et vitesse de traitement.....	36
Perspectives.....	38
Limites.....	40
Conclusion.....	42
Références générales	43

Liste des tables et figures

Article

Figure 1 : Stimulation protocol. Each trial had a duration of 6400ms. Feedback was provided for 500ms during the last portion of the trial. Then, there was a blink duration of 1000ms. A load 3, encode-left trial, requiring the answer “same” is illustrated.....	18
Figure 2 : The posterior cluster of MEG sensors (A) was divided in a right (B-C) and a left (D-E) cluster. Midline sensors were not included in the analysis. An average of the signal across ROI sensors was performed in order to extract a mean cerebral activation waveform.....	19
Figure 3 : Amplitude of SPCM calculated at left and right clusters. Data was filtered for visualisation only.....	22
Table 1 : Mean results on neuropsychological evaluation subtests in our sample. The results are presented in percentiles. SEM in parenthesis.....	20
Table 2 : Mean Results of k by load. SEM in parenthesis.....	22

Discussion générale

Table 1 : Niveau de performance des participants à la tâche de MCTv selon la condition assignée pour la réponse « identique ».....	41
--	----

Liste des abréviations

EEG : électroencéphalographie

IRM : imagerie par résonance magnétique

IRMf : imagerie par résonance magnétique fonctionnelle

MCT : mémoire à court terme

MCTv : mémoire à court terme visuelle

MEG : magnétoencéphalographie

MLT : mémoire à long terme

ms : milliseconde

SIP : sillon intrapariétal

EEG : electroencephalography

ERF : event-related field

fMRI : functional magnetic resonance imaging

IPS : intraparietal sulcus

MEG : magnetoencephalography

ms : millisecond

ROI : region of interest

SEM : standard error mean

VSTM : visual short-term memory

« Our greatest weakness lies in giving up.

The most certain way to succeed is always to try just one more time »

Thomas A. Edison

Remerciements

Je tiens à remercier ma directrice de recherche, Sarah Lippé, qui a cru en mon potentiel et m'a accordé la possibilité d'acquérir une riche expérience en recherche. Merci pour ses précieux conseils, sa disponibilité, sa compréhension et sa gentillesse. Merci pour ses corrections et commentaires constructifs qui favorisent mon apprentissage. Travailler sous sa supervision est pour moi un honneur. Merci également à Pierre Jolicoeur et Philippe Robaey pour leur précieuse aide et leur collaboration dans la création du devis expérimental.

Je remercie également mes incroyables parents et mon frère pour leur support constant. Je les remercie de leur écoute et de leurs encouragements dans les moments difficiles. Merci de toujours croire en moi et de me redonner du courage lorsque celui-ci vient à manquer. Merci de toujours m'avoir appuyée et aidée depuis le début de mes études universitaires. Si je complète une maîtrise, c'est en grande partie grâce au soutien de ma famille.

Je remercie mon copain pour sa compréhension inégalée et son soutien émotionnel. Merci de prendre soin de moi et de toujours trouver les mots justes pour me redonner le sourire.

Je remercie finalement mes amis et collègues pour leurs conseils, leur appui et leur aide au cours de ces deux années de maîtrise.

Les travaux de ce mémoire ont été réalisés avec l'appui d'une bourse de maîtrise provenant d'une subvention des Instituts de recherche en santé du Canada (IRSC).

Introduction générale

Historique de l'étude de la mémoire à court terme

La mémoire à court terme (MCT) se définit comme étant un système de mémoire permettant le maintien et la manipulation d'une quantité limitée d'information pendant une courte période de temps (Wager & Smith, 2003). Le concept de mémoire à court terme est relativement ancien. À la fin des années 1800, William James fait déjà la distinction entre deux types de mémoire. Dans son ouvrage, *Principles of psychology*, paru en 1890, il émet les principes de la mémoire dite « primaire » et de la mémoire « secondaire ». Selon James, la mémoire primaire permettrait à un individu de retenir peu d'informations sur une période de temps limitée. Il définit la mémoire secondaire, quant à elle, comme un système renfermant un nombre illimité de connaissances qui nécessitent un effort dans le but d'être rappelées. À la même époque, Herman Ebbinghaus, un psychologue fondateur de l'étude expérimentale sur la mémoire, réalise des travaux qui stipulent également l'existence de deux types de mémoire (Baddeley, 1997).

Dans les années 1960, Atkinson et Schiffrin proposent un des premiers modèles complets de la mémoire. Il s'agit du modèle modal qui divise la mémoire en trois composantes. Le registre sensoriel permet de retenir une grande quantité d'informations visuelles pendant un laps de temps extrêmement court. La MCT constitue la deuxième composante et contient un petit nombre d'éléments, rappelés sous forme verbale pendant quelques secondes. La troisième composante, la mémoire à long terme (MLT), possède une capacité illimitée de stockage et renferme des informations de nature sémantique. La MCT est une composante essentielle du modèle modal, car elle permet le transfert de l'information vers la mémoire à long terme (Atkinson & Schiffrin, 1968).

En 1974, Alan Baddeley théorise un modèle spécifique de la MCT, ou mémoire de travail. Il actualise sa théorie au début des années 2000. Son modèle comporte quatre composantes et distingue l'encodage de l'information visuelle de l'encodage de type verbal. La première composante de son modèle se nomme la boucle phonologique et permet de retenir et de manipuler des informations sous forme verbale. La deuxième composante, le calepin

visuospatial, permet quant à elle le maintien des informations de type visuelles. Il nomme sa troisième composante le buffer épisodique, laquelle permet aux informations contenues en mémoire de travail d'accéder à la MLT épisodique. Le dernier élément de son modèle est l'administrateur central, un mécanisme attentionnel de coordination et de contrôle. Celui-ci intègre les informations afin de les mettre en relation avec les connaissances stockées en MLT (Baddeley, 1997; Baddeley, 2000).

Mémoire à court terme visuelle

En suivant le modèle de Baddeley, il est possible de stipuler l'existence de deux types de MCT distinctes, soit la MCT de type visuelle et la MCT verbale. La mémoire à court terme de type visuelle est un système de mémoire qui permet le maintien temporaire de l'information visuelle en mémoire. À travers les années, plusieurs chercheurs ont étudié le fonctionnement de la mémoire à court terme visuelle (MCTv).

Dans l'ouvrage, *Visual Memory*, paru en 2008, Steven J. Luck explique les propriétés de la MCTv. Il stipule que la MCTv est un système de mémoire qui comporte quatre propriétés qui la distinguent de la mémoire à long terme visuelle. Premièrement, les représentations en MCTv sont créées rapidement, les groupes d'objets y étant encodés à une vitesse d'environ 20 à 50 ms par item. Ensuite, les représentations en MCTv sont maintenues au moyen d'un mécanisme neural actif qui émet un signal nerveux soutenu pendant que les items sont maintenus en mémoire. La troisième propriété de la MCTv se caractérise du fait qu'elle semble avoir une capacité hautement limitée, un individu pouvant se souvenir de quelques objets à la fois seulement. Enfin, chaque représentation en MCTv ne contient qu'une quantité limitée d'information.

Une des découvertes majeures réalisées sur la MCTv est en lien avec la troisième propriété présentée plus haut. Il a effectivement été démontré que la capacité d'un individu en MCTv est très limitée. Le concept de capacité en mémoire à court terme se définit comme étant le nombre d'items qu'un individu peut se rappeler pendant une courte période de temps (Olesen, Nagy, Westerberg & Klingberg, 2003). La première tentative d'exploration de la capacité en MCTv a été réalisée par Luck & Vogel (1997) à l'aide d'un paradigme de

détection du changement. Dans leur paradigme expérimental, des groupes d'un, deux, trois, quatre, huit ou 12 cercles de couleurs étaient présentés au participant. Un changement dans le modèle de cercles était présent dans 50 % des essais et le participant devait mentionner s'il avait détecté un changement ou non. À l'aide de ce type de paradigme, Cowan (2000) est parvenu à créer une formule permettant de connaître la capacité en mémoire à court terme d'un individu, qu'il appelle k . Il suffit de soustraire la proportion de bonnes réponses, c'est-à-dire de changements corrects détectés (Hits) de la proportion de fausses alarmes, c'est-à-dire de changements détectés lorsqu'il n'y en avait pas (F.A) et de multiplier par le nombre d'items présentés (N), $k = N (\text{Hits} - \text{F.A})$. Grâce à cette formule, il a été démontré que la capacité moyenne des individus adultes en MCTv se limite à environ 3 ou 4 items.

SPCM

Comme il a déjà été mentionné, la MCTv a été examinée à maintes reprises à travers les années. Celle-ci a d'abord été étudiée avec des mesures comportementales classiques telles que les Blocs de Corsi. Dans ce type de test, l'individu évalué doit reproduire et retenir des séquences visuospatiales désignées par un examinateur sur une planche qui comporte des petits blocs distribués irrégulièrement et de façon non symétrique.

Plus récemment, des auteurs ont également étudié la MCTv en utilisant des appareils tels que l'électroencéphalographie (EEG), la magnétoencéphalographie (MEG) et l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) permettant de mesurer l'activité cérébrale. Des paradigmes spéciaux, inspirés des travaux de Luck, ont été créés dans lesquels plusieurs stimuli sont présentés au participant qui doit les garder en mémoire. La présentation des stimuli est suivie par une courte période de rétention. Selon les paradigmes, le participant doit par exemple rapporter le plus grand nombre de stimuli souvenus possibles, ou rapporter la couleur et la position d'un stimulus particulier.

À l'aide de ce type de paradigme, une composante électrophysiologique spécifique appelée SPCN (pour sustained posterior contralateral negativity) a été découverte en EEG pendant la période de rétention en MCTv (Brisson & Jolicoeur, 2007; Dell'Acqua, Sessa, Toffanin, Luria & Jolicoeur, 2009). Elle est observée dans le cadre d'expérimentations qui

requièrent le traitement et le maintien d'informations visuelles latéralisées. La SPCN est observée à environ 300 ms à 400 ms après la présentation d'un stimulus et reste relativement stable pendant l'entièreté de la période de rétention, jusqu'à 800-900 ms environ. Il a été prouvé que la SPCN s'est avérée être un indice valide du processus de fonctionnement de la MCTv. Plus précisément, la SPCN reflète le maintien de l'information par l'individu en MCTv : L'amplitude de la SPCN augmente avec le nombre d'items qu'un individu doit se rappeler et atteint un maximum lorsque la plus haute capacité de rétention en mémoire à court terme de l'individu est atteinte. L'amplitude de la SPCN est observée sur les capteurs pariéto-occipitaux PO7 et PO8 et est maximale au capteur contralatéral à la cible présentée. (Jolicoeur, Brisson & Robitaille, 2008; Perron et al., 2009; Vogel & Machizawa, 2004; Vogel, McCulloch & Machizawa, 2005).

Une composante équivalente à la SPCN a également été découverte en MEG. Il s'agit de la SPCM, pour sustained posterior contralateral magnetic field. De manière similaire, l'amplitude de la SPCM augmente en fonction de la capacité en MCTv de l'individu. Son amplitude est maximum sur plusieurs capteurs pariéto-occipitaux postérieurs. Il a également été démontré que l'amplitude de la SPCM à ces capteurs est modulée par le k ainsi que par le nombre d'items devant être gardés en mémoire (Robitaille, Grimault & Jolicoeur, 2009; Robitaille, Marois, Todd, Grimault, Cheye & Jolicoeur, 2010).

MCTv et activation pariétale

À l'aide d'outils tels que l'IRMf, plusieurs chercheurs ont voulu comprendre quelles régions du cerveau étaient impliquées dans la MCTv. Il semble que les cortex préfrontaux et pariétaux soient particulièrement importants. Une étude d'Olsesen, Westerberg & Klingberg (2004) a montré une augmentation de l'activité dans plusieurs régions pariétales à la suite d'un entraînement de la mémoire à court terme visuelle. Les augmentations d'activité ont été observées notamment dans le cortex pariétal supérieur, dans le cortex pariétal inférieur ainsi que dans le cortex intrapariétal. Plusieurs études ont corroboré ces résultats en montrant une activation soutenue dans le cortex pariétal supérieur et intrapariétal pendant la réalisation d'une tâche en mémoire à court terme visuelle (Klingberg, Forssberg, Westerberg, 2002; Palva, Kulashekar, Hämäläinen & Palva, 2011). En outre, il a été démontré que l'activité dans

le cortex pariétal postérieur est fortement liée à la quantité d'information qui peut être retenue en MCTv (Todd & Marois, 2004).

Parmi toutes les régions pariétales impliquées dans la MCTv, une région particulière semble être spécialement importante. Il s'agit du sillon intrapariétal (SIP). Il a été démontré que le SIP supérieur joue un rôle clé lors du stockage de l'information dans la MCTv. En effet, l'activation de cette région est fortement corrélée au nombre d'objets retenus par un individu en MCTv. Ces résultats suggèrent que le SIP supérieur agit comme un système flexible de stockage de l'information visuelle. De plus, le SIP supérieur présente un signal BOLD (de l'anglais blood-oxygen-level dependant) similaire à la composante SPCM observée en MEG. Tout comme pour la SPCM, il a été démontré que le signal BOLD dans cette région pariétale augmente de façon significative en fonction du nombre d'items présentés et est maximum pour les stimuli contralatéraux. Il semble ainsi que le SIP supérieur soit une des sources principales de la SPCM. Le SIP inférieur semble également jouer un rôle dans la MCTv. Certaines études ont montré une augmentation de l'activité BOLD dans le SIP inférieur en fonction de l'accroissement d'items maintenus en MCTv (Robitaille et al., 2010; Todd & Marois, 2004; Vogel & Machizawa, 2004; Xu, 2007).

Habiletés mathématiques et activation pariétale

Il a été prouvé que le cortex pariétal joue un rôle prédominant dans la MCTv. Cependant, les régions pariétales sont également importantes pour d'autres types d'habiletés. Notons que parmi celles-ci, il a été démontré que le cortex pariétal est fortement sollicité lors de la réalisation de tâches mathématiques. L'importance du cortex pariétal dans la performance mathématique a d'abord été démontrée à l'aide d'études sur des patients présentant des lésions cérébrales. En effet, les patients avec des lésions pariétales présentent plusieurs déficits relativement aux habiletés mathématiques. Entre autres, les lésions pariétales semblent créer des déficits spécifiques liés aux compétences numériques (Dehaene & Cohen, 1997; Denes & Signorni, 2001; Takayama, Sugishita, Akiguchi & Kimura, 1994; Zorzi, Priftis & Umiltà, 2002). Certains troubles développementaux en mathématiques sont aussi associés à des anomalies du cortex pariétal. Ainsi, il semble que la dyscalculie développementale soit

associée à des anomalies structurelles dans les régions du SIP (Isaacs, Edmonds, Lucas & Gadian, 2001; Kucian et al., 2006; Molko et al., 2004; Rotzer et al., 2008).

Tout comme pour les résultats présentés en MCTv, des études en fMRI ont tenté de comprendre quelles régions du cortex pariétal étaient activées pendant la réalisation de tâches mathématiques. Il semble que le cortex pariétal postérieur soit particulièrement important dans les habiletés mathématiques. Des activations ont été découvertes notamment dans les lobules supérieurs postérieurs pariétaux, dans le cortex pariétal inférieur ainsi que dans le SIP (Dehaene, Molko, Cohen et & Wilson, 2004; Pinel & Dehaene, 2013; Zhang, Chen & Zhou, 2012). Les chercheurs Dehaene, Piazza, Pinel & Cohen (2003) ont d'ailleurs proposé un modèle de trois circuits pariétaux qui serviraient au traitement numérique. Selon ces auteurs, le segment horizontal du SIP serait associé à la représentation des quantités. Le gyrus angulaire gauche jouerait un rôle dans le traitement verbal. Les lobes supérieurs postérieurs bilatéraux seraient associés aux processus attentionnels.

Habiletés mathématiques et MCTv

La relation entre les habiletés mathématiques et la MCT est bien connue. En effet, certains problèmes mathématiques dans des domaines tels que l'algèbre, la géométrie et l'arithmétique requièrent le maintien d'information ainsi que le traitement simultané d'informations nouvelles. La résolution de ce type de problème peut donc faire appel à la mémoire à court terme. Plusieurs chercheurs ont utilisé des mesures comportementales afin d'expliquer plus spécifiquement le lien entre compétences mathématiques et les compétences en MCT. Des études sur des enfants d'âge scolaire ont ainsi démontré que la MCT permet de prédire les résultats dans plusieurs domaines de compétences en lien avec les mathématiques, notamment dans l'écriture de chiffres, le jugement symbolique et l'arithmétique. Il a également été démontré que les enfants et les adolescents qui possèdent une grande capacité en mémoire à court terme tendent à obtenir de meilleurs résultats en mathématiques que leurs pairs ayant une moins grande capacité en MCT (Meyer, Salimpoor, Wu, Geary & Menon, 2010; Raghubar, Barnes & Hecht, 2010; Simmons, Willis & Adam, 2012).

La MCTv, plus spécifiquement, semble également avoir une grande importance dans plusieurs aspects liés aux habiletés mathématiques. Entre autres, elle semble être utile pour la visualisation mentale et la représentation de quantités de chiffres sur une droite numérique ainsi que dans la résolution de problèmes énoncés sous forme de texte (Andersson, 2010; Krajewski & Schneider (2009); Swanson & Sasche-Lee, 2001; Gunderson, Ramirez, Beilock & Levine, 2012). Le processus de développement de la MCTv pendant l'enfance semble également jouer un rôle prédominant dans la performance mathématique. Une étude longitudinale menée par Li & Geary (2013) a suivi des enfants de la première année jusqu'à la cinquième année du primaire. Ils ont découvert que les enfants qui ont montré les plus grandes augmentations en MCTv entre la première et la cinquième année avaient une meilleure performance en mathématiques que leurs pairs. Ces résultats suggèrent que les capacités en MCTv deviennent de plus en plus importantes dans la performance mathématique à travers les années scolaires. D'ailleurs, une étude sur des étudiants universitaires a démontré que les habiletés en MCTv étaient fortement corrélées à la performance en mathématiques avancées (Wei Wei, Yuan, Chen & Zhou, 2012).

Outre les résultats comportementaux, plusieurs études en neuroimagerie ont également tenté d'examiner la relation entre l'activation cérébrale sous-jacente à la MCTv et l'activité cérébrale liée au raisonnement mathématique. Ces études ont enregistré des participants à l'aide de l'IRMf pendant que ceux-ci accomplissaient des tâches de MCTv ainsi que des tâches mathématiques. Des activations similaires ont été découvertes dans le cortex pariétal pendant les deux types de tâches, surtout dans le SIP (Ashkenazi, Rosenberg-Lee, Metcalfe, Swigart & Menon, 2013; Zago et al., 2008). Plus spécifiquement, Dumontheil & Klingberg (2012) ont découvert que l'activité cérébrale enregistrée en fMRI pendant une tâche de mémoire à court terme visuelle chez des enfants et des adolescents âgés entre 6 et 16 ans permettait de prédire la performance mathématique deux ans plus tard. Ces résultats ont permis de prouver l'importance de la capacité en mémoire à court terme dans la prédiction des résultats en mathématiques.

Magnétoencéphalographie

La MEG est un outil qui permet d'enregistrer la dynamique des activités du cerveau en temps réel. Plus spécifiquement, la MEG enregistre et mesure les variations de champs magnétiques produits par les courants ioniques. Ceux-ci sont essentiellement engendrés par les potentiels post synaptiques des cellules pyramidales dans le cortex cérébral. Comme les dipôles électriques qui sont orientés parallèlement à la surface du crâne sont les seuls capables de donner naissance à un champ magnétique mesurable à l'extérieur du scalp, la MEG est particulièrement sensible à ce type de dipôle. Ces dipôles se retrouvent principalement dans les sillons et scissures corticales, qui constituent environ 2/3 de la surface corticale. Le signal enregistré en MEG est l'activité simultanée de millions de neurones. Les champs magnétiques neuronaux ont une intensité d'environ 10^{-11} Tesla et sont habituellement mesurés en femtoteslas (fT). Ils sont des milliards de fois moins puissants que le champ magnétique de la Terre. En fonction du rapport entre le signal et le bruit, il est souvent nécessaire de faire la moyenne de l'activité magnétique cérébrale sur plusieurs essais pour extraire un signal précis des enregistrements en MEG (Garnero, Baillet & Renault, 1998; Gavaret, Badier & Chauvel, 2008; Gosseries et al., 2007; Vrba & Robinson, 2001).

Afin de pouvoir détecter les champs magnétiques cérébraux, la MEG utilise des capteurs supraconducteurs de type SQUID (Superconductive Quantum Interference Device). Ces capteurs transforment le flux magnétique en tension électrique. Ils doivent être gardés dans de l'hélium liquide à une température de -269 °C. Les systèmes de MEG comptent typiquement entre 100 et 300 capteurs SQUIDs distribués dans un casque, lui-même étant intégré au réservoir d'hélium liquide. Comme les champs magnétiques cérébraux sont extrêmement faibles, il est nécessaire d'adopter des techniques d'atténuation du bruit. La technique la plus efficace est de placer la MEG dans une chambre blindée contre les champs électromagnétiques extérieurs. La présence d'une chambre blindée permet d'atténuer les champs magnétiques extérieurs d'un facteur de 10^3 (Garnero et al., 1998; Gosseries et al., 2007).

L'utilisation de la MEG comporte plusieurs avantages. Dans un premier temps, la MEG se caractérise par une excellente résolution temporelle, de l'ordre de la milliseconde. Lorsqu'elle est combinée avec l'imagerie par résonance magnétique (IRM), la MEG permet

aussi la localisation des sources électriques d'où proviennent les champs magnétiques. La MEG possède également un grand nombre de capteurs et n'est pas sensible aux variations de conductivité et à l'anisotropie, c'est-à-dire que son signal n'est pas altéré par les structures de la boîte crânienne et de la tête. Les principaux désavantages de la MEG sont la faible accessibilité due au coût très élevé qu'engendre son utilisation, sa sensibilité restreinte à l'activité neuronale des sillons ainsi que sa grande sensibilité aux mouvements de la tête (Garnero et al., 1998; Gavaret et al., 2008; Gosseries et al., 2007; Vrba & Robinson, 2001).

Design expérimental et tests préliminaires

Nous avons sélectionné plusieurs sous-tests provenant de batteries d'évaluation neuropsychologique différentes afin d'évaluer de nombreuses compétences, telles que la vitesse de traitement, la mémoire de travail spatiale et verbale, le raisonnement perceptif, la compréhension verbale, la flexibilité cognitive, la dextérité motrice et le raisonnement mathématique. À la suite de certains tests préliminaires, nous avons décidé de garder certains sous-tests, à savoir le Trail Making Test et le test de Fluence Verbale du Delis-Kaplan Executive Function System (Delis, Kaplan & Kramer, 2001), les sous-tests Similitudes, Vocabulaire, Matrices, Blocs, Codes, Symboles, Séquences de chiffres et Séquences lettres-chiffres de l'Échelle d'intelligence de Weschler pour adulte – 4^e édition (Weschler, 2008), les tests Math Problem Solving, Mathematical Operations et Math Fluency du Weschler Individual Achievement Test – 3^e édition (Weschler, 2009), le sous-test Spatial Addition de L'Échelle clinique de mémoire de Weschler (Weschler, 2009), le California Verbal Learning Test II (Delis, Kramer & Kaplan, 2000), la Klove-Matthew-Grooved-Pegboard (Kløve, 1963) ainsi qu'une tâche d'inhibition de type Stop Signal. L'évaluation neuropsychologique qui a été administrée aux participants dans le cadre des travaux de ce mémoire était d'une durée pouvant aller de 2 h 40 à 3 h 10.

Notre tâche de mémoire à court terme en MEG, quant à elle, était présentée sur un écran projecteur localisé à 75 cm devant le participant. Nous avons adapté notre protocole expérimental à partir de l'article de Robitaille et al. (2010). Chaque essai débutait par une croix de fixation au centre de l'écran qui était présente pendant 400 ms. Deux flèches pointant vers la gauche ou vers la droite apparaissaient ensuite pour 400 à 500 ms. Les flèches étaient

suivies de l'apparition de 1, 3 ou 5 cercles de couleur présentés de chaque côté de l'écran, ceux-ci apparaissant aléatoirement sur une grille de 3x3. Les cinq couleurs possibles étaient facilement distinguables les unes des autres (bleu, vert, orange, rose et marron). Nous avons pris soin d'ajuster la luminosité de chaque couleur de manière à ce que toutes les couleurs aient la même intensité lumineuse. Une couleur n'était jamais présentée deux fois dans un hémichamp au cours d'un même essai. Après l'apparition des disques de couleur, la croix de fixation était exposée seule pendant 1800 ms. Ensuite, l'écran test consistait en un disque de couleur affiché de chaque côté de l'écran, à la même position qu'un des disques présentés précédemment. Cet écran persistait pendant 1500 ms. Dans 50 % des essais, le cercle test était de la même couleur que celui présent à la même position précédemment. Autrement, le disque s'affichait dans l'une des quatre autres couleurs.

Le participant devait se rappeler si le cercle test était de la même couleur que celui présenté au même endroit précédemment. Le participant devait appuyer sur un bouton avec l'index d'une main pour indiquer que le cercle était identique et un autre bouton avec l'index de l'autre main pour indiquer qu'il était différent. La moitié des participants ont répondu à la condition « identique » avec l'index gauche et la condition « différent » avec l'index droit, tandis que la configuration pour l'autre moitié des participants était inversée. Nous avons procédé de cette façon afin de réduire l'impact de l'activité motrice latérale sur le signal cérébral. Une rétroaction était ensuite fournie au participant pour les informer de l'exactitude de leur réponse ou encore du fait qu'il n'avait pas répondu assez rapidement.

Nous avons effectué des tests préliminaires pour nous assurer du bon déroulement de la tâche. Notre tâche originale comprenait une condition supplémentaire dans laquelle nous voulions créer une interférence en MCTv. Le participant devait répondre à la tâche classique de MCTv présentée plus haut et devait de plus répondre à un jugement de symétrie. Nous avons remarqué que la performance dans cette condition chutait drastiquement. Nous avons donc décidé d'abandonner cette partie de la tâche. De plus, les premiers sujets devaient compléter des blocs d'entraînement de la tâche directement dans l'environnement de la MEG. Nous avons remarqué que cette mesure augmentait significativement le temps passé dans l'environnement contraignant de la MEG (fatigue, mouvements limités, etc.) et nous avons décidé de retirer ces blocs d'exercice.

La tâche finale de MCTv utilisée dans le cadre de ce projet de recherche consistait en 4 blocs de 120 essais chacun. Le même nombre d'essais était présenté pour chaque condition (1, 3 ou 5 cercles, présentés à gauche ou à droite, 80 essais par conditions). À la suite des constatations que nous avons faites lors de nos tests préliminaires, nous avons établi quatre blocs d'entraînement de 20 essais chacun que nos participants complétaient hors de l'environnement de la MEG. Ces essais d'entraînement permettaient à l'examineur de s'assurer que le sujet comprenait la tâche adéquatement et avait une performance supérieure au niveau du hasard. La capacité en mémoire à court terme a été évaluée à l'aide de la formule du k de Cowan (2001) présentée plus haut.

Hypothèses

La relation entre la MCTv et les habiletés mathématiques a été démontrée à maintes reprises dans des études utilisant des mesures comportementales ainsi que l'IRMf. L'objectif principal de ce projet de recherche est de vérifier le lien entre les habiletés mathématiques et l'activité cérébrale enregistrée aux capteurs pariéto-occipitaux lors d'une tâche de MCTv en MEG. Il a été confirmé que la capacité en MCTv et la performance en mathématiques sont étroitement liées et qu'elles font appel à des régions cérébrales similaires, notamment le SIP. Ainsi, nous émettons l'hypothèse selon laquelle l'amplitude de l'activité pariéto-occipitale enregistrée pendant la période de rétention de notre tâche de MCTv en MEG sera liée à la performance aux tests de mathématiques dans notre évaluation neuropsychologique.

Contributions à l'article

L'article décrit la recherche principale effectuée dans le cadre du cheminement de maîtrise en psychologie. La conception originale du projet de recherche revient à Sarah Lippé, ainsi que l'idée de combiner la MEG avec des mesures d'évaluation comportementale de type neuropsychologique. Pour le développement du protocole expérimental de MCTv en MEG, l'aide de Pierre Jolicoeur et de Pia Amping a été sollicitée. Philippe Robaey a collaboré au choix des sous-tests faisant partie de l'évaluation neuropsychologique ainsi qu'à la vérification du protocole expérimental. Le recrutement, la collecte de données, le prétraitement et le traitement des données MEG et comportementales ainsi que les analyses statistiques ont été effectués quasi entièrement par Aubrée Boulet-Craig. L'aide de Karine Lacourse a été sollicitée pour certaines manipulations avec les données MEG ainsi que la création de graphiques. Victor Oswald a apporté son aide pour l'accueil et l'accompagnement de certains participants pour la tâche de MCTv. Nathalie Bouloute et Manon Robert, techniciennes en électrophysiologie et employées du CERNEC, ont aidé à l'acquisition des données en MEG. La rédaction entière initiale du manuscrit a été effectuée par Aubrée Boulet-Craig et les corrections et commentaires de chaque coauteur ont été intégrés à la version finale de l'article, en vue d'une soumission au *Journal of Cognitive Neuroscience*.

Article

Parieto-Occipital Activity during Visual Short-Term Memory Task Processing Predicts Mathematical Abilities: a MEG Study

Prêt pour la soumission au *Journal of Cognitive Neuroscience*, août 2014

Aubrée Boulet-Craig^{1,2}, Karine Lacourse⁵, Maja Krajcinovic^{1,3}, Caroline Laverdière^{1,3}, Daniel
Sinnott^{1,3}, Philippe Robaey^{1,4,6,7}, Pierre Jolicoeur² & Sarah Lippé^{1,2}

¹ *CHU Sainte-Justine Research Center, Department of Psychology, University of Montreal,
Montreal, QC, Canada*

² *Department of Psychology, University of Montreal, Montreal, QC, Canada*

³ *Department of Pediatrics, University of Montreal, Montreal, QC, Canada*

⁴ *Department of Psychiatry, University of Montreal, Montreal, QC, Canada*

⁵ *École de technologie supérieure de Montréal, Montreal, QC, Canada*

⁶ *Children's Hospital of Eastern Ontario, Ottawa, ON, Canada*

⁷ *Department of Psychiatry, University of Ottawa, Ottawa, ON, Canada*

Abstract

Visual short-term memory (VSTM) is a memory system that permits the temporary retention of visual information and capacity of the memory system is reflected through posterior regions' brain activity during a VSTM task. It has been demonstrated that VSTM capacity and mathematical abilities are strongly related. Moreover, VSTM and mathematical reasoning activate similar brain regions within the parietal cortex, above all the intraparietal sulcus (IPS). However, the relation between posterior brain regions activity and mathematical skills has not yet been demonstrated. In this study, we collected behavioral and magnetoencephalography (MEG) data on 15 healthy participants. Our main objective was to verify the link between parieto-occipital brain activity during the retention period of a VSTM task and performance in mathematics. We found that parieto-occipital cerebral activity amplitude could predict performance in mathematics. These results confirmed the relation existing between VSTM functioning and mathematical reasoning skills.

Introduction

Visual short-term memory (VSTM) is a memory system that allows the temporary retention of visual information. It has been shown that VSTM's capacity, which can be defined by the amount of information that an individual can remember over a short period of time, is limited to about four items (Cowan, 2001; Olesen, Nagy, Westerberg & Klingberg, 2003; Todd & Marois, 2004).

It has been demonstrated that a relation exists between short-term memory and performance on mathematical reasoning tasks. Studies on children have shown that short-term memory can predict results in many mathematical skills like number writing, symbolic magnitude judgments and arithmetic (Meyer, Salimpoor, Wu, Geary & Menon, 2010; Raghobar, Barnes & Hecht, 2010; Simmons, Willis & Adam, 2012). It has also been demonstrated that children and adolescents with high short-term memory capacity tend to outperform their counterparts on mathematical abilities measures. Moreover, VSTM appears to have a high importance on many aspects of mathematical abilities like mental visualization and word problem solving (Andersson, 2010; Krajewski & Schneider (2009); Swanson & Sasche-Lee, 2001; Gunderson, Ramirez, Beilock & Levine, 2012). A longitudinal study from

Li & Geary (2013) has demonstrated that children who showed the largest gains in VSTM between grade 1 and grade 5 had better mathematics achievement than their peers.

Researchers have studied brain activation both in VSTM and mathematics. Neuroimaging studies on mathematics all found an activation of the parietal lobe during the realization of a so-called task. The main activations were found in the posterior superior parietal lobules (PSPL), the intraparietal sulcus (IPS) and the inferior parietal cortex (IPC) (Dehaene, Piazza, Pinel & Cohen, 2003; Dehaene, Molko, Cohen & Wilson, 2004; Pinel & Dehaene, 2013). Studies on VSTM in electroencephalography (EEG) have discovered a particular waveform named SPCN (for sustained posterior contralateral negativity) that reflects the process of maintaining information in VSTM. This event-related potential is found on parietal sensors (PO7/PO8). SPCN's amplitude increases with the amount of information maintained in short-term memory and reaches a maximum at the subject's maximal VSTM capacity (calculated with Cowan's k formula; Cowan, 2001). A magnetic counterpart of the SPCN component has also been discovered using magnetoencephalography (MEG). This MEG component is referred as SPCM, for sustained posterior contralateral magnetic field, and is found on parieto-occipital sensors. Both SPCN and SPCM show higher amplitude for contralateral trials than for ipsilateral trials and are modulated by memory load and VSTM capacity (k). (Jolicoeur, Brisson & Robitaille, 2008; Perron et al., 2009; Robitaille, Grimault & Jolicoeur, 2009; Robitaille et al., 2010). As for studies on mathematics, neuroimaging studies on VSTM have found parietal activation in individuals performing a short-term memory task. Activation have been discovered mainly in IPS (Klingberg, Forssberg & Westerberg, 2002; Olesen, Westerberg & Klingberg, 2004; Palva, Kulashekhar, Hämäläinen & Palva, 2011; Robitaille et al., 2010; Todd & Marois, 2004). Some neuroimaging studies have also made the relation between brain activation underlying VSTM and brain activation linked to mathematical reasoning. These studies had individuals undergo short-term memory tasks and mathematical tasks while they were recorded in functional magnetic resonance imaging (fMRI). They found similar parietal activation in both conditions, mainly in IPS (Ashkenazi, Rosenberg-Lee, Metcalfe, Swigart & Menon, 2013; Dumontheil & Klingberg, 2012; Zago et al., 2008).

The relation between VSTM and mathematical abilities has therefore been demonstrated many times. It has been confirmed that short-term memory abilities are a significant predictor of arithmetic outcomes and that mathematics and VSTM activate the same brain regions. Knowing that SPCM is a valid index of retention of information in VSTM, it could be argued that a link should exist between this particular waveform and mathematical skills. Therefore, the main objective of this study is to verify the link between SPCM's amplitude and mathematical abilities. The specific hypothesis to be verified is that cerebral activity recorded during a visual short-term memory task in MEG should be linked to performance on a mathematical reasoning task.

Material and Methods

Participants

17 adult participants with normal vision or corrected-to-normal vision, normal color vision and no reported history of neurological or psychiatric disorders participated in the experiment. Two participants were excluded because of failure to complete the entire task during the MEG recording or because of exceeding head movements during the task. The remaining 15 participants (7 males, 8 females) were aged between 21 and 34 (averaging at 28 years old). The project was reviewed and approved by the Comité d'éthique de la recherche de la Faculté des arts et des sciences of the University of Montreal and by the Comité d'éthique de la recherche of CHU Sainte-Justine. Informed consent was obtained prior to the experiment and financial compensation was given upon completion.

Procedure

Neuropsychological Assessment. A neuropsychological evaluation of about 2:30 to 3:00 hours was administered to the participants. Working memory, processing speed, verbal comprehension, perceptive reasoning, cognitive flexibility, motor dexterity and mathematical skills were assessed. The battery of neuropsychological tests consisted in the Trail Making Test and Verbal Fluency subtests from the Delis-Kaplan Executive Function System (Delis, Kaplan & Kramer, 2001) Similarities, Vocabulary, Matrix Reasoning, Block Design, Coding, Symbol Search and Letter-Number Sequencing subtests from the Weschler Adult Intelligence

Scale – 4th edition (Weschler, 2008), Math Problem Solving, Mathematical Operations and Math Fluency subtests from the Weschler Individual Achievement Test – 3rd edition (Weschler, 2009), Spatial Addition from the Weschler Memory Scale – 4th edition (Weschler, 2009) California Verbal Learning Test II (Delis, Kramer & Kaplan, 2000), Klove-Matthew-Grooved-Pegboard (Kløve, 1963) and a Stop Signal task. Since the participants were all francophones, the French Canadian versions of the tests were used.

MEG Procedure: Visual Short-Term Memory Task. During the MEG recording, the participants had to complete a VSTM task. Stimuli were presented on a back-projection translucent screen located 75cm in front of the participant. The experimental design was adapted from Robitaille et al. (2010). The trial started by a fixation cross centered within the display that was presented for 400 to 500ms (see Fig 1). Two arrowheads pointing left or right, indicating to the participant which hemifield to pay attention to, then appeared above and below the fixation cross for 800ms. After, 1, 3 or 5 colored circle appeared on each side of the screen for 200ms. The color disks were presented in randomly selected positions within a 3x3 grid. The 5 possible colors were easily discriminable (blue, green, orange, pink and brown). The luminosity of each color was adjusted in order for them to get the same luminosity value. Never was the same color presented twice on the same side of the screen during one trial. After the appearance of the colored disks, the fixation cross was presented alone during the retention period which had a duration of 1800ms. The test display consisted of a color circle presented on each side of the screen at the same location than one of the previously presented disks. This display was present for 1500ms. The test circle had the same color as the one previously presented at this location in 50% of the trials. Otherwise, the disk was one of the 4 remaining colors.

The participant's task was to decide if the test circle was the same color than the one previously presented at the same location. The subjects had to press a button with their left or right index to indicate that the colored disk was identical and another button with the other hand if it was different. 50% of the participants were randomly assigned in a condition in which they had to answer "identical" with the left index and "different" with the right index and 50% were assigned in the contrary condition. This action was taken in order to reduce impacts of lateral motor brain activity. Feedback on their performance, indicating if the

answer was correct, incorrect or if it took too much time to answer, was provided to the participants after each trial.

The VSTM task consisted in 4 blocks of 120 trials. The same number of trials was presented for each of the 6 conditions (memory loads of 1, 3 or 5 presented left or right, 80 trials per condition). The subjects performed 3 blocks of practice of 20 trials each outside the magnetically shielded room prior to the experiment. The practice blocks allowed the experimenter to make sure the subjects understood the task properly and performed above the chance level.

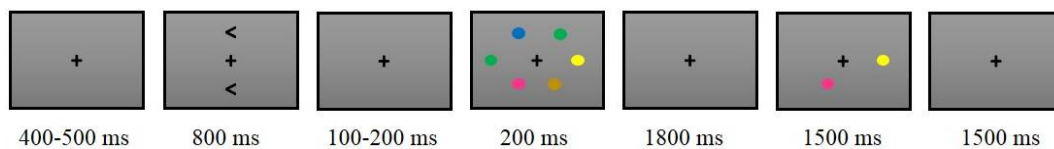


Figure 1. Stimulation protocol. Each trial had a duration of 6400ms. Feedback was provided for 500ms during the last portion of the trial. Then, there was a blink duration of 1000ms. A load 3, encode-left trial, requiring the answer “same” is illustrated.

The amount of information maintained in VSTM during the tasks was assessed using the Cowan’s K formula: (proportion of hits-proportion of false alarms)* number of items presented (Cowan, 2001).

MEG Recordings

The recordings were performed using a CTF-VSM whole head 275-sensor MEG system in a magnetically shielded room. The sampling rate was 1200Hz. Along with the 275 MEG sensors, 29 reference channels were recorded in order to compute a third-order gradiometer noise reduction. Bipolar EOG (Vertical EOG and Horizontal EOG) was recorded in order to monitor eye blinks and eye movements. ECG was also recorded to monitor heartbeats.

MEG Analysis

Data analysis was performed using Brainstorm software (Tadel et al. 2011), which is documented and freely available for download online under the GNU general public license (<http://neuroimage.usc.edu/brainstorm>). Data was first filtered at 60Hz, 120Hz and 180Hz. An ICA was applied in order to correct eye blinks, eye movements, cardiac and respiratory

artifacts. Data was then segmented in trials, baseline corrected based on the mean activity before the encoding period (-200 to 0 ms) and grouped by condition. Trials with bad signal remaining despite the ICA corrections were removed from the analysis. Data was then filtered at 40Hz and was afterwards averaged by condition producing event-related fields (ERFs). The sensors of interest were chosen based on Robitaille et al. (2010). Our region of interest consisted in 14 left parieto-occipital and 12 right parieto-occipital captors. An average of the signal was performed over the first part of the retention period (400ms-900ms), during which brain activation and SPCM's amplitude is maximum, in order to extract a mean cerebral activation waveform from the left and right clusters of captors (see Fig 2). Amplitude of the SPCM was calculated during the retention period averaging the activity from interest sensors (left-cluster/right-cluster) and then subtracting the activity from contralateral and ipsilateral trials. The subtraction was made in order to isolate the cerebral activity related to brain activity processing attended hemifield. This operation allowed us to remove the cerebral activity linked to vision and perception.

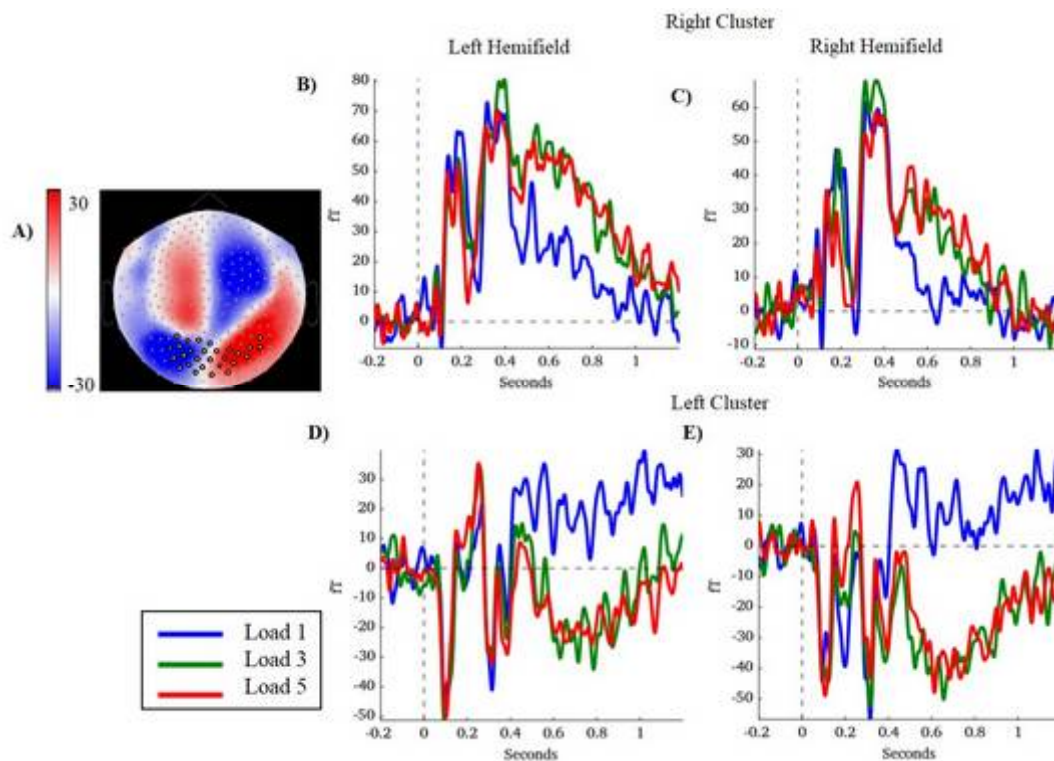


Figure 2. The posterior cluster of MEG sensors (A) was divided in a right (B-C) and a left (D-E) cluster. Midline sensors were not included in the analysis. An average of the signal across ROI sensors was performed in order to extract a mean cerebral activation waveform.

Statistical Analysis

Statistical analysis were performed using SPSS statistics software (Version 22.0). A T-test for paired samples was done in order to investigate the differences in amplitudes of the SPCM at each memory load. Linear regressions were also performed in order to clarify the links between cerebral activity recorded during a visual short-term memory task and results from the neuropsychological evaluation.

Results

Behavior

Neuropsychological Assessment. All the subtest from the neuropsychological evaluation were compiled and transformed to normative scores using Canadian norms. The participant's results are following a normal distribution. No major cognitive deficits have been found in any of the participants. All the subject's IQs are in mean range. Table 1 presents the mean results obtained on all of the subtests of the neuropsychological evaluation.

Table 1. Mean results on neuropsychological evaluation subtests in our sample. The results are presented in percentiles. SEM in parenthesis.

<i>Subtest</i>	<i>Mean Result</i>
Similarities (WAIS-IV)	70.46 (24.54)
Vocabulary (WAIS-IV)	73.40 (13.51)
Matrix Reasoning (WAIS-IV)	62.33 (24.29)
Block Design (WAIS-IV)	64.00 (24.10)
Digit Span (WAIS-IV)	39.87 (20.98)
Letter-Number Sequencing (WAIS-IV)	40.87 (18.22)
Coding (WAIS-IV)	53.27 (31.99)
Symbol Search (WAIS-IV)	71.80 (18.97)
Verbal Comprehension Index (WAIS-IV)	74.40 (19.16)
Perceptual Reasoning Index (WAIS-IV)	67.20 (22.54)
Working Memory Index (WAIS-IV), Processing Speed Index (WAIS-IV)	37.47 (17.74) 62.46 (27.37)

Full IQ (WAIS-IV)	62.67 (21.69)
Trail Making Test – Visual Scanning (D-KEFS)	71.54 (22.84)
Trail Making Test – Number Sequencing (D-KEFS)	55.36 (27.24)
Trail Making Test – Letter Sequencing (D-KEFS)	70.53 (18.11)
Trail Making Test – Number-Letter Sequencing (D-KEFS)	65.40 (15.45)
Verbal Fluency – Letter Fluency (D-KEFS)	46.04 (28.35)
Verbal Fluency – Category Fluency (D-KEFS)	60.71 (26.07)
Verbal Fluency – Category Switching (D-KEFS)	59.79 (27.89)
California Verbal Learning Test II (CVLT-II)– List A – Trials 1 to 5	75.80 (24.71)
CVLT-II Short-Delay Free Recall	69.80 (28.55)
CVLT-II Short-Delay Cued Recall	64.40 (34.94)
CVLT-II Long-Delay Free Recall	67.46 (31.13)
CVLT-II Long-Delay Cued Recall	63.08 (32.98)
Grooved Pegboard – Dominant Hand	42.20 (20.69)
Grooved Pegboard — Non-Dominant Hand	46.07 (17.91)
Spatial Addition (WMS-IV)	80.67 (14.43)
Math Problem Solving (WIAT-III)	64.07 (21.76)
Numerical Operations (WIAT-III)	43.14 (26.22)
Math Fluency – Addition (WIAT-III)	52.07 (22.28)
Math Fluency – Subtraction (WIAT-III)	32.93 (19.13)
Math Fluency – Multiplication (WIAT-III)	38.643 (23.58)
Math Fluency Index (WIAT-III)	40.86 (25.56)
Mathematics Index (WIAT-III)	53.22 (24.49)

Cowan’s *K*. Short-term memory capacity was assessed using Cowan’s *k* formula. The participant’s *k* results are following a normal distribution. VSTM capacity was calculated based on the trials that were kept for the MEG data analysis only. The trials rejected because of bad signal were not taken into account for the calculation of *k*. Table 2 presents the mean

results of k by memory load. No significant correlation between short-term memory capacity and amplitudes of SPCM calculated from the left and right clusters was found.

Table 2. Mean Results of k by load. SEM in parenthesis.

<i>Memory load</i>	<i>k</i>
Load 1	0.84 (0.19)
Load 3	1.33 (0.67)
Load 5	1.04 (0.79)

ERF – Event-related fields

A paired samples t-test revealed a significant modulation of SPCM’s amplitude by memory load (see Fig 3). Indeed, SPCM’s amplitude calculated at load 1 (M=77.91, SD=24.90) was significantly smaller than the amplitude calculated at load 3 (M=87.79, SD=25.85), $t(14)=2.66$, $p=0.019$. Moreover, the amplitude at load 3 differed significantly from the amplitude at load 5 (M=82.39, SD=23.39), $t(14)=2.21$, $p=0.044$. However, there was no significant difference between amplitude at load 1 and load 5, $t(14)=-0.89$, $p=0.386$.

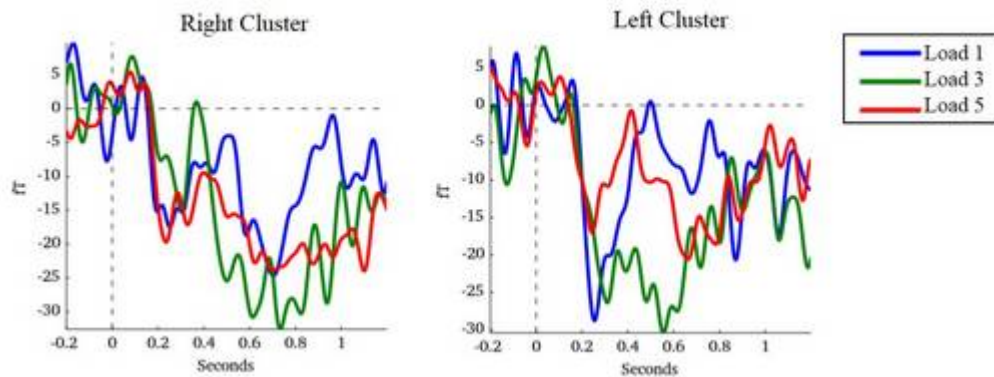


Figure 3. Amplitude of SPCM calculated at left and right clusters. Data was filtered for visualisation only.

Analysis of ERFs and Neuropsychological Measures

Linear regression analysis on neuropsychological measures revealed that amplitude of global cerebral activity at VSTM load 3 calculated on the same as above parieto-occipital

captors of interest could predict the performance on the Math Problem Solving task from WIAT-III, $F(1,12)=8.71$, $p=0.012$, as well as the results on the Mathematics Index from WIAT-III, $F(1,12)=6.24$, $p=0.028$. We found that individuals with higher global parieto-occipital amplitude at load 3 during the retention period of the VSTM task obtained better results on the mathematical reasoning tasks from the neuropsychological evaluation. The parieto-occipital ROI was the only predictor of mathematics performance. Amplitude calculated on frontal, $F(1,12)=1.61$, $p=0.228$, central, $F(1,12)=0.2$, $p=0.663$, and temporal sensors $F(1,12)=0.66$, $p=0.433$, at load 3 did not significantly predict results in mathematics. Chosen frontal sensors were MLF21, MLF22, MLF23, MLF24, MLF31, MLF32, MLF33, MLF41, MLF42, MLF43, MLF44, MLF51, MLF52, MRF11, MRF21, MRF22, MRF23, MRF31, MRF32, MRF33, MRF41, MRF42, MRF43 and MRF51. Central sensors were MLC13, MLC14, MLC15, MLC21, MLC22, MLC23, MLC24, MLC31, MLC41, MLC51, MLC52, MLC53, MLC61, MLC62, MRC15, MRC21, MRC22, MRC23, MRC41, MRC51, MRC52, MRC53, MRC61 and MRC62. Temporal sensors were MLT13, MLT14, MLT23, MLT24, MLT25, MLT26, MLT33, MLT34, MLT35, MLT36, MLT37, MLT45, MLT46, MLT55, MRT13, MRT14, MRT15, MRT23, MRT24, MRT25, MRT26, MRT35, MRT36 and MRT45.

We also found that amplitude of cerebral activity at load 1 predicted results on the Matrix Reasoning subtest from WAIS-IV, $F(1,13)=7.83$, $p=0.015$. Furthermore, amplitude of global parieto-occipital activity at load 3 predicted results on the Perceptual Reasoning Index, also from WAIS-IV, $F(1,13)=6.67$, $p=0.023$. According to our results, the participants who had higher amplitudes of global cerebral activity on our parieto-occipital sensors of interest obtained better results on perceptual reasoning.

Amplitude of global cerebral activity at load 3 also predicted results on the CVLT-II, $F(1,13)=10.28$, $p=0.007$. CVLT-II is a learning and verbal memory exercise in which participants have 5 trials to recall the more words they can from a list of 16 common words. What we found is that participants who had greater parieto-occipital activity amplitude during the VSTM task at load 3 recalled greater amount of words than their counterparts.

Furthermore, we obtained significant results on the linear regression performed between amplitude of SPCM at load 1, calculated through averaging brain activity from ROI sensors and subtracting contralateral to ipsilateral activity, and the Symbol Search task from WAIS-IV which assesses processing speed, $F(1,13)=5.47$, $p=0.036$. Participants whose SPCM's amplitude at load 1 was smaller tended to obtain better results on the processing speed task.

Significant results were also found between Trail Making Test – Visual Scanning condition from D-KEFS and SPCM's amplitude at load 3, $F(1,12)=7.25$, $p=0.020$. Moreover, we found a correlation between SPCM's amplitude and Trail Making Test — Letter-Sequencing condition at load 1, $F(1,12)=7.81$, $p=0.016$, and load 3, $F(1,12)=9.64$, $p=0.009$. Those Trail Making Test conditions assess visual scanning and visual attention.

Discussion

This study combined MEG and behavioral measures in order to confirm the relation between mathematical abilities and visual short-term memory. We found a significant modulation of SPCM's amplitude by memory load. We found that individuals with higher cerebral activity at load 3 performed better on mathematical reasoning and perceptual reasoning tasks. We also found that individuals with smaller SPCM's amplitude, mainly at load 1 tend to have more effective processing speed.

SPCM's Amplitude and Memory Load

We demonstrated that SPCM's amplitude was modulated by the amount of information participants had to maintain in memory. Our results are similar to previous findings indicating that SPCM's amplitude calculated at a parieto-occipital cluster of sensors is modulated by memory load (Jolicoeur et al., 2008; Perron et al., 2009; Robitaille et al., 2009; Robitaille et al., 2010). More specifically, our findings reveal that amplitude of the SPCM component increased significantly from load 1 to load 3, indicating the modulation of amplitude by load. However, it seems that our participants plateaued at memory load 3. Indeed, according to the results from the behavioral k 's, we can see that our participants were able to complete the task with good results at load 1 and load 3, but that their performance dropped significantly at load 5. This may explain why we found a significant decrease of SPCM's amplitude at load 5. The

low results of k may also explain why we did not find any modulation of SPCM's amplitude in function of k .

Global Parieto-Occipital Activity and Mathematical Abilities

Importantly, we found that amplitude of global cerebral activity measured at parieto-occipital sensors during a VSTM task could predict results on a mathematics task. The participants from our sample who had higher global cerebral activity amplitude at load 3 obtained higher scores on the mathematical reasoning task from the neuropsychological assessment. Absence of relation with clusters of sensors in other brain regions confirmed that parieto-occipital cerebral activity amplitude was the best predictor of mathematical abilities. Other brain regions amplitude did not predict mathematical performance. Our results are consistent with the existing literature on the subject. Studies using behavioral measures have already linked VSTM performance to mathematical abilities (Meyer et al., 2010; Raghubar et al. 2010; Simmons et al., 2012). In this study with MEG recordings, we succeeded in showing that VSTM functioning measured by the amplitude of cerebral activity can predict performance on a mathematical reasoning task. Therefore, the relation between VSTM and mathematical abilities is confirmed. We argue that this relation exists because of the similar brain region activation underlying mathematical reasoning and VSTM. As it has been demonstrated by multiple researchers, both mathematical skills and VSTM functioning implies parietal cortex activation. (Ashkenazi et al., 2013; Dehaene et al., 2003; Dehaene et al., 2004; Dumontheil & Klingberg, 2012; Jolicoeur et al., 2008; Perron et al, 2009; Pinel & Dehaene, 2013; Robitaille et al., 2010; Todd & Marois, 2004; Zago et al., 2008). In addition, the relation we found between perceptual reasoning and cerebral activity during the VSTM task heads in the same way. It has been demonstrated that perceptual reasoning, or non-verbal intelligence, plays an important role in a great amount mathematical related skills, like knowledge of quantitative concepts, arithmetic ability, geometry and word problems (Floyd, Evans & McGrew, 2003; Kyttälä & Lehto, 2008; Pina, Fuentes, Castillo & Diamantopoulou, 2014). Knowing that mathematics and non-verbal intelligence are closely related, the similar results obtained between parieto-occipital activity and those two measures are easily understandable.

Contribution of short-term memory to mathematical abilities is undeniable. Without short-term memory we would not be able to perform well on mathematical tasks that require to keep in mind some information while processing other material. VSTM plays a particularly important role. It has been argued that VSTM functioning acts as a mental blackboard, allowing us to mentally visualize number representations (Alloway, 2006; Barouillet & L epine, 2005).

Besides these expected results, we also found a relation between CVLT-II and cerebral activity at load 3. In fact, CVLT-II being a verbal learning task, we were not expecting to obtain significant correlations with our VSTM measures. However, we know that CVLT-II also assesses verbal short-term memory. Some existing literature supports the involvement of parietal regions in verbal short-term memory (Berryhill & Olson, 2008; Clark et al., 2000; Honey, Bullmore & Sharma, 2000; Jonides et al., 1998). Knowing that both VSTM and verbal short-term memory implies the activation of parietal regions could explain why we found that amplitude of cerebral activity on our parieto-occipital clusters predicted verbal learning and verbal working memory results.

SPCM's Amplitude, Visual Attention and Processing Speed

Another interesting finding is the correlation between SPCM's amplitude and results on the Symbol Search task from WAIS-IV as well as on the Letter-Sequencing condition from Trail Making Test. Participants with higher amplitude at load 1 tended to obtain poorer results on the processing speed task. Moreover, participants with higher SPCM's amplitude at load 1 and 3 obtained poorer results on the visual attention task. These results may look puzzling at first. However, researchers have found a similar negative correlation between processing speed and the N1 electrophysiological component, which appears right before SPCN and reflects visual attention processes. They discovered that a reduced amplitude of N1 was associated with faster visual processing speed (Weigand et al., 2014; Weigang et al., 2014). They explained their results based on cognitive efficiency theories, stating that if cognitive operations can be performed easily, the amount of cerebral resources needed may be minimized and performance may be maximized (Deary, Penke & Johnson, 2010; Rympa, Berger & D'Esposito, 2002). The correlation between the electrophysiological component N1

and processing speed may explain why we only obtained significant results between SPCM's amplitude and our processing speed and visual attention tasks. First, it could be argued that since load 1 does not require a lot of short-term memory resources, the task requested at that particular load could be on of visual attention instead of a short-term memory. This would explain why we didn't get the same negative relation between our processing speed task and SPCM's amplitude at higher memory loads. However, we did get significant results between SPCM's amplitude at higher loads and our visual attention task. According to these results, another possible explanation, following the cognitive efficiency theory presented earlier, would be that individuals with high processing speed and high visual attention performance need to engage less brain resources than their least efficient counterparts in order to perform well on the VSTM task at load 1 and load 3. In this manner, SPCM's amplitude at small memory loads could be modulated by processing speed and visual attention performance. On the contrary, all of our participants, regardless of their processing speed performance, needed to engage a great amount of cerebral resources in order to perform on the highest memory loads. As we demonstrated earlier, we observed a significant decrease in the performance of our participants at load 5, indicating that the task was demanding. The level of difficulty at load 5 may explain why processing speed and visual attention could no longer modulate SPCM's amplitude at that load.

Conclusion

In the present study, we used MEG and behavioral measures to study the relation between VSTM and mathematical abilities. First, we found a significant modulation of SPCM's amplitude in function of memory load. We also found that cerebral activity at load 3 was a good predictor of mathematical and perceptual reasoning performance. We then found a negative correlation between SPCM's amplitude and processing speed as well as visual attention performance. This study confirmed the relation between VSTM and mathematics, bringing new knowledge about the link between electromagnetic brain activity during a VSTM task and mathematical abilities.

Acknowledgments

This research was supported by a Canadian Institutes of Health Research (CIHR) grant to the PETALE project research team at Sainte-Justine UHC and by a Sainte-Justine UHC Foundation and Foundation of Stars Scholarship to Aubrée Boulet-Craig. We thank Nathalie Bouloute, Manon Robert and Victor Oswald for their help in acquisition of MEG data.

References

- Alloway, T. (2006). How does working memory work in the classroom? *Educational Research and Reviews, 1*(4), 134-139.
- Andersson, U. (2010). Skills development in different components of arithmetic and basic cognitive functions: findings from a 3-years longitudinal study of children with different types of learning difficulties *Journal of Educational Psychology, 102*, 115-134.
- Ashkenazi, S., Rosenberg-Lee, M., Metcalfe, A., Swigart, A., & Menon, V. (2013). Visuo-spatial working memory is an important source of domain-general vulnerability in the development of arithmetic cognition. *Neuropsychologia, 51*, 2305-2317.
- Barouillet, P., & Lépine, R. (2005). Working memory and children's use of retrieval to solve addition problems. *Journal of Experimental Child Psychology, 91*, 183-204.
- Berryhill, M., & Olson, I. (2008). Is the posterior parietal lobe involved in working memory retrieval? Evidence from patients with bilateral parietal lobe damage. *Neuropsychologia, 46*, 1775-1786.
- Clark, C., Egan, G., McFarlane, A., Morris, P., Weber, D., Sonkilla, C., Tochon-Danguy, H. (2000). Updating Working Memory for Words: A PET Activation Study. *Human Brain Mapping, 9*, 42-54.
- Deary, I., Penke, L., & Johnson, W. (2010). The neuroscience of human intelligence difference. *Nature Neuroscience, 11*, 201-211.
- Dehaene, S., Molko, N., Cohen, L., & Wilson, A. (2004). Arithmetic and the brain. *Current Opinion in Neurobiology, 14*, 218-224.
- Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., & Cohen, L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology, 20*, 487-506.

- Delis, D.C., Kramer, J.H., Kaplan, E., & Ober, B.A. (2000). California Verbal Learning Test: Second Edition. San Antonio, TX: Psychological Corporation.
- Delis, D. C., Kaplan, E., & Kramer, J. H. (2001). Delis-Kaplan Executive Function System (D-KEFS). San Antonio, TX: The Psychological Corporation.
- Dumontheil, I., & Klingberg, T. (2012). Brain Activity during a Visuospatial Working Memory Task Predicts Arithmetical Performance 2 Years Later. *Cerebral Cortex*, 22, 1078-1085.
- Floyd, R., Evans, J., & McGrew, K. (2003). Relations Between Measures of Cattell-Horn-Carroll (CHC) Cognitive Abilities and Mathematics Achievement Across The School-Age Years. *Psychology in the Schools*, 40(2), 155-171.
- Gunderson, E., Ramirez, G., Beilock, S., & Levine, S. (2012). The relation between spatial skill and early number knowledge: The role of the linear number line. *Developmental Psychology*, 48, 1229-1241.
- Honey, G., Bullmore, E., & Sharma, T. (2000). Prolonged Reaction Time to a Verbal Working Memory Task Predicts Increased Power of Posterior Parietal Cortical Activation. *NeuroImage*, 12, 495-503.
- Jolicoeur, P., Brisson, B., & Robitaille, N. (2008). Dissociation of the N2pc and sustained posterior contralateral negativity in a choice response task. *Brain Research*, 1215, 160-172.
- Jonides, J., Schumacher, E., Smith, E., Koeppe, R., Awh, E., Reuter-Lorenz, P., Willis, C. (1998). The Role of Parietal Cortex in Verbal Working Memory. *The Journal of Neuroscience*, 18(13), 5026-5034.
- Klingberg, T., Forssberg, H., & Westerberg, H. (2002). Increased Brain Activity in Frontal and Parietal Cortex Underlies the Development of Visuospatial Working Memory Capacity during Childhood. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14(1), 1-10.
- Kløve, H. (1963) Clinical neuropsychology. In: Forster FM, editor. Medical Clinics of North America. New York: Saunders.
- Krajewski, K., & Schueider, W. (2009). Exploring the impact of phonological awareness, visual-spatial working memory, and preschool findings from a 3-year longitudinal study. *Journal of Experimental Child Psychology*, 103, 516-531.

- Kyttälä, M., & Lehto, J. (2008). Some Factors Underlying Mathematical Performance : The Role of Visuospatial Working Memory and Non-Verbal Intelligence. *European Journal of Psychology of Education, 23*(1), 77-94.
- Li, Y., & Geary, D. (2013). Developmental Gains in Visuospatial Memory Predicts Gains in Mathematics Achievement. *PloS One, 8*(7), 1-9.
- Meyer, M., Salimpoor, V., Wu, S., Geary, D., & Menon, V. (2010). Differential contribution of specific working memory components to mathematics achievement in 2nd and 3rd graders. *Learning and Individual Differences, 20*, 101-109.
- Olesen, P., Nagy, Z., Westerberg, H., & Klingberg, T. (2003). Combined analysis of DTI and fMRI reveals a joint maturation of white and grey matter in a fronto-parietal network. *Cognitive Brain Research, 18*, 48-57.
- Olesen, P., Westerberg, H., & Klingberg, T. (2003). Increased prefrontal and parietal activity after training working memory. *Nature Neuroscience, 7*(1), 75-79.
- Palva, S., Kulashekhar, S., Hämäläinen, M., & Palva, M. (2011). Localization of Cortical Phase and Amplitude Dynamics During Visual Working Memory Encoding and Retention. *The Journal of Neuroscience, 31*(13), 5013-5025.
- Perron, R., Lefebvre, C., Robitaille, N., Brisson, B., Gosselin, F., Arguin, M., & Jolicoeur, P. (2009). Attentional and anatomical considerations for the representation of simple stimuli in visual short-term memory: evidence from human electrophysiology. *Psychological Research, 73*, 222-232.
- Pina, V., Fuentes, L., Castillo, A., & Diamantopoulou, S. (2014). Disentangling the effects of working memory, language, parental education, and non-verbal intelligence on children mathematical abilities. *frontiers in psychology, 5*(415), 1-12.
- Pinel, P., & Dehaene, S. (2013). Genetic and environmental contributions to brain activation during calculation. *NeuroImage, 81*, 306-3016.
- Raghubar, K., Barnes, M., & Hecht, S. (2010). Working memory and mathematics: A review of developmental, individual difference, and cognitive approaches. *Learning and Individual Differences, 20*, 110-122.
- Robitaille, N., Grimault, S., & Jolicoeur, P. (2009). Bilateral parietal and contralateral responses during maintenance of unilaterally encoded objects in visual short-term memory : evidence from magnetoencephalography. *Psychophysiology, 46*, 1090-1099.

- Robitaille, N., Marois, R., Todd, J., Grimault, S., Cheyne, D., & Jolicoeur, P. (2010). Distinguishing between lateralized and non lateralized brain activity associated with visual short-term memory : fMRI, MEG, and EEG evidence from the same observers. *NeuroImage*, *53*, 1334-1345.
- Rypma, B., Berger, J., & D'Esposito, M. (2012). The influence of working-memory demand and subject performance of prefrontal cortical activity. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *14*, 721-731.
- Simmons, F., Willis, C., & Adams, A. (2012). Different components of working memory have different relationships with different mathematical skills. *Journal of Experimental Child Psychology*, *111*, 139-155.
- Swanson, H., & Sachse-Lee, C. (2001). Mathematical problem solving and working memory in children with learning disabilities: Both executive and phonological processes are important. *Journal of Experimental Child Psychology*, *79*, 294-321.
- Todd, J., & Marois, R. (2004). Capacity limit of visual short-term memory in human posterior parietal cortex. *Nature*, *428*, 751-754.
- Wiegand, I., Töllner, T., Dyrholm, M., Müller, H., Bundesen, C., & Finke, K. (2014). Neural correlates of age-related decline and compensation in visual attention capacity. *Neurology of Aging*, *35*, 2161-2173.
- Wiegand, I., Töllner, T., Habekost, T., Dyrholm, M., Müller, H., & Finke, K. (2014). Distinct Neural Markers of TVA-Based Visual Processing Speed and Short-Term Storage Capacity Parameters. *Cerebral Cortex*, *24*, 1967-1978.
- Wechsler, D. (2008) Wechsler Adult Intelligence Scale–Fourth Edition. San Antonio, TX : Pearson.
- Wechsler, D. (2009). Wechsler Individual Achievement Test 3rd Edition (WIAT II). San Antonio, TX : Pearson
- Wechsler, D. (2009) Wechsler Memory Scale–Fourth Edition. San Antonio, TX : Pearson
- Zago, L., Petit, L., Turbelin, M., Andersson, F., Vigneau, M., & Tzourio-Mazoyer, N. (2008). How verbal and spatial manipulation networks contribute to calculation: an fMRI study. *Neuropsychologia*, *46*, 2403-2414.
- Zhang, H., Chen, C., & Zhou, X. (2012). Neural correlates of number and mathematical terms. *NeuroImage*, *60*, 230-240.

Discussion générale

L'objectif principal des travaux de ce mémoire était de confirmer le lien entre les habiletés mathématiques et l'activité cérébrale pariéto-occipitale enregistrée en MEG pendant une tâche de mémoire à court terme. Pour ce faire, nous avons créé un paradigme expérimental de MCTv que 15 participants adultes en santé ont complété dans l'environnement de la MEG. Les mêmes participants ont également été soumis à une évaluation neuropsychologique complète. Le principal résultat de notre expérimentation montre qu'il est possible de prédire la performance en mathématique en fonction de l'amplitude de l'activité cérébrale mesurée sur les capteurs de la région d'intérêt pariéto-occipitale à la charge mémorielle de 3. Effectivement, les individus qui avaient une amplitude plus élevée à la charge de 3 ont eu tendance à obtenir de meilleurs résultats dans l'exercice de raisonnement mathématique. Ce résultat permet de mieux comprendre le lien existant entre la MCTv et la performance en mathématiques. L'ensemble des résultats de l'expérimentation ainsi que les limites de l'étude seront discutés dans les sections suivantes.

Champs magnétiques reliés aux évènements : SPCM

Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes intéressés à la composante électromagnétique SPCM car elle reflète le maintien de l'information en mémoire à court terme visuelle. Les études précédentes sur le sujet ont montré que la SPCM est habituellement modulée en fonction de la charge cognitive à maintenir en MCT. En effet, l'amplitude de la SPCM augmente en fonction du nombre d'items à garder en mémoire et parvient à un maximum lorsque la plus grande capacité d'un individu en MCTv est atteinte (Jolicoeur et al., 2008; Perron et al. 2009; Robitaille et al., 2009; Robitaille et al., 2010).

Conformément à nos attentes, l'amplitude de la SPCM moyenne dans notre échantillon varie en fonction de la charge cognitive. En effet, il a été démontré dans l'article que l'amplitude de la SPCM a augmenté significativement entre la charge d'un et la charge de trois items. Toutefois, l'amplitude de la SPCM n'a pas augmenté entre les charges de trois et de cinq items, elle a plutôt diminué. Nous croyons que cette observation peut être expliquée en se basant sur les résultats comportementaux calculés à partir de la performance dans la tâche

de MCTv. Selon les k obtenus dans notre échantillon, nous pouvons constater que la plupart de nos participants ont atteint un plafond de capacité en MCTv à la charge cognitive de trois. De plus, la performance d'une grande partie de nos participants s'est détériorée de façon importante à la charge de cinq items, indiquant possiblement que la tâche était devenue trop difficile pour eux. L'atteinte de la capacité maximum en MCTv se traduit habituellement par un plafonnement de l'amplitude de la SPCM (Robitaille et al., 2010). Dans notre échantillon, nous avons plutôt observé une baisse d'amplitude de la SPCM à la charge cognitive de cinq. Cette baisse d'amplitude pourrait être expliquée par la performance médiocre de la majorité de nos participants à cette charge cognitive particulière.

MCTv et performance mathématique

Il semble clair que le fonctionnement de la MCT contribue pour beaucoup aux habiletés mathématiques. En effet, plusieurs composantes en lien avec les aspects du traitement mathématique nécessitent l'engagement de la MCT. Les problèmes mathématiques formulés avec des mots, par exemple, requièrent de grandes capacités en MCT, car ils impliquent l'interaction de processus de lecture, de compréhension de langage, de représentation mentale du problème, de choix des opérations de calcul ainsi que d'exécution d'opérations (Andersson, 2007). L'arithmétique semble également faire appel aux capacités en MCT, car elle nécessite le traitement simultané et le maintien temporaire d'information. Des études chez des enfants d'âge scolaire ont montré qu'une capacité élevée en MCT était associée à de meilleurs résultats dans des tâches d'addition de chiffres. En effet, les enfants les plus performants en MCT avaient moins tendance à compter sur leurs doigts et à commettre des erreurs de calcul. Les enfants avec une plus grande capacité en MCT avaient également plus de facilité à décomposer les problèmes complexes en différentes étapes simples. En outre, une faible capacité en MCT semble être associée à une faible vitesse de comptage. Cette vitesse réduite introduirait un délai entre le processus d'encodage du problème mathématique et la production de la réponse. Ce délai réduirait par la suite la probabilité d'association entre le type problème et la réponse. De lentes stratégies de comptage seraient également associées à un nombre plus élevé d'erreurs. Les enfants qui possèdent une faible capacité en MCT seraient aussi plus sensibles à l'interférence, ce qui amènerait de plus fréquentes erreurs d'intrusion et de moins

bonnes capacités de récupération de stratégies afin de résoudre un problème mathématique (Barouillet & Lépine, 2005; Geary, Hoard, Byrd-Craven & DeSoto, 2004).

La MCT est indispensable dans les habiletés mathématiques. Sans la MCT, il serait impossible de résoudre des problèmes mathématiques complexes qui requièrent de maintenir de l'information en mémoire tout en analysant simultanément d'autres informations. La MCTv semble jouer un rôle particulièrement important dans la performance mathématique. Effectivement, il a été stipulé que celle-ci agit comme un tableau mental, permettant de visualiser mentalement des représentations de nombres comme l'emplacement de chiffres sur une droite numérique ou l'alignement de nombres en colonnes. Une grande capacité en MCTv est spécialement utile dans la résolution de problèmes d'arithmétique complexes et de problèmes formulés sous forme de texte ainsi que dans le calcul mental puisqu'elle permet à l'individu de stocker et d'organiser en MCTv l'information utile à la résolution des problèmes (Alloway, 2006).

Comme nous l'avons mentionné à plusieurs reprises, l'objectif principal de ces travaux de recherche était de confirmer le lien entre la MCTv et les habiletés mathématiques. Les analyses effectuées dans le cadre de l'article nous révèlent que l'amplitude de l'activité cérébrale globale à l'intérieur de notre région d'intérêt pariéto-occipitale à la charge mémorielle de trois items pendant la période de rétention permet de prédire la performance en mathématique. Effectivement, les participants chez qui nous avons enregistré une amplitude de l'activité pariéto-occipitale plus importante ont obtenu de meilleurs résultats à la tâche de raisonnement mathématique provenant de l'évaluation neuropsychologique.

Il est important de rappeler que l'activité pariéto-occipitale était le meilleur facteur de prédiction de la performance mathématique. En effet, les mêmes analyses de l'amplitude moyenne de l'activité cérébrale calculée pendant la période de rétention aux régions d'intérêt frontale, temporale et centrale ne permettaient pas de lier le signal cérébral et les habiletés mathématiques. Les mesures que nous avons prises nous ont indiqué que l'activité dans la région d'intérêt pariéto-occipitale était effectivement le facteur prédictif le plus fiable de la performance mathématique.

Les résultats que nous avons obtenus sont en accord avec la littérature existante sur le sujet. Dans un premier temps, nous avons démontré que l'activité cérébrale sous-jacente à la MCTv permettait de prédire la performance en mathématiques. Plusieurs études comportementales avaient déjà établi le lien entre la performance en MCTv et les habiletés mathématiques (Meyer et al., 2010; Raghubar et al. 2010; Simmons et al., 2012). Dans notre étude en MEG, nous avons renforcé les connaissances sur ce lien en réussissant à prouver que le fonctionnement de la MCTv mesuré par l'amplitude de l'activité cérébrale permet de prédire la performance à une tâche de raisonnement mathématique. Nous attribuons nos résultats au fait qu'il est connu que la MCTv et le raisonnement de type mathématique font appel à des régions similaires du cerveau. Il a, en effet, été démontré par un grand nombre de chercheurs que les habiletés mathématiques et le fonctionnement de la MCTv impliquent l'activation de plusieurs régions du cortex pariétal, notamment le SIP (Ashkenazi et al., 2013; Dehaene et al., 2003; Dehaene et al., 2004; Dumontheil & Klingberg, 2012; Jolicoeur et al., 2008; Perron et al, 2009; Pinel & Dehaene, 2013; Robitaille et al., 2010; Todd & Marois, 2004; Zago et al., 2008).

Outre les résultats en lien avec les habiletés mathématiques, nous avons obtenu un lien similaire entre l'activité pariéto-occipitale et la performance en raisonnement perceptif. Effectivement, selon nos résultats, nos participants qui avaient une amplitude de l'activité cérébrale plus élevée à la charge de trois items ont obtenu de meilleurs résultats sur l'index de raisonnement perceptif. Une explication très plausible peut être apportée afin de comprendre ce lien spécifique. Plusieurs études ont investigué le lien entre les habiletés mathématiques et le raisonnement perceptif, plus connu sous le nom d'intelligence non verbale. Il a été démontré que l'intelligence non verbale joue un rôle important dans plusieurs compétences relatives aux mathématiques. Entre autres, le raisonnement perceptif est utile dans la connaissance de concepts quantitatifs, dans les habiletés arithmétiques et dans la résolution de problèmes énoncés sous forme de mots (Floyd et al., 2003; Kytälä & Lehto, 2008; Pina et al., 2014). Sachant que la performance en mathématiques et l'intelligence non verbale sont étroitement liées, il est compréhensible que nous ayons obtenu une relation similaire entre ces deux éléments et l'activité cérébrale pariéto-occipitale mesurée pendant la période de rétention de notre tâche de MCTv.

MCTv et apprentissage verbal

Les analyses effectuées dans le cadre de la rédaction de l'article scientifique ont également révélé certains résultats inattendus. Nous avons entre autres trouvé un lien entre l'amplitude de l'activité cérébrale pariéto-occipitale à la charge de trois items et la performance au CVLT-II. Comme nous l'avons mentionné dans l'article, nous ne comprenons pas totalement ce résultat. Le CVLT-II est en très grande partie une tâche d'apprentissage verbal et nous ne pensions pas trouver un lien entre celui-ci et l'activité induite par une tâche visuelle. La littérature existante indique que le CVLT-II évalue l'apprentissage verbal d'une part, mais il évalue également la MCT verbale. Par ailleurs, plusieurs recherches stipulent l'implication de certaines régions pariétales dans la MCT verbale (Berryhill & Olson, 2008; Clark et al., 2000; Honey et al., 2000; Jonides et al., 1998). Étant donné que la MCTv et la MCT verbale impliquent toutes deux l'activation de régions pariétales, il est possible de comprendre pour quelle raison nous avons découvert que l'amplitude de l'activité cérébrale dans notre région pariéto-occipitale était un facteur de prédiction de la performance en MCT visuelle et en apprentissage verbale.

SPCM et vitesse de traitement

Un autre résultat intéressant, mais inattendu, a été observé entre les résultats à des tests de vitesse de traitement de l'information et d'attention visuelle et l'amplitude de la SPCM extraite pendant la période de rétention de la tâche en MEG. Nous avons trouvé une corrélation négative entre l'amplitude de la SPCM à la charge mémorielle d'un item et les résultats au test Symboles de la WAIS-IV, qui mesure la vitesse de traitement de l'information. Nous avons également découvert une corrélation négative entre l'amplitude de la SPCM à la charge d'un et trois items et la performance à la condition Letter-Sequencing du Trail Making Test, qui mesure majoritairement l'attention visuelle. Les participants qui avaient une plus grande amplitude de la SPCM à la charge cognitive d'un item ont obtenu de moins bons résultats à la tâche de vitesse de traitement. De plus, les participants avec une plus grande SPCM à un et trois items ont obtenu des résultats plus faibles à la tâche d'attention visuelle.

Ces résultats nous ont beaucoup intrigués. Certaines études ont rapporté une corrélation similaire à celle retrouvée dans notre article entre la composante électrophysiologique N1 et la vitesse de traitement. La N1 est une composante enregistrée à l'aide de l'EEG. Elle reflète le processus de déploiement de l'attention visuelle et est observée juste avant la SPCN. Les résultats de ces études montrent qu'une amplitude réduite de la N1 était associée à une plus grande vitesse de traitement (Weigand et al., 2014; Weigang et al., 2014). Ces chercheurs ont expliqué leurs résultats en se basant sur certaines théories de l'efficacité cognitive. Selon ce type de théorie, si une opération cognitive peut être effectuée sans effort, le montant de ressources cérébrales requises pour la réalisation de l'opération sera minimisé. La performance à la tâche sera ainsi maximisée (Deary et al., 2010; Rympha et al., 2002).

La corrélation retrouvée par certains chercheurs entre la N1 et la vitesse de traitement nous a permis de lancer quelques pistes d'explications possibles aux résultats obtenus dans notre projet de recherche. Rappelons que nous avons obtenu une corrélation négative entre la SPCM aux charges d'un et de trois items et les résultats de vitesse de traitement ainsi que d'attention visuelle. Rappelons également que la SPCM est censée refléter le maintien de l'information visuelle en MCTv. Dans un premier temps, il est justifié de penser que notre tâche à la charge mémorielle d'un item seulement requière peu de ressources cognitives en terme de MCTv. Ainsi, le paradigme de notre tâche à un item à garder en mémoire pourrait être davantage un paradigme d'attention visuelle et ainsi se comporter de manière similaire à la N1. Cette particularité pourrait justifier le fait que nous ayons obtenu une corrélation négative entre la vitesse de traitement de l'information et l'amplitude de la SPCM à la charge cognitive spécifique d'un item. .

Nous avons parallèlement découvert des résultats significatifs entre l'amplitude de la SPCM à la charge cognitive de trois et notre tâche d'attention visuelle. En se basant sur ces résultats, une explication supplémentaire pourrait être fournie en suivant la logique de la théorie d'efficacité cognitive présentée plus tôt. Selon cette théorie, nous pourrions penser que les individus qui possèdent une meilleure vitesse de traitement de l'information et une meilleure attention visuelle ont besoin d'engager moins de ressources cérébrales que les individus moins efficaces afin de bien réussir la tâche de MCTv aux charges d'un et trois items. De cette façon, l'amplitude de la SPCM à de faibles charges en mémoire pourrait être

modulée par la performance en vitesse de traitement et en attention visuelle. Pour la plus grande charge cognitive de notre paradigme, nous pourrions plutôt penser que tous nos participants, peu importe leur efficacité en vitesse de traitement de l'information, ont eu à engager un important montant de ressources cérébrales afin d'accomplir la tâche. Comme il a été question dans la discussion de l'article, nous avons remarqué une baisse significative de la performance de nos participants à la plus grande charge en mémoire de cinq items. Cette observation nous pousse à croire que la tâche à cette charge spécifique était particulièrement difficile pour nos participants. Le niveau de difficulté de notre paradigme de MCTv à la charge de cinq items pourrait expliquer pourquoi la performance des individus en vitesse de traitement de l'information en attention visuelle ne pouvait plus moduler l'amplitude de la SPCM à cette charge.

Perspectives

L'objectif principal de ce projet de recherche était de vérifier le lien entre l'activité cérébrale pendant une tâche de MCTv et les habiletés mathématiques. Les recherches existantes sur le sujet avaient majoritairement utilisé des mesures comportementales ou l'IRMf afin de tenter de comprendre et d'étudier ce lien. Dans le cadre du présent projet de recherche, nous avons mis à contribution la MEG, un outil de recherche utile, mais qui avait été très peu, voire aucunement, utilisé dans le domaine. Il est ainsi important de noter que ce projet de recherche a apporté de nouvelles connaissances au monde scientifique en découvrant que l'activité cérébrale enregistrée pendant une tâche de MCTv était étroitement liée à la performance en mathématiques. D'autre part, cette étude a permis de confirmer l'existence du lien entre la MCTv et les habiletés mathématiques.

Dans un avenir rapproché, nous souhaitons effectuer des analyses supplémentaires sur les données recueillies dans le cadre de cette étude. Les analyses en lien avec la présente étude se sont limitées au signal enregistré directement sur les capteurs MEG. Nous souhaitons donc acquérir des images en IRM chez nos participants afin de procéder à des analyses de localisation de sources. La combinaison de la technologie de l'IRM et de la MEG nous permettra d'optimiser notre protocole de recherche, de vérifier et de confirmer nos résultats.

En outre, ce projet scientifique s'inscrit dans le cadre d'une large étude qui vise à comprendre et à prévenir les effets cognitifs des traitements de la leucémie lymphoblastique aiguë. Ce type de leucémie constitue environ 30 % des cancers diagnostiqués chez l'enfant. Malgré l'avancement considérable des protocoles de traitements au cours des dernières décennies, il est connu que les individus ayant reçu des traitements contre la leucémie pendant leur enfance sont sujets à développer plusieurs déficits cognitifs à long terme. Ces déficits sont majoritairement liés aux fonctions exécutives et sont observés notamment en MCT, en vitesse de traitement de l'information, en flexibilité cognitive et en attention (Buizer, de Sonneville & Veerman, 2009; Hunger et al., 2012; Kamdar et al., 2011; Krull et al., 2008; Krull et al., 2013).

Nous savons donc, grâce aux recherches dans le domaine, que les survivants de la leucémie sont susceptibles de développer des déficits en MCT. En outre, ce projet de recherche a permis de confirmer le lien entre la MCTv et la performance mathématique. Connaissant ce lien, il est justifié de croire que les habiletés mathématiques seront altérées chez les individus ayant reçu des traitements contre une leucémie. Comme nous avons trouvé un lien entre l'activité cérébrale pariéto-occipitale en MCTv et la performance mathématique chez des adultes en santé, il serait intéressant de vérifier si le même lien existe dans une population clinique ayant survécu à un cancer pédiatrique.

Dans une étude subséquente, nous utiliserons le même protocole de recherche avec des participants ayant survécu à une leucémie aiguë lymphoblastique. Nous continuerons également les expérimentations avec des sujets en santé afin d'obtenir un échantillon plus important constituant notre groupe contrôle. De plus, nous ajouterons des mesures en imagerie par résonance magnétique de diffusion. Nous souhaitons, avec ces mesures, examiner l'intégrité de la matière blanche corticale. Nous espérons, avec cette étude subséquente, contribuer davantage aux connaissances relatives à la MCTv et les habiletés mathématiques. Nous souhaitons également contribuer à l'avancement des connaissances liées aux déficits cognitifs à long terme pouvant se développer à la suite de traitements contre la leucémie.

Limites

Malgré les découvertes importantes réalisées dans le cadre de ce projet de recherche, notre étude comporte certaines limites. La principale limite de cette étude est l'absence de corrélation entre l'amplitude de la SPCM et les résultats comportementaux k extraits de la tâche de MCTv. Contrairement aux recherches précédentes sur le sujet, nous n'avons pas obtenu de corrélation entre la SPCM et les k comportementaux (Jolicoeur et al., 2008; Perron et al. 2009; Robitaille et al., 2009; Robitaille et al., 2010). En effet, comme l'existence de ce lien était bien répertoriée et que nous avons utilisé un paradigme expérimental semblable, nous nous attendions à trouver une modulation de la SPCM en fonction du K dans notre échantillon. Après révision des résultats obtenus, nous pensons comprendre pourquoi nous n'avons pas trouvé le même type de corrélation. Comme il a été démontré dans l'article, les k que nous avons obtenus dans notre échantillon sont plutôt faibles, indiquant que la plupart des participants ont obtenu des proportions de mauvaises réponses assez élevées.

Nous pensons que nos bas résultats comportementaux sont possiblement dus à la modalité de réponse que nous avons utilisée dans notre protocole. Celui-ci comportait deux conditions de réponses. La moitié des participants devaient répondre « l'item test est identique au précédent » avec l'index gauche et « l'item test est différent du précédent » avec l'index droit, tandis que l'autre moitié des participants devait faire le contraire. Nous avons implanté cette condition pour éviter un biais de réponse dû à la propension des participants à répondre avec une main particulière. Nous pensons cependant que nous avons introduit un biais supplémentaire. Effectivement, il semble qu'il ait été difficile de compléter la tâche adéquatement pour les participants qui avaient été aléatoirement assignés à une condition qui exigeait de répondre « l'item test est identique au précédent » avec l'index de la main non dominante. De l'avis des participants, il aurait été plus naturel pour eux de donner la réponse « identique » avec leur main dominante. À la suite de l'achèvement de la tâche, les participants assignés à la condition contraire à la main dominante nous ont rapporté s'être souvent trompés de main. Ainsi, ils connaissaient au fond la bonne réponse, mais en raison des erreurs de réponse, leur performance comportementale a été diminuée.

Afin de vérifier cette hypothèse, nous avons comparé les résultats comportementaux des individus ayant été assignés à la modalité de réponse problématique par rapport aux résultats des autres participants. À la suite de cette vérification, nous avons constaté que les quatre participants avec les résultats comportementaux les plus faibles dans la tâche de MCTv avaient tous eu à donner la réponse « l’item test est identique au précédent » avec leur main non dominante (voir la Table 1). Compte tenu de cette constatation, nous pensons que le biais dans la modalité de réponse qui a été accidentellement introduit dans notre protocole, explique l’absence de corrélation entre le k comportemental et l’amplitude de la SPCM dans notre étude. Les résultats comportementaux semblent effectivement avoir été affectés par la modalité de réponse pendant la tâche.

Table 1. Niveau de performance des participants à la tâche de MCTv selon la condition assignée pour la réponse « identique ».

<i>Numéro de participant</i>	<i>K moyen</i>	<i>Condition assignée</i>
Participant 1	1,60	Main non dominante
Participant 2	1,28	Main dominante
Participant 3*	0,35	Main non dominante
Participant 4	0,74	Main dominante
Participant 5*	0,39	Main non dominante
Participant 6	1,02	Main dominante
Participant 7	1,47	Main non dominante
Participant 8*	0,74	Main non dominante
Participant 9*	0,32	Main non dominante
Participant 11	0,96	Main non dominante
Participant 12	1,90	Main dominante
Participant 13	1,00	Main non dominante
Participant 14	1,74	Main dominante
Participant 15	1,37	Main non dominante
Participant 16	1,30	Main dominante

*Ces participants ont obtenu les résultats comportementaux les plus faibles pendant notre tâche de MCTv.

Dans le cadre de la continuation de la présente étude et de la mise en marche du projet de recherche avec des survivants de la leucémie qui a été présenté dans la section perspective, il sera nécessaire de revoir le protocole et de modifier la modalité de réponse afin d'éviter l'introduction de tout biais supplémentaire.

Conclusion

Dans le cadre des travaux de ce mémoire, nous avons utilisé la MEG ainsi que des mesures comportementales afin d'étudier la relation entre la MCTv et les habiletés mathématiques. Comme nous nous y attendions, nous avons dans un premier temps découvert une modulation significative de la composante SPCM en fonction de la charge cognitive à garder en mémoire. Nous avons également découvert que l'amplitude de l'activité cérébrale globale à l'intérieur de notre région d'intérêt pariéto-occipitale était un facteur prédictif de la performance en mathématique et en raisonnement perceptif. Des résultats inattendus, mais tout aussi intéressants, ont, de plus, été découverts. Il semble, en effet, que l'activité cérébrale dans notre région d'intérêt soit également un bon facteur de prédiction de la performance dans une tâche d'apprentissage et de MCT verbale. Par ailleurs, nous avons trouvé une corrélation négative entre l'amplitude de la SPCM et la performance en vitesse de traitement de l'information et en attention visuelle.

En résumé, la contribution majeure de ce projet de recherche est la confirmation du lien entre la MCTv et les mathématiques. Nous avons permis d'accroître les connaissances dans le domaine en étudiant le lien entre l'activité électromagnétique du cerveau pendant une tâche de MCTv et les habiletés mathématiques.

Références générales

- Alloway, T. (2006). How does working memory work in the classroom? *Educational Research and Reviews, 1*(4), 134-139.
- Andersson, U. (2010). Skills development in different components of arithmetic and basic cognitive functions: findings from a 3-years longitudinal study of children with different types of learning difficulties *Journal of Educational Psychology, 102*, 115-134.
- Andersson, U. (2007). The Contribution of Working Memory to Children's Mathematical Word Problem Solving. *Applied Cognitive Psychology, 21*, 1201-1216.
- Ashkenazi, S., Rosenberg-Lee, M., Metcalfe, A., Swigart, A., & Menon, V. (2013). Visuo-spatial working memory is an important source of domain-general vulnerability in the development of arithmetic cognition. *Neuropsychologia, 51*, 2305-2317.
- Barouillet, P., & Lépine, R. (2005). Working memory and children's use of retrieval to solve addition problems. *Journal of Experimental Child Psychology, 91*, 183-204.
- Berryhill, M., & Olson, I. (2008). Is the posterior parietal lobe involved in working memory retrieval? Evidence from patients with bilateral parietal lobe damage. *Neuropsychologia, 46*, 1775-1786.
- Brisson, B., & Jolicoeur, P. (2007). A psychological refractory period in access to visual short-term memory on the deployment of visual-spatial attention : multitasking processing deficits revealed by event-related potentials. *Psychophysiology, 44*, 323-333.
- Buizer, A., de Sonneville, L., & Veerman, A. (2009). Effects of chemotherapy on neurocognitive function in children with acute lymphoblastic leukemia: A critical review of the literature. *Pediatric Blood and Cancer, 52*(4), 447-454.
- Clark, C., Egan, G., McFarlane, A., Morris, P., Weber, D., Sonkilla, C., Tochon-Danguy, H. (2000). Updating Working Memory for Words: A PET Activation Study. *Human Brain Mapping, 9*, 42-54.
- Cowan, N. (2000). The magical number 4 is short-term memory : a reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences, 24*, 87-185.
- Deary, I., Penke, L., & Johnson, W. (2010). The neuroscience of human intelligence difference. *Nature Neuroscience, 11*, 201-211.

- Dehaene, S., & Cohen, L. (1997). Cerebral pathways for calculation : double dissociation between rote verbal and quantitative knowledge of arithmetic. *Cortex*, *33*, 219-250.
- Dehaene, S., Molko, N., Cohen, L., & Wilson, A. (2004). Arithmetic and the brain. *Current Opinion in Neurobiology*, *14*, 218-224.
- Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., & Cohen, L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology*, *20*, 487-506.
- Delis, D.C., Kramer, J.H., Kaplan, E., & Ober, B.A. (2000). California Verbal Learning Test: Second Edition. San Antonio, TX : Psychological Corporation.
- Delis, D. C., Kaplan, E., & Kramer, J. H. (2001). Delis-Kaplan Executive Function System (D-KEFS). San Antonio, TX : The Psychological Corporation.
- Dell'acqua, R., Sessa, P., Toffanin, P., Luria, R., & Jolicoeur, P. (2009). Orienting attention to objects in visual short-term memory. *Neuropsychologia*, *48*(2), 419-428.
- Denes, G., & Signorini, M. (2001). Door but not four and 4 a category specific transcoding deficits in a pure acalculic patient. *Cortex*, *37*(2), 267-277.
- Dumontheil, I., & Klingberg, T. (2012). Brain Activity during a Visuospatial Working Memory Task Predicts Arithmetical Performance 2 Years Later. *Cerebral Cortex*, *22*, 1078-1085.
- Floyd, R., Evans, J., & McGrew, K. (2003). Relations Between Measures of Cattell-Horn-Carroll (CHC) Cognitive Abilities and Mathematics Achievement Across The School-Age Years. *Psychology in the Schools*, *40*(2), 155-171.
- Garnero, L., Baillet, S., & Renault, B. (1998). Magnétoencéphalographie/électroencéphalographie et imagerie cérébrale fonctionnelle. *Annales de l'institut Pasteur*, *9*(3), 215-226.
- Gavaret, M., Badier, J., & Chauvel, P. (2008). EEG haute résolution (EEG-HR) et magnétoencéphalographie (MEG) *Neurochirurgie*, *54*, 185-190.
- Geary, D., Hoard, M., Byrd-Craven, J., & DeSoto, C. (2004). Strategy choices in simple and complex addition: Contributions of working memory and counting knowledge for children with mathematical disabilities. *Journal of Experimental Child Psychology*, *88*, 121-151.

- Gosseries, O., Demertzi, A., Noirhomme, Q., Tshibanda, J., Boly, M., Op De Beeck, M., De Tiège, X. (2007). Que mesure la neuro-imagerie fonctionnelle : IRMf, TEP & MEG? *Revue Médicale Liège*, 62(4), 1-7.
- Gunderson, E., Ramirez, G., Beilock, S., & Levine, S. (2012). The relation between spatial skill and early number knowledge: The role of the linear number line. *Developmental Psychology*, 48, 1229-1241.
- Honey, G., Bullmore, E., & Sharma, T. (2000). Prolonged Reaction Time to a Verbal Working Memory Task Predicts Increased Power of Posterior Parietal Cortical Activation. *NeuroImage*, 12, 495-503.
- Hunger, S. P., Lu, X., Meenakshi, D., Camitta, B., Gaynon, P., Winick, N., & Carroll, W. (2012). Improved Survival for Children and Adolescents With Acute Lymphoblastic Leukemia Between 1990 and 2005: A Report From the Children's Oncology Group. *Journal of Clinical Oncology*, 30(14), 1663-1669.
- Isaacs, E., Edmonds, C., Lucas, A., & Gadian, D. (2001). Calculation difficulties in children of very low birthweight *Brain*, 124(9), 1701-1707.
- Jolicoeur, P., Brisson, B., & Robitaille, N. (2008). Dissociation of the N2pc and sustained posterior contralateral negativity in a choice response task. *Brain Research*, 1215, 160-172.
- Jonides, J., Schumacher, E., Smith, E., Koeppe, R., Awh, E., Reuter-Lorenz, P., Willis, C. (1998). The Role of Parietal Cortex in Verbal Working Memory. *The Journal of Neuroscience*, 18(13), 5026-5034.
- Kamdar, K., Krull, K., El-Zein, R., Brouwers, P., Potter, B., Harris, L., & Okcu, F. (2011). Folate pathway polymorphisms predict deficits in attention and processing speed after childhood leukemia therapy. *Pediatric Blood and Cancer*, 57(3), 454-460.
- Klingberg, T., Forssberg, H., & Westerberg, H. (2002). Increased Brain Activity in Frontal and Parietal Cortex Underlies the Development of Visuospatial Working Memory Capacity during Childhood. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14(1), 1-10.
- Kløve, H. (1963) Clinical neuropsychology. In : Forster FM, editor. Medical Clinics of North America. New York : Saunders.

- Krajewski, K., & Schueider, W. (2009). Exploring the impact of phonological awareness, visual-spatial working memory, and preschool findings from a 3-year longitudinal study. *Journal of Experimental Child Psychology, 103*, 516-531.
- Krull, K., Brinkman, T., Li, C., Armstrong, G., Ness, K., Srivastava, D., & Hudson, M. (2013). Neurocognitive Outcomes Decades After Treatment for Childhood Acute Lymphoblastic Leukemia: A Report From the St Jude Lifetime Cohort Study *Journal of Clinical Oncology, 31*(35), 4407-4415.
- Krull, K., Okcu, F., Potter, B., Jain, N., Dreyer, Z., Kamdar, K., & Brouwers, P. (2008). Screening for Neurocognitive Impairment in Pediatric Cancer Long-Term Survivors. *Journal of Clinical Oncology, 26*(25), 4138-4143.
- Kucian, K., Loennecker, T., Dietrich, T., Dosch, M., Martin, E., & Von Aster, M. (2006). Impaired neural networks for approximate calculation in dyscalculic children : a functional MRI study. *Behavioral Brain Function, 2*(1), 31-47.
- Kyttälä, M., & Lehto, J. (2008). Some Factors Underlying Mathematical Performance : The Role of Visuospatial Working Memory and Non-Verbal Intelligence. *European Journal of Psychology of Education, 23*(1), 77-94.
- Li, Y., & Geary, D. (2013). Developmental Gains in Visuospatial Memory Predicts Gains in Mathematics Achievement. *PloS One, 8*(7), 1-9.
- Luck, S. (2008). Visual Short-Term Memory. In Luck & Hollingworth (Ed.), *Visual Memory* (pp. 352). New York : Oxford Scholarship.
- Luck, S., & Vogel, E. (1997). The capacity of visual working memory for features and conjunctions. *Nature, 310*, 279-281.
- Meyer, M., Salimpoor, V., Wu, S., Geary, D., & Menon, V. (2010). Differential contribution of specific working memory components to mathematics achievement in 2nd and 3rd graders. *Learning and Individual Differences, 20*, 101-109.
- Molko, N., Cachia, A., Riviere, D., Mangin, J., Brunandet, M., Le Bihan, D., Dehaene, S. (2003). Functional and structural alterations of the intraparietal sulcus in a developmental dyscalculia of genetic origin. *Neuron, 40*(4), 847-858.

- Olesen, P., Nagy, Z., Westerberg, H., & Klingberg, T. (2003). Combined analysis of DTI and fMRI reveals a joint maturation of white and grey matter in a fronto-parietal network. *Cognitive Brain Research, 18*, 48-57.
- Olesen, P., Westerberg, H., & Klingberg, T. (2003). Increased prefrontal and parietal activity after training working memory. *Nature Neuroscience, 7*(1), 75-79.
- Palva, S., Kulashekhar, S., Hämäläinen, M., & Palva, M. (2011). Localization of Cortical Phase and Amplitude Dynamics During Visual Working Memory Encoding and Retention. *The Journal of Neuroscience, 31*(13), 5013-5025.
- Perron, R., Lefebvre, C., Robitaille, N., Brisson, B., Gosselin, F., Arguin, M., & Jolicoeur, P. (2009). Attentional and anatomical considerations for the representation of simple stimuli in visual short-term memory: evidence from human electrophysiology. *Psychological Research, 73*, 222-232.
- Pina, V., Fuentes, L., Castillo, A., & Diamantopoulou, S. (2014). Disentangling the effects of working memory, language, parental education, and non-verbal intelligence on children mathematical abilities. *frontiers in psychology, 5*(415), 1-12.
- Pinel, P., & Dehaene, S. (2013). Genetic and environmental contributions to brain activation during calculation. *NeuroImage, 81*, 306-3016.
- Raghubar, K., Barnes, M., & Hecht, S. (2010). Working memory and mathematics: A review of developmental, individual difference, and cognitive approaches. *Learning and Individual Differences, 20*, 110-122.
- Robitaille, N., Grimault, S., & Jolicoeur, P. (2009). Bilateral parietal and contralateral responses during maintenance of unilaterally encoded objects in visual short-term memory : evidence from magnetoencephalography. *Psychophysiology, 46*, 1090-1099.
- Robitaille, N., Marois, R., Todd, J., Grimault, S., Cheyne, D., & Jolicoeur, P. (2010). Distinguishing between lateralized and non lateralized brain activity associated with visual short-term memory : fMRI, MEG, and EEG evidence from the same observers. *NeuroImage, 53*, 1334-1345.
- Rotzer, S., Kucian, K., Martin, E., Von Aster, M., Klaver, P., & Loennecker, T. (2008). Optimized voxel-based morphometry in children with developmental dyscalculia. *NeuroImage, 39*(1), 417-422.

- Rypma, B., Berger, J., & D'Esposito, M. (2012). The influence of working-memory demand and subject performance of prefrontal cortical activity. *Journal of Cognitive Neuroscience, 14*, 721-731.
- Simmons, F., Willis, C., & Adams, A. (2012). Different components of working memory have different relationships with different mathematical skills. *Journal of Experimental Child Psychology, 111*, 139-155.
- Swanson, H., & Sachse-Lee, C. (2001). Mathematical problem solving and working memory in children with learning disabilities: Both executive and phonological processes are important. *Journal of Experimental Child Psychology, 79*, 294-321.
- Takayama, Y., Sugishita, I., & Kimura, J. (1994). Isolated acalculia due to left parietal lesion. *Arch. Neural, 51*(3), 286-291.
- Todd, J., & Marois, R. (2004). Capacity limit of visual short-term memory in human posterior parietal cortex. *Nature, 428*, 751-754.
- Vogel, E., & Machizawa, G. (2004). Neural activity predicts individual differences in visual working memory capacity. *Nature, 428*, 748-751.
- Vrba, J., & Robinson, S. (2001). Signal processing in magnetoencephalography. *Methods, 25*, 249-271.
- Wechsler, D. (2008) Wechsler Adult Intelligence Scale–Fourth Edition. San Antonio, TX : Pearson.
- Wechsler, D. (2009). Wechsler Individual Achievement Test 3rd Edition (WIAT II). San Antonio, TX : Pearson
- Wechsler, D. (2009) Wechsler Memory Scale–Fourth Edition. San Antonio, TX : Pearson
- Wiegand, I., Töllner, T., Dyrholm, M., Müller, H., Bundesen, C., & Finke, K. (2014). Neural correlates of age-related decline and compensation in visual attention capacity. *Neurology of Aging, 35*, 2161-2173.
- Wiegand, I., Töllner, T., Habekost, T., Dyrholm, M., Müller, H., & Finke, K. (2014). Distinct Neural Markers of TVA-Based Visual Processing Speed and Short-Term Storage Capacity Parameters. *Cerebral Cortex, 24*, 1967-1978.
- Xu, Y. (2007). The Role of the Superior Intraparietal Sulcus in Supporting Visual Short-Term Memory for Multifeature Objects. *The Journal of Neuroscience, 27*(43), 11676-11686.

- Zago, L., Petit, L., Turbelin, M., Andersson, F., Vigneau, M., & Tzourio-Mazoyer, N. (2008). How verbal and spatial manipulation networks contribute to calculation: an fMRI study. *Neuropsychologia*, *46*, 2403-2414.
- Zhang, H., Chen, C., & Zhou, X. (2012). Neural correlates of number and mathematical terms. *NeuroImage*, *60*, 230-240.
- Zorzi, M., Priftis, K., & Umiltà, C. (2002). Brain damage-neglect disrupts the mental number line. *Nature*, *417*(6885), 138-139.

