



Département d'Orthophonie
Gabriel DECROIX

MÉMOIRE

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

Marianne HURTREZ

soutenu publiquement en juin 2018 :

**Cognition numérique : apport des techniques électrophysiologiques dans la compréhension des mécanismes cérébraux liés au traitement numérique.
Vers une nouvelle perspective de diagnostic.**

MÉMOIRE dirigé par :

Sandrine MEJIAS, Maître de conférences universitaire en Psychologie, Université Charles de
Gaulle, Villeneuve d'Ascq

Sébastien VANSTAVEL, Doctorant en psychologie, Laboratoire SCAlab, Villeneuve d'Ascq

Lille – 2018

A ma mère, Gina.

Remerciements

Je tiens à remercier mes promoteurs, Madame Mejias ainsi que Sébastien, qui m'ont accompagnée durant ce projet et ont donné de leur temps pour que je mène à bien la rédaction de ce mémoire, avec une grande bienveillance. Aussi, je remercie plus particulièrement Mme Mejias pour la qualité des contenus qu'elle nous a apportés pendant notre cursus, ce qui a été déterminant dans mon choix de sujet de mémoire. Ce que vous nous avez donné a également déterminé l'intérêt que je porte et que je porterai au domaine de la cognition numérique dans ma pratique clinique.

Merci également à Mme Lemaitre d'avoir accepté d'être ma lectrice.

Je remercie mes amis, mes camarades de cinquième année ainsi que toutes les autres personnes, qui avaient accepté avec plaisir de participer à l'expérimentation que je devais mettre en place lors de ce projet.

Je remercie tout particulièrement mon père, Clémentine et Laure, qui m'ont relue de nombreuses fois et m'ont rassurée dans les moments difficiles.

Merci à toi, Thomas de m'avoir supportée et encouragée à ne pas abandonner. Et surtout, merci de croire en moi.

Enfin, merci à toutes les personnes qui m'ont aidée et soutenue de près ou de loin, qui m'ont faite rire et qui m'ont écoutée depuis le début de ce cursus. Laurane, Sandra, Marine, Virginie, Louise, Cécile, Laura et tant d'autres. C'est grâce à vous que j'en suis arrivée là.

Résumé :

Le traitement cérébral de la numérosité est connu pour être automatique. Toutefois, les études disponibles dans la littérature utilisent généralement des techniques de mesures électrophysiologiques ou de neuro-imagerie impliquant une tâche motrice. Cela diminue l'objectivité et la sensibilité des mesures quant au traitement cérébral de la numérosité. D'autre part, les études disponibles dans la littérature ne testent pas simultanément tous les codes numériques visuels auxquels sont confrontés les humains. C'est pourquoi ce projet, qui se poursuivra ultérieurement, propose d'apporter de nouvelles données sur le traitement cérébral des petites quantités (1 à 4) chez les adultes sains, au moyen d'une technique EEG récente, rapide et fiable. La méthode, présentée dans ce document après un état des lieux de la recherche sur le sujet, consiste à diffuser de façon passive des stimuli numériques dans trois modalités : des chiffres arabes, des patterns de points et des configurations digitales. L'enregistrement EEG appelé « steady-states visual evoked potentials » associé à un protocole SVPR (diffusion de stimuli visuels à une fréquence élevée) permettront de recueillir des données objectives et précises sans passer par une tâche motrice, réduisant ainsi les biais de mesure. Les résultats permettront d'augmenter les connaissances sur le traitement neuronal des différents codes visuels, et particulièrement des configurations digitales dont le statut est encore intermédiaire au regard du « triple code ». De plus, ces connaissances permettront d'amorcer une nouvelle perspective de diagnostic fiable et rapide des troubles de la cognition numérique.

Mots-clés :

Cognition numérique – Diagnostic – EEG – Steady-states - FPVS.

Abstract :

Neural processing of quantities is known to be automatic. Nevertheless, a lot of studies in literature typically use electrophysiological or neuro-imaging measures with a motor task. This kind of protocol is less objective and sensitive to measure neural responses regarding numerosity. Moreover, those studies don't test simultaneously all types of visual codes met by human in their everyday life. That's why this project, which is the first part of a greater study, aim at providing new datas about typical adults neural processing of small quantities (from 1 to 4), thanks to a new, rapid and objective EEG recording associated with a FPVS approach (that is to say a high frequency visual display). The method, presented in this document after a state of the art about the topic, consists of displaying passive and rapid numerical visual stimuli to participants. There are three kinds of stimuli : arabic digits, dots arrays, and finger numeral representations. This recording will provide objective and precise datas without a motor task, in order to reduce measure biases. The results will aim at improving knowledge about visual codes neural processing, and particularly about finger numeral representations. Indeed, fingers status in the « Triple Code Model » remain unclear. Moreover, the results will provide knowledge to create a fast and reliable incoming diagnostic test to detect numerical disabilities.

Keywords :

Numerical cognition – Diagnosis – EEG – Steady-states - FPVS.

Table des matières

Introduction.....	1
Contexte théorique, buts et hypothèses.....	2
1. Les bases neuronales de la cognition numérique.....	2
1.1. Le traitement cérébral de la quantité.....	2
1.1.1. Le traitement des numérosités non symboliques.....	2
1.1.2. Le traitement des numérosités symboliques.....	5
1.2. Un modèle cognitif du traitement de la numérosité : le « triple code ».....	5
1.3. Le comptage digital : un prédicteur des compétences arithmétiques ?.....	8
1.4. Les hypothèses étiologiques des troubles de la cognition mathématique.....	10
2. Le diagnostic de trouble de la cognition mathématique.....	11
2.1. Définition.....	11
2.2. Les outils diagnostiques.....	12
3. Les techniques électrophysiologiques.....	14
4. Buts et hypothèses.....	15
Méthode.....	15
1. Population et recrutement.....	15
2. Matériel.....	16
3. Procédure.....	16
4. Enregistrement EEG.....	18
5. Analyse EEG.....	18
Résultats.....	19
Discussion.....	19
1. Hypothèses et analyse.....	19
2. Perspectives et limites de l'étude :.....	21
Conclusion.....	23
Bibliographie.....	24
Liste des annexes.....	29
Annexe n°1 : lettre d'information et de recrutement.....	29
Annexe n°2 : questionnaire du participant.....	29
Annexe n°3 : lettre d'information et de consentement.....	29
Annexe n°4 : questionnaire sur les habitudes de comptage.....	29
Annexe n°5 : fiche particulier.....	29

Introduction

La compréhension et la manipulation du nombre sont nécessaires afin d'évoluer dans la société actuelle. En effet, nous apprenons au cours de notre développement et de notre scolarité à lire les chiffres arabes, à les associer à des quantités, et à compter des collections d'objets sur nos doigts, en oralisant la chaîne numérique, ou silencieusement. Ainsi, grâce aux compétences innées de l'être humain et aux apprentissages effectués dès le plus jeune âge, les personnes au développement typique traiteraient automatiquement les quantités, ce qui semble être confirmé par la littérature ([Rubinsten, Henik, Berger, & Shahar-Shalev, 2002](#)).

A cet égard, les connaissances issues de la recherche ont permis d'appréhender le fonctionnement cérébral typique de l'humain face aux stimuli numériques ([Ansari, Garcia, Lucas, Hamon, & Dhital, 2005](#); [Dehaene & Cohen, 1995](#); [Piazza, Izard, Pinel, Le Bihan, & Dehaene, 2004](#)), mais de nombreux questionnements demeurent concernant les activations neuronales dans le cadre de la dyscalculie ainsi que l'étiologie des troubles ([Rousselle & Noël, 2007](#); [Rubinsten & Henik, 2005](#)). C'est pourquoi, mieux comprendre le traitement des numérosités symboliques et non-symboliques représente un enjeu majeur pour la pratique orthophonique ainsi que pour la pédagogie. En effet, de nouvelles données concernant les différences d'activations entre personnes sans trouble et personnes dyscalculiques permettraient de mieux repérer les troubles chez les enfants, et d'aménager plus précocement les contenus de leurs apprentissages afin de faciliter l'accès aux compétences numériques de base, puis aux compétences mathématiques élaborées.

Par ailleurs, de nombreuses études ont identifié jusqu'alors le cortex pariétal comme étant le centre de traitement de la quantité ([Cantlon, Brannon, Carter, & Pelphrey, 2006](#); [Diestler & Nieder, 2007](#); [Nieder & Merten, 2007](#); [Piazza et al., 2004](#)). Mais de nouvelles données, issues d'études utilisant une méthode EEG récente couplée à une diffusion passive de stimuli, ont apporté des informations à propos d'un traitement précoce de la numérosité dans les aires visuelles primaires, localisées dans le cortex occipital ([Guillaume, Mejias, Rossion, Dzhelyova, & Schiltz, 2018](#); [Park, 2017](#)). Nous utiliserons cette même méthode dans notre projet, dans le but d'apporter de nouvelles données à la recherche concernant les stimuli numériques visuels (points, chiffres et configurations digitales), en tenant compte des nouvelles informations présentes dans la littérature. Nous supposons que les résultats montreront des activations pariétales pour tous les stimuli numériques présentés aux participants adultes.

Ainsi, au cours de ce projet, nous nous sommes demandé si les activations et réseaux neuronaux étaient identiques ou différents chez les adultes et enfants dyscalculiques par rapport aux adultes et enfants au développement typique.

Le début de notre intervention auprès des participants ayant été retardé en raison d'une difficulté technique, nous ne pourrons présenter les résultats de notre étude dans le présent document. Cet écrit s'attelle donc à présenter l'état des lieux de la littérature scientifique concernant notre sujet ainsi que la méthodologie employée. Nous analyserons, dans la discussion, nos hypothèses ainsi que notre méthodologie à l'aune de la littérature scientifique actuelle, afin de mettre en perspective la suite du projet, qui vise à pouvoir utiliser un nouvel outil objectif et rapide dans le cadre du diagnostic des troubles de la cognition numérique.

Contexte théorique, buts et hypothèses

1. Les bases neuronales de la cognition numérique

Les progrès en imagerie et notamment l'apparition de l'imagerie fonctionnelle par résonance magnétique (IRMf) ont permis d'ouvrir de larges horizons pour la recherche en sciences cognitives (Dehaene, 2014). Les chercheurs, forts de ces nouvelles techniques, ont pu dégager des connaissances précises sur ce qui détermine les compétences fines des humains en cognition numérique, telles que l'origine des compétences de base ou des compétences sophistiquées de l'être humain en mathématiques.

Ainsi, nous verrons ci-après que la littérature s'accorde sur l'existence d'un système numérique approximatif permettant de traiter des informations non-symboliques, indépendant d'un système numérique exact permettant de traiter des quantités symboliques et précises. Ces découvertes sont à mettre en lien avec un modèle cognitif majeur, celui du triple code décrit plus loin, établi pour comprendre le processus de traitement du nombre chez l'humain (Dehaene, Piazza, Pinel, & Cohen, 2003). La recherche s'intéresse également au statut du corps, et particulièrement des doigts, dans le processus de traitement numérique. Certaines études, détaillées plus bas, considèrent qu'il s'agit d'un prédicteur des compétences arithmétiques, tandis que d'autres études réfutent cette théorie. De plus, nous présenterons le statut des doigts au regard du modèle du « triple code » car il n'est pas encore clairement défini : les configurations digitales sont à la fois classées dans les représentations non-symboliques et symboliques. Enfin, nous présenterons les hypothèses étiologiques des troubles de la cognition numérique mises en évidence dans la littérature, les théories utilisées dans la pratique orthophonique pour évaluer et prendre en charge ces mêmes troubles, et nous expliquerons la technique d'enregistrement EEG, ainsi que la méthode de diffusion passive de stimuli que nous avons choisie pour réaliser cette étude.

1.1. Le traitement cérébral de la quantité

Nous verrons dans cette partie les différents substrats anatomiques du traitement numérique, dont la connaissance a été permise par les études s'appuyant sur des mesures telles que l'imagerie ou l'électroencéphalographie.

1.1.1. Le traitement des numérosités non symboliques

Afin de comprendre les tenants et les aboutissants des différentes études présentées ci-dessous, il convient de définir ce que la littérature entend par « numérosités non-symboliques » : ce sont les représentations analogiques ou « naturelles » d'une quantité. Elles partagent des propriétés avec ce qu'elles représentent (notamment perceptives) et permettent une correspondance terme à terme ; c'est à dire que chaque élément représente une quantité (e.g., une encoche sur un bâton représentait autrefois un objet vendu par un commerçant, une deuxième encoche en représentait deux (Fayol, 2013)). Ce type de numérosité peut prendre la forme de points disposés de manière aléatoire ou canonique (e.g., dés, cartes à jouer ou dominos) ou encore être matérialisé par des parties du corps (principalement les doigts), des objets, des aliments, des bâtons, etc.

Concernant les activations neuronales, de nombreuses études ont permis d'identifier le sillon intrapariétal (SIP) comme le lieu dédié au traitement de la numérosité, à la fois chez les

animaux et chez les hommes (Cantlon et al., 2006; Dehaene et al., 2003; Nieder & Merten, 2007; Piazza et al., 2004; Nieder, 2005). Parmi ces études, deux d'entre elles (Nieder, 2005; Nieder & Merten, 2007) semblent démontrer qu'une population de neurones dans le SIP s'activerait préférentiellement lors de la présentation de certaines numérosités. La tâche utilisée dans ces études consiste en une comparaison de plusieurs patterns de points montrés à des singes (cf. figure 1). Ces tâches impliquent une réponse motrice de la part des animaux : ils doivent actionner un levier.

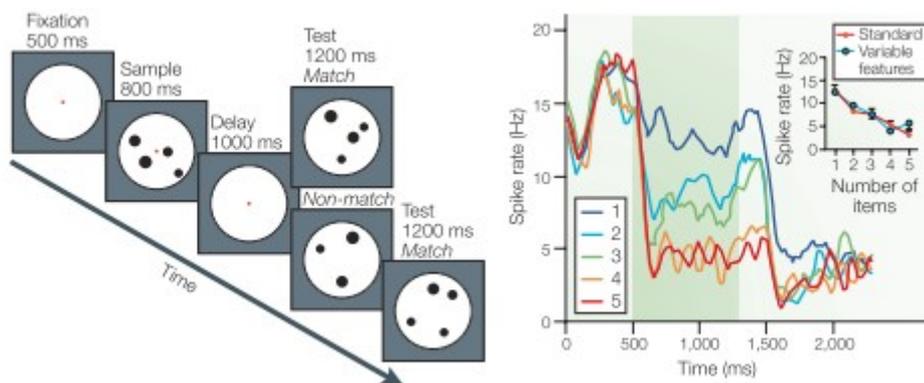


Figure 1 : A gauche, les exemples de stimuli non-symboliques présentés aux singes pour la tâche de comparaison (d'après Nieder et Merten, 2007). A droite, les résultats de l'enregistrement dans le sillon intrapariétal d'un singe rhésus. Les courbes de différentes couleurs représentent les différentes numérosités présentées. Elles affichent un pic d'activation (« spike rate ») à différents moments. Ici, la numérosité "1", en bleu foncé, active préférentiellement le neurone étudié dans le sillon intrapariétal.

Des résultats similaires ont été retrouvés chez des humains en utilisant une technique de stimulation passive. En effet, l'étude de Cantlon et al. (2006) a permis de mettre en relief des activations similaires aux patterns de points, non seulement chez les humains adultes, mais aussi chez des enfants âgés de 4 ans. Les chercheurs ont présenté, aux enfants comme aux adultes, des enchaînements de patterns de points. Ces patterns étaient présentés par paires (e.g., les numérosités 16 et 32). Ces ensembles pouvaient soit être identiques au niveau de la forme mais représenter des numérosités différentes (i.e., une des deux numérosités était diffusée fréquemment et la deuxième était diffusée plus rarement), soit ne pas avoir la même forme mais représenter deux numérosités identiques (e.g., un ensemble de points et un ensemble de triangles). Ils ont pu mettre en évidence une activation supérieure du SIP lorsque les numérosités étaient différentes. Cela peut attester d'une sensibilité de cette région cérébrale à la quantité et non à d'autres paramètres relatifs à l'aspect visuel. Toutefois, des études récentes sont venues ajouter de nouvelles données au questionnement sur les loci cérébraux du traitement numérique (Guillaume et al., 2018; Park, 2017). Les résultats de l'étude de Park et al. (2018) mettent en évidence que le traitement de la numérosité serait effectué de manière précoce (90ms) dans le cortex occipital (les aires visuelles primaires), et non dans le cortex pariétal.

Enfin, les études de cas et la recherche chez les patients cérébrolésés semblent aussi nous donner des informations sur le traitement neuronal non-symbolique. En effet, deux cas d'études ont permis de dégager l'existence de deux systèmes de traitement indépendants internes à notre cortex : le système numérique approximatif et le système numérique exact. Le premier patient (Monsieur N.A.U) présente une altération massive de son hémisphère gauche

suite à un AVC (cf. figure 2), ainsi qu'une acalculie sévère accompagnée de troubles massifs du langage : les nombreux tests réalisés ont mis en évidence une incapacité à réaliser des opérations exactes. Toutefois, il sait estimer des résultats et les auteurs ont démontré que son « sens du nombre » (c'est-à-dire l'intuition concernant les quantités) a été préservé. A cet égard, il est parvenu à comparer 8 et 7 en indiquant lequel était le plus grand des deux, mais a rencontré de grandes difficultés pour les lire (Dehaene & Cohen, 1997; Dehaene & Cohen, 1991).

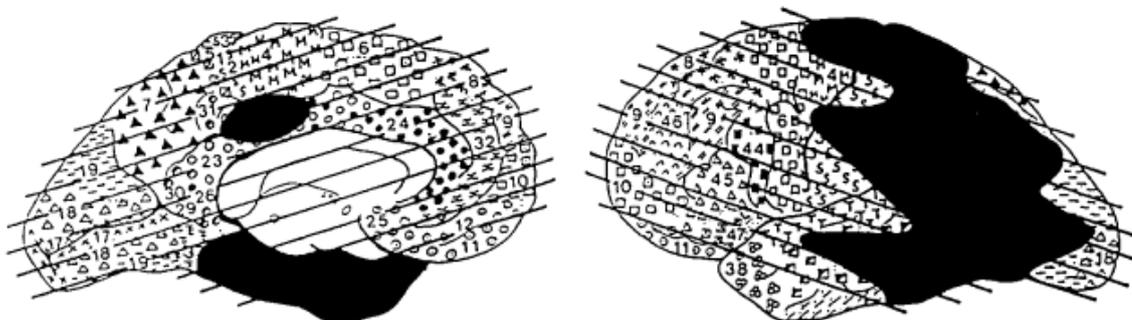


Figure 2: Lésions de M. N.A.U (patient n°1) reconstruit d'après un CT scan effectué. Notons que l'hémisphère droit est placé à gauche par convention, et vice versa. Les lésions, indiquées en noir, sont très étendues dans l'hémisphère gauche (d'après Dehaene et Cohen, 1991).

Le deuxième patient (M.M) présente une lésion du cortex pariétal inférieur droit (cf. figure 3). Il a des difficultés à estimer, à comparer et à dénombrer bien qu'il ait conservé des routines verbales telles que $1+1=2$. Son sens du nombre est altéré (Cohen & Dehaene, 1996; cités par Dehaene, 2014).



Figure 3: Lésion de M.M. (patient n°2) situé dans le cortex pariétal inférieur de l'hémisphère droit (d'après Dehaene et Cohen, 1996; cités par Dehaene (2014)).

Ces études présentent donc une double dissociation, c'est-à-dire que les recherches effectuées auprès de ces patients, par le biais de leurs troubles et de leurs lésions, permettent de mettre en évidence deux fonctions différentes : d'une part le système numérique approximatif, semblant être relié à la lésion du cortex pariétal inférieur ; et d'autre part le système numérique exact, tributaire du langage, et ici relié à une lésion étendue de l'hémisphère gauche. Dans chaque cas, la fonction lésée n'entraîne pas une perte de la seconde fonction. Ainsi, M. N.A.U semble avoir un système numérique approximatif préservé alors que son système numérique exact semble altéré, quand M.M. présente un tableau inverse. C'est grâce à ce type de double dissociation que les chercheurs ont émis l'hypothèse d'un rôle majeur de l'hémisphère

gauche dans le traitement exact du nombre (passant par le langage) et du rôle tout aussi majeur du cortex pariétal dans le traitement approximatif des quantités (Dehaene & Cohen, 1997; Dehaene & Cohen, 1991; cités par Dehaene, 2014). Une étude récente (Libertus, Brannon, & Woldorff, 2011) a également tenté de montrer l'existence d'un système numérique approximatif, et ce dès le plus jeune âge, par le biais d'un enregistrement EEG associé à une diffusion rapide de stimuli (le protocole FPVS, que nous avons également employé dans notre étude, et que nous détaillerons plus loin). Pour ce faire, les chercheurs ont confronté les participants adultes et enfants, âgés de sept mois, aux mêmes stimuli visuels : une même numérosité présentée en continu sur une très courte période et sans que les sujets n'aient besoin d'effectuer une tâche motrice.

Il semble donc ressortir des données actuellement disponibles dans la littérature que le traitement des numérosités non-symboliques et de l'approximation est pris en charge par les régions pariétales chez les animaux et chez les hommes. Les études présentées ci-dessus semblent également donner des informations concernant l'origine des compétences numériques sophistiquées de l'adulte humain : elles proviennent d'une habileté précoce, héritage de l'évolution, développées par l'enfant avant la maîtrise des nombres symboliques et non-symboliques (Cantlon et al., 2006).

1.1.2. Le traitement des numérosités symboliques

Les numérosités symboliques peuvent être définies comme des signifiants arbitraires choisis pour représenter des quantités. Il peut s'agir par exemple de chiffres arabes ou romains. Fayol décrit en 2013 les trois types de symboles pris en compte dans la cognition numérique : le code arabe, le code verbal (c'est-à-dire le nom donné aux nombres) et le code signé (par les personnes malentendantes).

Tous ces symboles arbitraires représentent des quantités. Toutefois, une association entre la quantité et le symbole est nécessaire pour donner du sens à ce que les symboles représentent. C'est le processus d'apprentissage que vivent les enfants à l'école dès leur plus jeune âge. A cet égard, certaines études ont mis en évidence les activations neuronales lors de ces processus d'apprentissage. Les régions cérébrales activées à la fois chez les singes (Diester & Nieder, 2007; Nieder & Merten, 2007) et chez les enfants (Ansari et al., 2005) révèlent un « mapping sémantique » entre les régions pariétales et le cortex préfrontal ; c'est-à-dire que le cortex pré-frontal s'active avec les régions pariétales afin de créer un lien sémantique entre le symbole et la quantité qu'il représente. De plus, cette double activation cérébrale diminue avec l'âge des sujets (Ansari et al., 2005) ce qui indique que les adultes ayant intégré ce lien signifiant/signifié n'activent plus que les régions pariétales, centre du traitement de la « quantité pure ».

Ainsi, les numérosités symboliques, de même que les non-symboliques, seraient traitées par les régions pariétales du cortex. Elles sont encodées et associées aux quantités en amont grâce au cortex pré-frontal.

1.2. Un modèle cognitif du traitement de la numérosité : le « triple code »

Au niveau anatomo-fonctionnel, un modèle majeur dans la recherche en cognition numérique a permis de résumer les différents « codes » utilisés par les humains, ainsi que les activations neuronales correspondantes lors de leur présentation ou utilisation. Ce modèle est

issu des différentes études de Stanislas Dehaene, mais également des données de la littérature (Dehaene & Cohen, 1995; voir Dehaene et al., 2003 pour une revue).

Ainsi, le modèle du triple code suggère que, selon le type de tâche présentée à un sujet sain, trois systèmes sont en jeu dans le traitement numérique (cf. figure 4):

- ◆ Un système sémantique de représentation de la quantité (il est non verbal et permet de comparer les quantités les unes aux autres sur une ligne numérique mentale orientée de gauche à droite) ; il comprend les numérosités non-symboliques évoquées plus haut : le code analogique ou code des quantités,
- ◆ Un système verbal (comprenant une syntaxe des nombres, une forme phonologique et un lexique spécifique) : le code verbal,
- ◆ Un système visuel impliquant des représentations symboliques (e.g., les chiffres arabes), il comprend les numérosités symboliques évoquées plus haut : le code arabe.

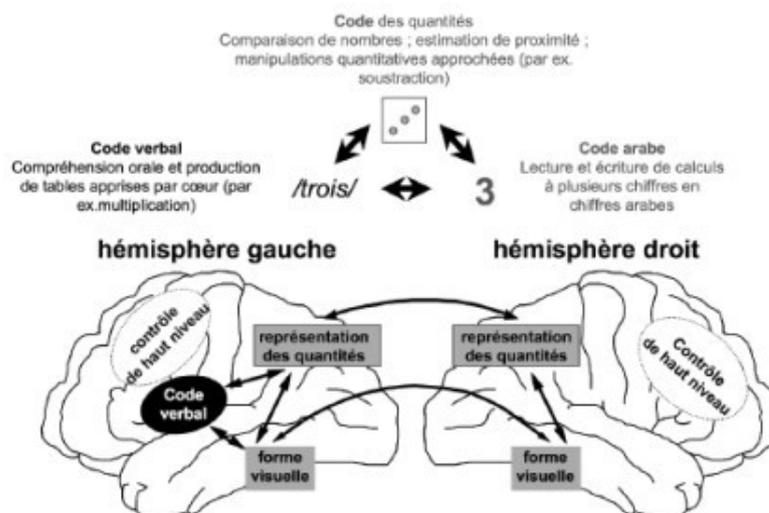


Figure 4: Ci-dessus la modélisation à la fois anatomique et fonctionnelle des "codes" dans les deux hémisphères cérébraux (d'après Dehaene & Cohen, 1995).

Ces trois systèmes activent respectivement trois régions cérébrales différentes (cf. figure 5):

- ◆ Les segments horizontaux des sillons intrapariétaux (bilatéraux) pour le code des quantités,
- ◆ Le gyrus angulaire gauche pour le code verbal,
- ◆ Les lobes pariétaux supérieurs postérieurs (bilatéraux) pour le code arabe.

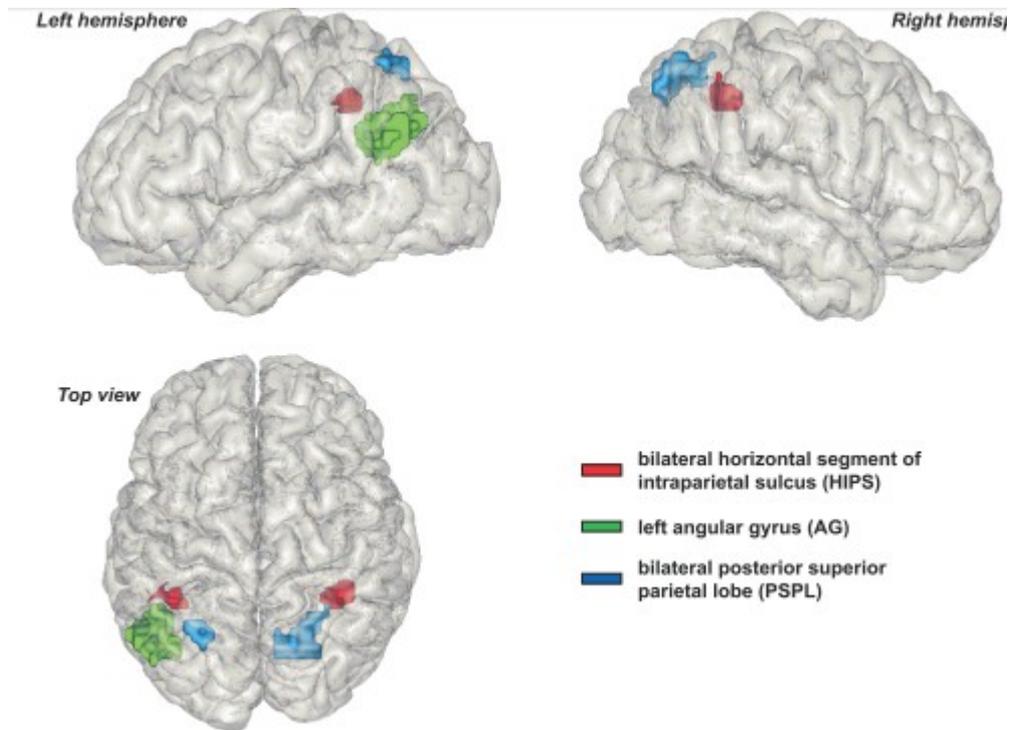


Figure 5: En rouge, les segments horizontaux des sillons intrapariétaux bilatéraux (ou SHSIP), responsables du système sémantique, traitant la quantité de façon non-verbale. En vert le gyrus angulaire gauche, impliqué dans le traitement verbal de la numérosité. Enfin en rouge, les parties supérieures postérieures bilatérales des lobes pariétaux, en charge des symboles associés aux quantités (*d'après Dehaene et al., 2003*).

◆ Le segment horizontal du sillon intrapariétal :

Grâce aux différentes études réalisées en neuro-imagerie, son implication dans les domaines suivants a pu être observée :

- calcul mental,
- comparaison de nombres entre eux,
- estimation de calculs ou de quantités.

Ce locus dénote également une spécificité pour le traitement des nombres, comme le rapporte une étude (Thioux, Pesenti, De Volder, & Seron, 2001), dans laquelle une plus grande activation des SIP a été décelée lors de tâches impliquant des comparaisons de nombres (e.g., 7 est-il plus grand que 5 ?) versus des tâches impliquant des comparaisons d'animaux en fonction de leur férocité (e.g., Cet animal est-il plus féroce qu'un chien ?).

Le SIP semble également opérer un traitement inconscient de la numérosité (Naccache & Dehaene, 2001), et s'active davantage lorsqu'on présente aux sujets un nombre de manière subliminale (en plus d'un nombre cible). L'hypothèse avancée par les chercheurs est que deux réseaux neuronaux sont alors activés dans cette région, et non plus un seul, ce qui explique l'augmentation de l'activation. Ce traitement de la numérosité serait donc observable en toute circonstance.

Ainsi, il s'agirait d'une région cérébrale impliquée dans le traitement de la quantité pure et non verbale.

◆ Le gyrus angulaire gauche :

Il n'est pas considéré à proprement parler comme un locus dédié au traitement numérique, mais davantage comme une continuité de l'aire cérébrale dédiée au langage. D'ailleurs, une étude en IRMf menée par Simon et ses collaborateurs (2002) a mis en évidence un chevauchement dans l'activité du locus à la fois pour les tâches de calcul et de détection de phonème. Ainsi, la littérature s'accorde sur l'implication du gyrus angulaire dans les tâches nécessitant l'écoute, la lecture et l'écriture de nombres verbaux, ainsi que dans les routines verbales associées aux numérosités, c'est-à-dire les opérations simples de type multiplications ou additions qui ont été apprises « par coeur » (e.g. « un plus un égal deux » ; « trois fois trois égal neuf ») aussi appelés « faits arithmétiques », dont il permet la mémorisation (Dehaene et al., 2003).

Par conséquent, nous pouvons mettre ces données en lien avec la partie antérieurement développée sur le traitement exact des nombres, qui est rendu possible par l'utilisation du langage. En effet, le gyrus angulaire permet aux humains de stocker en mémoire les faits arithmétiques et de traiter des quantités précises tant à l'oral qu'à l'écrit, compétences nécessaires afin de résoudre des opérations complexes et de développer des aptitudes élaborées dans le domaine des mathématiques.

- ◆ Les lobes pariétaux postérieurs supérieurs bilatéraux :

Ces régions ne sont pas considérées comme spécifiques au traitement numérique. Les études en neuro-imagerie rapportent une activation lors de multiples tâches impliquant des quantités, comme des comparaisons de nombres (Pesenti, Thioux, Seron, & Volder, 2000). Mais surtout, ces régions jouent un rôle majeur dans de nombreuses tâches visuo-spatiales incluant l'utilisation des mains (pour pointer ou agripper), le mouvement des yeux et l'attention dirigée (Simon et al., 2002).

Ainsi, ils permettent de traiter les symboles associés aux quantités correspondantes et impliquent un traitement visuel.

1.3. Le comptage digital : un prédicteur des compétences arithmétiques ?

L'utilisation spontanée des doigts pour dénombrer des ensembles est observable chez les adultes comme chez les enfants dans notre société. Les doigts représenteraient à cet égard des quantités analogiques. En effet, chaque doigt levé représente un item d'une collection dénombrée. Ainsi, le doigt et l'item sont mis en correspondance. Une étude a d'ailleurs analysé le rôle des doigts et leur valeur iconique dans le comptage (Gunderson, Spaepen, Gibson, Gol-din-Meadow, & Levine, 2015). Les auteurs, en évaluant un groupe d'enfants n'ayant pas encore acquis le principe de cardinalité, ont pu analyser le rôle de leurs gestes de comptage lorsqu'il leur a été demandé d'identifier le nombre représenté par un petit ensemble d'objets (à l'oral ou avec des gestes) ou d'en estimer d'autres (qui dépassent leur niveau d'acquisition). Dans les deux cas, les réponses des enfants sont plus précises lorsque les sujets utilisent leurs doigts.

Ainsi, les doigts seraient utilisés comme un support visuel pour dénombrer des quantités non-symboliques, permettant à la fois de dénombrer ou d'estimer, même lorsque la tâche dépasse les compétences d'un sujet. Ils semblent donc se rapprocher du système numérique ap-

proximatif (ou analogique) décrit plus haut (Dehaene & Cohen, 1997; Dehaene & Cohen, 1991; Libertus et al., 2011).

Cependant, certaines études ont affirmé que le comptage utilisant le corps (et donc les doigts en ce qui nous concerne), était un fait culturel (Bender & Beller, 2012; Dehaene, 2014). Si ce fait est culturel, il pose donc la question d'une imitation des pairs ou d'un apprentissage, de même que les symboles du code arabe sont, au fil des années, appris et associés à des quantités (Fayol, 2013). Cette notion d'apprentissage est renforcée par des études ayant testé les performances des enfants face à des configurations digitales canoniques ou non (cf. figure 6 ; (Noël, 2005; Di Luca & Pesenti, 2008)). En effet, la vitesse de traitement est meilleure pour les petites ou grandes numérosités (jusqu'à neuf) lorsque le stimulus présenté est canonique (Noël, 2005). De plus, Di Luca et ses collaborateurs (2008) ont affirmé dans leur étude que les représentations canoniques ont une charge sémantique plus importante que les représentations non-canoniques et que par conséquent, elles permettent un traitement de la numérosité digitale plus rapide. Enfin, une autre étude a permis de mettre en évidence une amélioration des performances de traitement d'un nombre arabe grâce aux doigts, lors d'une tâche de dénomination de chiffres. Les chercheurs ont présenté en amorçage des configurations digitales canoniques ou non, et proches dudit nombre ou non. Les résultats ont mis en évidence une amélioration du temps de réaction pour dénommer les chiffres quand les représentations digitales présentées en amorçage étaient canoniques, et proches du nombre arabe cible (Di Luca, Lefèvre, & Pesenti, 2010).

Ainsi, toutes ces données pourraient signer un apprentissage des configurations digitales utilisées pour le comptage, de la même façon que les symboles arabes sont reliés sémantiquement aux quantités lors du développement des habiletés numériques.

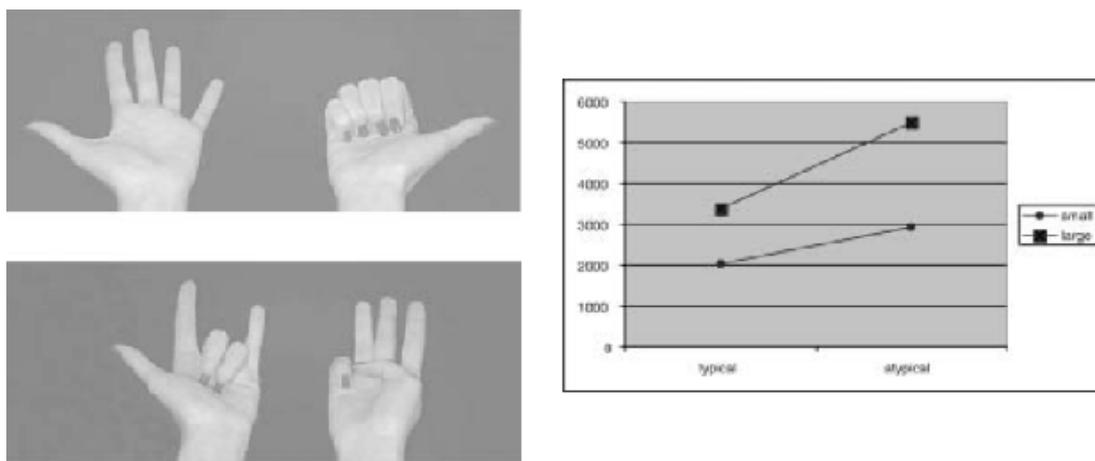


Figure 6: En haut à gauche, la représentation digitale canonique du chiffre 6 et en dessous, une représentation non-canonique. Notons la figure à droite rapportant les résultats des enfants de l'étude : concernant les petites numérosités (cercles noirs), les performances (en millisecondes) sont meilleures avec les dispositions canoniques (« typical » en abscisse à gauche du graphique) (d'après Noël, 2005).

Donc, le statut des doigts dans le comptage semble double et n'amène pas à un consensus chez les chercheurs (Fayol, 2013).

Outre cette imprécision du statut digital au regard du triple code, l'utilisation des doigts semble tout de même avoir un lien ténu avec le domaine numérique. En effet, les gnosies digitales correspondent à la connaissance des différents doigts ainsi que la reconnaissance de ces derniers sur soi-même ou sur autrui. De nombreuses études ont cherché à prouver que de

bonnes gnosies digitales sont prédictrices des compétences futures en mathématiques (jusqu'à un an après avoir administré des tests neuropsychologiques (Fayol, Barrouillet, & Marinthe, 1998; Gracia-Bafalluy & Noël, 2008; Noël, 2005)). D'autres études ont également montré qu'un entraînement pouvait améliorer les compétences en gnosies digitales ainsi qu'en représentation de numérosités chez un groupe d'enfants ayant de faibles compétences dans ce domaine (Gracia-Bafalluy & Noël, 2008). Ces études affirment donc que les gnosies digitales sont non seulement prédictrices des compétences arithmétiques futures, mais constituent également une fonction qu'il est possible d'entraîner afin d'améliorer les performances dans le domaine des mathématiques. Toutefois, une étude récente (Long et al., 2016) a remis en question les multiples études antérieures. En effet, les résultats n'ont pas permis de conclure à un effet prédicteur des performances en gnosies digitales. En revanche, ceux-ci démontrent que le comptage et la comparaison de magnitudes symboliques sont de puissants prédicteurs des compétences en arithmétique chez les enfants testés au cours de l'étude.

De plus, les doigts et gnosies digitales sont impliqués dans les pathologies en lien avec la cognition numérique. Afin d'alimenter les hypothèses d'un lien existant entre doigts et calcul, nous pouvons évoquer le trouble neurologique appelé Syndrome de Gerstmann (Gerstmann, 1940 ; cité par Fayol, 2013). Celui-ci se caractérise par quatre symptômes principaux : une agnosie digitale, une agraphie sans alexie, une acalculie et des problèmes d'orientation visuo-spatiaux. Ce syndrome a été la base de nombreuses recherches (Mayer et al., 1999; Takayama, Sugishita, Akiguchi, & Kimura, 1994; cités par Dehaene, 2014; Simon et al., 2002) concernant le lien entre performances en mathématiques et gnosies digitales, car la lésion cérébrale touche les deux fonctions à la fois, et semble donc témoigner de l'existence d'un lien indivisible.

Ainsi, les données actuelles de la littérature semblent mettre en évidence un rapport à la fois anatomique et fonctionnel du calcul et de l'utilisation des doigts. C'est pourquoi il serait intéressant d'apporter des éléments de réponse supplémentaire quant au statut des doigts en regard du modèle du triple code, et de confirmer son rôle dans le développement de la cognition numérique afin de clarifier les éléments de diagnostic de dyscalculie, mais également d'enrichir le tableau clinique présenté par les enfants ou adultes dyscalculiques.

1.4. Les hypothèses étiologiques des troubles de la cognition mathématique

Actuellement, les hypothèses explicatives des troubles de la cognition mathématique ne parviennent pas à un consensus dans la littérature. Deux hypothèses principales s'opposent concernant leur étiologie ; la première étant « the defective number module hypothesis » d'une part, soit une hypothèse du déficit du système numérique approximatif (le SNA ou code analogique décrit par Dehaene, 1995), responsable du traitement approximatif et du sens du nombre (Butterworth, 1999; Landerl, Bevan, & Butterworth, 2004; cités par Rousselle & Noël, 2007). D'autre part, « the access deficit hypothesis », soit l'hypothèse d'un déficit d'accès entre le système sémantique (ou analogique) et le code symbolique (Rousselle & Noël, 2007). Pour ce faire, deux études ont testé des enfants (Rousselle & Noël, 2007) et des étudiants (Rubinsten & Henik, 2005) afin de vérifier à la fois le SNA seul et l'accès entre SNA et code symbolique chez les dyscalculiques. Les participants ont donc dû, parmi les épreuves administrées, comparer deux ensembles non-symboliques entre eux, ou comparer des nombres arabes avec des ensembles non-symboliques.

La première étude part des conclusions d'une autre étude ayant mis en évidence que les enfants sans pathologie traitent le nombre de manière automatique à partir de la fin du CP (Rubinsten, Henik, Berger, & Shahar-Shaley, 2002; cités par Rousselle & Noël, 2007). Les deux équipes de chercheurs ont élaboré des tâches de comparaison avec un paradigme similaire au Stroop (i.e., deux paramètres sont présentés aux sujets tels que deux chiffres de taille différente et il faut inhiber la numérosité du chiffre pour se concentrer sur la comparaison de la taille physique des deux chiffres). Ainsi, un effet Stroop allongerait le temps de réaction à la tâche puisqu'il faudrait inhiber la numérosité dont le traitement serait automatique. Ces tâches ont donc pour vocation de mettre en évidence un éventuel traitement automatique ou non des numérosités symboliques ou analogiques par les dyscalculiques.

Les résultats de ces deux études concluent à un déficit d'accès entre le SNA et le code arabe, et à une préservation du système sémantique chez les enfants dyscalculiques, bien que les étudiants dyscalculiques de l'étude de Rubinsten et ses collaborateurs (2005) présentent des situations favorisant la réussite ou l'échec à la tâche (e.g., la tâche de comparaison est mieux réussie lorsqu'on leur demande de comparer la taille des chiffres plutôt que leur échelle de gris), de la même façon que les enfants de CP, testés dans l'étude de Rubinsten et collaborateurs (2002), dont l'activation automatique des magnitudes par les nombres était améliorée selon leur maturité et leur niveau scolaire.

2. Le diagnostic de trouble de la cognition mathématique

2.1. Définition

La dyscalculie, ou trouble de la cognition mathématique, est définie comme « un trouble des compétences numériques et arithmétiques qui se manifeste chez un enfant d'intelligence normale ne présentant pas de lésions neurologiques acquises » (Temple, 1992 ; cité par Rousselle & Noël, 2007). Les personnes qui en sont atteintes présentent donc des difficultés dans de nombreuses tâches numériques (e.g., calcul mental, apprentissage et restitution des faits arithmétiques, opérations, résolution de problèmes, etc.).

Actuellement, ce diagnostic doit être effectué par une équipe pluridisciplinaire (neuropédiatre, psychologue, neuropsychologue, orthophoniste, etc.) ayant pour but d'objectiver des difficultés, au moyen de tests normés, sans que la personne ne présente une déficience intellectuelle, un trouble sensoriel ou des lésions cérébrales.

Ces tests normés sont principalement des épreuves « papier-crayon » mais peuvent également être informatisées. Toutefois, tous les tests proposés actuellement sont toujours opérateur-dépendants et représentent, à l'instar de tous les tests standardisés, une performance du patient à un « instant-T ». Par conséquent, les tests normés à eux seuls peuvent difficilement permettre de poser un diagnostic avec certitude. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle ils sont effectués en recoupant l'expertise de plusieurs professionnels de santé, qui cherchent à exclure les critères énoncés auparavant.

2.2. Les outils diagnostiques

Deux courants sont actuellement utilisés pour évaluer et prendre en charge les patients présentant des troubles de la cognition mathématique en orthophonie :

- le courant Piagétien (ou constructivisme),
- le courant cognitiviste.

◆ Le courant constructiviste :

Il prend ses fondements dans les travaux de Jean Piaget, psychologue de renom ayant défini le nombre comme un invariant (e.g., un chiffre est compris, indépendamment de ce qu'il représente comme quantité, grâce à une faculté d'abstraction). Le nombre prendrait donc son sens chez l'enfant grâce à des opérations mentales à l'origine de la pensée logique. Ainsi, il définit ces opérations mentales comme le socle des compétences mathématiques. Piaget considère que ces compétences apparaissent progressivement chez les enfants qui, à force d'observer des régularités dans le monde, accèdent à la pensée abstraite. Parmi ces compétences mathématiques, il met en avant la sériation (i.e., savoir classer des objets dans l'ordre croissant ou décroissant) et la classification (i.e., savoir mettre ensemble des éléments ayant un ou des paramètres communs). Ces compétences permettent notamment d'acquérir la conservation (e.g., être conscient qu'une quantité de pâte à modeler est toujours la même malgré un changement de forme opéré devant l'enfant) et la réversibilité des quantités (tout élément ajouté peut également être retiré). Selon Piaget, toutes ces compétences sont acquises par stades, selon un ordre précis. Les deux opérations de sériation et de classification seraient par exemple, acquises entre 5 et 7 ans (Piaget & Szeminska, 1980; cités par Fayol, 2013).

Les tests s'appuyant sur la théorie piagétienne cherchent donc à évaluer les compétences logiques ainsi que quelques compétences arithmétiques. Les plus couramment utilisés en orthophonie sont les suivants :

- UDN- II (Meljac et Lemmel, 1999)
- B-LM cycle 2 (Métral, 2008)

Cependant, il convient de noter que les théories piagésiennes ont été remises en question par le courant cognitiviste, que nous détaillons ci-dessous. Par la même occasion, les épreuves intégrées dans les tests d'orientation constructiviste ont été revues et répliquées en changeant le protocole d'explication de consignes, et en remplaçant les consignes orales par des consignes non-verbales, comme décrit ci-après (Mehler & Bever, 1967; cités par Dehaene, 2014). En effet, les épreuves piagésiennes sont considérées comme biaisées car elles passent uniquement par le langage oral et sa compréhension. Prenons par exemple l'épreuve de conservation de nombre, réalisée à l'aide de deux rangées égales (e.g., des jetons ronds et des jetons triangulaires). L'examineur pose la question suivante à l'enfant : « Est-ce-qu'il y a plus de ronds ou plus de triangles ? » (situation a1), l'enfant parvient à dire qu'il y en a le même nombre. Si l'examineur décale les pions d'une des deux rangées et repose la même question (situation a2), l'enfant échoue et dit qu'il y en a plus dans la rangée où les pions ont été écartés. C'est pourquoi les études ayant répliqué les épreuves de Piaget ont transformé la consigne pour passer par du non-verbal, permettant ainsi d'évaluer réellement l'enfant sur son concept du nombre, et non sur la compréhension de consignes et sur les inférences de l'enfant concernant les attentes de l'examineur.

Ainsi, les chercheurs donnent deux rangées de bonbons aux enfants. Ils doivent choisir une des rangées pour la consommer. Poussés par leur gourmandise, les enfants ont toujours

choisi celle où il y avait le plus de bonbons, indépendamment de la longueur de la rangée (cf. figure 7). Ces résultats semblent attester du fait que, naturellement, les enfants savent déterminer où se situe le plus grand nombre d'éléments, et ne se fient pas seulement à l'aspect visuel de la rangée (Mehler & Bever, 1967; cités par Dehaene, 2014). L'hypothèse avancée consiste à dire que la consigne piagétienne (a2) est ambiguë car l'enfant entend une deuxième fois la même question, alors que l'examineur change un paramètre (i.e., il écarte les jetons d'une des rangées). L'enfant tente donc certainement d'inférer sur les intentions de son examinateur et change de réponse.

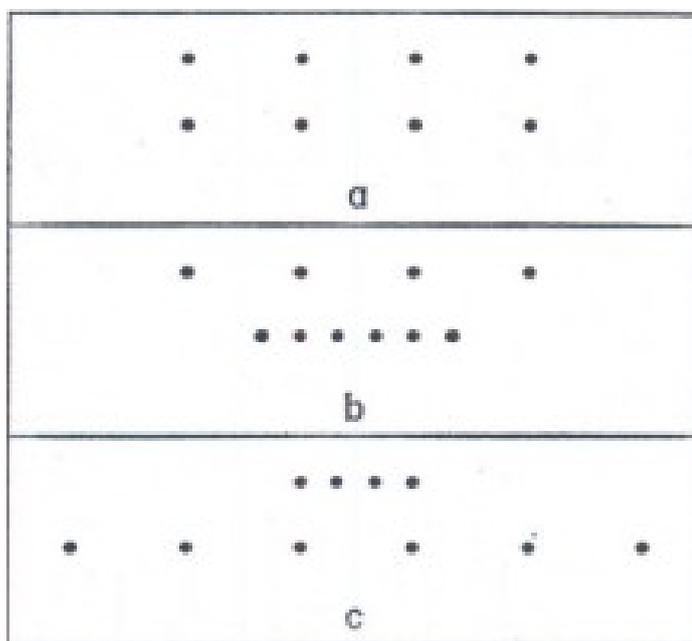


Figure 7 : Condition a) les deux rangées sont égales et alignées ; condition b) la rangée qui contient le plus de jetons est en bas ; celle qui en a le moins, en haut, a ses pions plus écartés ; condition c) la rangée qui contient le plus de jetons, en bas, a également ses pions plus écartés. (d'après Melher et Bever, 1967)

◆ Le courant cognitiviste :

Issu de la recherche en neuropsychologie cognitive, ce courant s'appuie sur les nombreuses études et modèles établis à partir de patients cérébrólésés. Les chercheurs appartenant à ce courant émettent l'hypothèse d'un système de pensée « modulaire », dont chaque module peut être affecté ou lésé indépendamment des autres (Dehaene & Cohen, 1995; voir Dehaene et al., 2003 pour une revue; McCloskey, Caramazza, & Basili, 1985; cités par Dehaene, 2014).

Les théories véhiculées par ce courant ont permis aux chercheurs de remettre en question les idées développées par Piaget à propos des compétences socles des habiletés numériques. En effet, ces chercheurs réfutent la théorie décrite par Piaget qui affirme que les compétences logiques sont des compétences socles des habiletés numériques. Une étude a d'ailleurs permis de mettre en évidence que l'entraînement des compétences logiques (séria-tion, classification, inclusion, etc.) n'améliorerait que ces mêmes domaines, et ne s'étendrait pas à une amélioration dans le domaine numérique sur les enfants testés (Clements, 1984; cité par Fayol, 2013).

Par ailleurs, des compétences numériques très précoces ont pu être mises en évidence chez des enfants de quelques mois (e.g., Xu & Spelke, 2000), voire de quelques heures (Izard,

Sann, Spelke, & Streri, 2009), grâce aux études réalisées par les chercheurs de ce courant, et notamment par Karen Wynn (1992). Cette dernière propose une expérience à des enfants de 4;6 mois avec des poupées à l'effigie de Mickey : l'enfant est placé devant une scène sur laquelle l'examineur introduit une poupée qu'il place derrière un écran, devant les yeux du bébé. Puis il en introduit une seconde derrière l'écran. Quand l'écran s'abaisse, le temps de regard de l'enfant augmente si la situation est impossible (i.e., $1+1 = 1$ ou $1+1 = 3$). Elle fait l'expérience inverse avec le processus de soustraction, et mesure à nouveau le temps de regard des bébés. Les résultats des enfants testés sont toujours les mêmes : le temps de regard augmente si le résultat est impossible (e.g., $2 - 1 = 2$). Elle démontre ainsi que les enfants, même très jeunes, ont une capacité précoce pour traiter précisément de très petites quantités (de 1 à 3).

Enfin, et contrairement au constructivisme, le cognitivisme peut rendre compte de la diversité des troubles possibles, auprès des enfants ou adultes dyscalculiques présentant des difficultés très variées (mémorisation des faits arithmétiques, calcul mental, opérations complexes, etc.) et non seulement d'un problème de logique.

Les tests de ce courant les plus récents utilisés par les cliniciens sont les suivants :

- Tedi math - Test diagnostique des compétences de base en mathématiques (Van Nieuwenhoven et al., 2001)
- Tedi-math grands (Noël & Grégoire, 2015)
- Examath - batterie informatisée - (Lafayet & Helloin, 2016)
- Zareki-R (Dellatolas & Von Aster, 2006)
- Numerical (Gaillard, 2000)

Ainsi, nous pouvons noter que ces deux courants sont utilisés en clinique, séparément ou conjointement. Ils le sont notamment par les orthophonistes formés en « logico-mathématique », terme anciennement utilisé dans la nomenclature générale des actes professionnels (NGAP). Cependant, la littérature récente amène à un consensus sur les théories cognitivistes et un glissement de terminologie a permis de transformer le domaine « logico-mathématique » en « cognition mathématique ». C'est pourquoi aujourd'hui, les orthophonistes formés à la cognition mathématique utilisent préférentiellement les tests cognitivistes afin d'établir un diagnostic et une prise en charge des personnes dyscalculiques. Notons que ces batteries ou tests demeurent des protocoles papier-crayon pour la plupart ; certains sont informatisés.

3. Les techniques électrophysiologiques

De nombreuses études utilisant la neuro-imagerie (Imagerie par Résonance Magnétique – IRM) ou les techniques électrophysiologiques (EEG) ont été effectuées dans le domaine de la cognition numérique, et ce, afin de mettre en évidence les activations et les circuits impliqués dans le traitement de la quantité. Toutefois, il convient de noter que deux types d'études ressortent : certaines impliquant des tâches motrices (e.g., actionner un levier (Nieder & Merzenich, 2007)) ; d'autres choisissant des méthodes passives de présentation de stimuli visuels. Ces études « passives » ont été réalisées soit en IRMf (Cantlon et al., 2006; Piazza et al., 2004); soit en EEG (Guillaume et al., 2018; Park, 2017). L'intérêt de la méthode de diffusion de stimuli passive réside dans l'efficacité du recueil des données. En effet, moins le participant se met en mouvement ou s'attelle à une tâche, plus le signal relevé sera « propre »,

puisque les réseaux nécessaires à une tâche motrice ou à une tâche de raisonnement annexe ne viendront pas s'ajouter au signal recherché. Dans certaines de ces récentes études, l'approche FPVS (fast periodic visual stimulation) a été utilisée. Cette approche consiste à diffuser des stimuli à une fréquence (Hz) donnée, c'est-à-dire de manière périodique et rapide (e.g., une vitesse de 10Hz revient à diffuser 10 stimuli par seconde) afin de provoquer une synchronisation de l'activité neuronale à une fréquence donnée (Adrian & Matthews, 1934; cités par Guillaume et al., 2018). Cette synchronisation est associée à un enregistrement EEG appelé « steady-states visual evoked potentials » (SSVEP), permettant un meilleur signal face au « bruit » (e.g., mouvements musculaires de l'individu) et une meilleure objectivité de la mesure (voir Norcia, Appelbaum, Ales, Cottareau, & Rossion, 2015 pour une revue). Ainsi, dans son étude, Guillaume et collaborateurs (2018) associent l'approche FPVS à un enregistrement EEG de type SSVEP dont il décrivent l'intérêt : cela leur permet d'effectuer des mesures rapides (car la passation d'un EEG est habituellement longue), objectives et spécifiques du système analogique (SNA), et par conséquent de réduire les biais de mesure dans son étude.

4. Buts et hypothèses

Le premier objectif de notre étude est d'essayer d'apporter de nouvelles données à propos du traitement cérébral des petites numérosités symboliques et non-symboliques (1 à 4). Ces données seront recueillies grâce à l'enregistrement EEG de type SSVEP récent et peu utilisé dans la littérature, impliquant des processus cognitifs dits de « haut niveau ». Pour ce faire, nous avons pour but de répliquer l'étude de Guillaume et al., (2018), en présentant aux participants des stimuli non-symboliques comme ils l'ont fait, auxquels nous ajouterons des stimuli symboliques et des configurations digitales, dont le statut reste à déterminer au vu des données de la littérature.

Aussi, ce projet a pour vocation de s'inscrire dans une étude plus large qui se poursuivra, afin d'amorcer la création d'un éventuel outil diagnostique pour les personnes dyscalculiques, qui soit à la fois fiable et rapide. Cela sera rendu possible en amont par l'identification des activations et des réseaux neuronaux impliqués dans le traitement des stimuli numériques (chez les adultes sains, puis à terme chez les enfants sains ainsi que les enfants et adultes dyscalculiques).

Dans le cadre de notre projet, nous nous attendons à retrouver des activations pariétales chez l'humain adulte sain pour tous les stimuli présentés, sauf pour les pseudo-nombres (que nous abordons dans la partie « Méthodologie »). Concernant les configurations digitales, nous supposons qu'elles activent également les cortex pariétaux, et plus particulièrement les sillons intrapariétaux. Une différence d'activation entre les configurations canoniques et non-canoniques est attendue : les configurations canoniques devraient activer davantage les SIP compte tenu de leur probable statut symbolique et de leur rôle moteur.

Méthode

1. Population et recrutement

Afin de réaliser cette étude, nous avons recruté 25 adultes ayant entre 18 et 30 ans et mis en place des critères d'exclusion. Ainsi, les sujets de notre étude ne présentaient pas de

troubles de la cognition mathématique ou un quelconque autre trouble des apprentissages ; ils ne souffraient pas de trouble neurologique, et n’avaient pas de trouble sensoriel (hormis pour la vue : les participants bénéficiant d’une correction l’ont amenée le jour de la passation). Ils avaient également le français pour première langue et n’étaient pas bilingues.

La majorité des participants a été recrutée à Lille, ou en métropole lilloise et étudiait à l’Université de Lille. Ce recrutement a pu être effectué principalement grâce à des messages postés sur les groupes étudiants, par le biais des réseaux sociaux.

Après avoir répondu à l’annonce postée sur les réseaux sociaux, les potentiels participants ont reçu la lettre d’information et de recrutement (annexe 1) ainsi qu’un questionnaire rapide sur leurs antécédents médicaux, leur langue maternelle et leur latéralité (annexe 2), afin de vérifier les critères d’exclusion décrits ci-dessus. Chaque participant pouvait bénéficier d’une gratification de 20 euros ou, selon son souhait, (pour les étudiants de l’institut d’orthophonie Gabriel Decroix) de crédits pour l’UE Recherche. Pour ce faire, ils devaient remplir une fiche particulier (annexe 5) permettant de renseigner leur identité ainsi que leurs coordonnées bancaires. Ils effectuaient à cette occasion leur choix quant à la gratification qu’ils souhaitaient recevoir.

2. Matériel

Les pré-tests effectués se sont déroulés à l’université Charles de Gaulle de Villeneuve d’Ascq, et non à l’Imaginarium de Tourcoing comme indiqué dans les annexes 1 et 3, car le lieu de passation a été modifié au cours de l’année. L’espace à notre disposition sur le site était composé de deux locaux : une première salle à partir de laquelle l’étude a été contrôlée au moyen de deux ordinateurs, et une seconde salle, contenant le matériel de testing. L’écran de cette deuxième salle était relié à l’ordinateur de présentation des stimuli afin de contrôler l’enregistrement EEG et la présentation des images simultanément, lors de la passation. De plus, une caméra a été placée dans la salle de testing afin de pouvoir garder le participant en visuel pendant la passation.

Nous avons utilisé des bonnets EEG permettant de connecter 64 électrodes (trois tailles disponibles : S-M, M-L et L) ainsi qu’un gel conducteur à base d’eau à insérer dans les oeillets du bonnet à l’aide d’une seringue en plastique. Ce gel, en contact avec le scalp d’un côté, et l’électrode de l’autre a permis la conduction nécessaire au relevé des données EEG.

Enfin, le participant était assis confortablement devant un écran sur lequel lui ont été présentés les stimuli durant l’enregistrement.

3. Procédure

Avant de démarrer l’installation des participants et la phase de test, la lettre d’information et de consentement leur a été donnée afin qu’ils puissent prendre connaissance de l’étude et de ses objectifs de façon détaillée (annexe 3). Ensuite, nous leur avons demandé de signer le consentement (annexe 3) afin d’attester de leur décision de poursuivre l’étude. Il leur a été précisé dans le document qu’ils pouvaient mettre un terme à l’étude à tout moment, s’ils le souhaitaient. Cette étape a pris peu de temps et a été suivie d’une description du matériel ainsi que de son installation (bonnet EEG et électrodes), qui ont pris environ 30 minutes.

Une phase de pré-test a été nécessaire afin de s'approprier le matériel et d'apprendre à poser le bonnet EEG (des mesures ont été réalisées sur chaque sujet pour choisir la bonne taille de bonnet et le positionner correctement). Deux volontaires, dont les résultats n'ont pas été analysés pour notre étude, ont participé à cette phase d'entraînement à laquelle j'ai pu prendre part. Nous avons utilisé à cette occasion, et par la suite, les mêmes bonnets EEG de 64 électrodes, qui ont été installés sur le participant. Une fois le matériel prêt, nous avons pu lui expliquer la démarche à suivre.

Ce dernier était passif face aux stimuli d'intérêt et aucune consigne le concernant ne lui a été donnée. Afin de vérifier la bonne orientation attentionnelle envers la diffusion de ces stimuli, une tâche attentionnelle est proposée. Celle-ci permettait de vérifier que le regard du participant était dirigé vers l'écran au moment de la présentation des stimuli. Le sujet devait ainsi appuyer sur la barre « espace » du clavier lorsque la croix de fixation se trouvant au centre de l'écran changeait de couleur : elle passait du bleu au rouge. Il convient de noter que l'expérimentateur conseillait au participant de faire le moins de mouvements possibles lors des 60 secondes de diffusion des stimuli (cligner des yeux, mâcher, bouger les membres, etc.). En effet, ces mouvements auraient ajouté des signaux au signal EEG recueilli, ce que nous avons évoqué dans la partie théorique sous le nom de « bruit » . Enfin, le participant a été placé dans le noir, confortablement installé face à l'écran d'ordinateur sur lequel lui ont été présentés de façon passive les stimuli numériques. Un message lui a été présenté à l'écran afin de lui expliquer la consigne. Il a pu déclencher lui-même le début de la présentation lorsqu'il se sentait prêt et concentré, en appuyant sur la barre « espace » également. Le participant bénéficiait d'une pause entre chaque séquence de 60 secondes, durant laquelle l'enregistrement s'arrêtait. Ce temps permettait à la personne de pouvoir bouger et de se concentrer de nouveau avant de relancer la stimulation suivante. Chaque bloc de 60 secondes représentait une séquence différente. Ainsi, les stimuli, que nous décrivons ci-dessous changeaient après chaque pause.

Six types de stimuli numériques ont été présentés aux participants durant notre enregistrement EEG:

- des chiffres arabes et des pseudo-chiffres,
- des configurations digitales canoniques et non-canoniques,
- des patterns de points canoniques et non-canoniques.

En ce qui concerne les séquences de chiffres, elles ont donc pu être présentées sous format (1) traditionnel (e.g., « 3 ») ou (2) de pseudo-nombres (ces pseudos-nombres sont inspirés des chiffres que nous connaissons car ils ont des caractéristiques graphiques communes, mais n'ont aucun sens numérique). Pour les configurations digitales, elles pouvaient être (3) canoniques ou (4) non-canoniques (Di Luca & Pesenti, 2008; Noël, 2005).

Les points, eux, étaient également (5) canoniques (présentés comme sur les faces d'un dé) ou (6) disposés de manière aléatoire.

Pour chacune des 6 conditions, les numérosités (de 1 à 4) ont été présentées par paire (e.g., 2 et 4) et la taille d'affichage des stimuli variait afin de limiter l'effet d'habituation visuelle de bas niveau (cf. figure 8).



Figure 8 : Ci-dessus, trois exemples de paires diffusées aux participants, dans les trois modalités (configurations digitales, points et chiffres arabes). Le premier élément est répété 8 fois et le deuxième élément est inséré après 8 images fréquentes. Le premier élément varie en taille lorsqu'il est répété, pour éviter l'effet d'habituation (e.g., pour les chiffres arabes, le chiffre 3 apparaît 8 fois à une fréquence de 10Hz et sa taille varie. Le chiffre 4 apparaît après 8 répétitions du chiffre 3).

Les stimuli ont été présentés de façon rapide et périodique (protocole FPVS « fast periodic visual stimulation » ou SVPR « stimulation visuelle périodique et rapide », en français) comme dans l'étude de Guillaume et al. (2018).

Chaque type de stimulus a été présenté par bloc de 60 secondes pendant lesquelles se sont répétés des éléments numériques (e.g., 2 et 4) à un rythme de base fixe de 10 images par seconde (i.e., à une fréquence de base de 10Hz). Les paires de stimuli numériques ont été présentées selon un paradigme oddball, c'est-à-dire qu'un stimuli est présenté de manière fréquente (e.g., « 2 ») et le second est présenté de manière « rare » (e.g., 4). Le ratio d'apparition des stimuli fréquents/rare est de 8 pour 1 (cf. figure 8). Ainsi, une variation périodique a été introduite dans la séquence tous les 8 stimuli fréquents (à 1.25 Hz).

Une fois l'étude terminée, un questionnaire sur les habitudes de comptage a été donné aux participants (annexe 4). Enfin, un temps leur a été dédié afin de répondre aux éventuelles questions concernant l'étude et ses objectifs.

4. Enregistrement EEG

L'enregistrement des signaux EEG a été fait avec un EEG Biosemi (BioSemi B.V., Amsterdam, Pays-Bas). Les électrodes ont été placées sur le bonnet (Voir <http://www.biosemi.com> pour les positions exactes).

Enfin, deux électrodes supplémentaires ont été placées sur le participant. La première, placée sur l'os mastoïde, a servi d'électrode contrôle, car cet endroit du corps humain ne contient pas de muscle. Ainsi, elle ne doit pas recueillir de signal. La deuxième électrode a été placée sur le canthus extérieur gauche du participant afin de relever les mouvements oculaires, et de pouvoir éventuellement les retirer du signal lors du traitement des données EEG.

La présentation des stimuli a été effectuée avec le logiciel Matlab.

5. Analyse EEG

Le spectre EEG n'a pas été corrigé pour les mouvements oculaires et le rapport signal sur bruit a été calculé sur toute la fréquence spectrale. D'autre part, nous avons analysé plus particulièrement les signaux recueillis par les régions d'intérêts, c'est-à-dire les électrodes postérieures (occipitales) et pariétales. Notons que le traitement des données a nécessité l'utilisation du logiciel informatique « Let's wave 6 » qui fonctionne aussi avec Matlab (<http://nocions.webnode.com/letswave>).

Résultats

Lors de la réalisation de ce protocole, certaines difficultés techniques ont été rencontrées. Elles ont eu lieu pendant la phase d'entraînement. En effet, la fréquence de diffusion des images était trop importante pour être correctement supportée par les outils informatiques à notre disposition. Ceci bloquait la diffusion sur un seul stimulus, ce qui était en totale contradiction avec l'intérêt du protocole FPVS choisi. La fréquence de stimulation ne pouvant être cyclique, la synchronisation cérébrale ne pouvait être mesurée. L'équipe en charge de l'administration du protocole, ainsi que celle en charge du matériel informatique, ont donc pris le temps et les mesures nécessaires afin de résoudre ce problème.

Par conséquent, les passations de pré-tests de contrôles sont toujours en cours et les acquisitions EEG avec les participants ne débuteront qu'à la rentrée académique prochaine. Compte tenu de ces événements, et indépendamment de notre volonté, les données issues de ces passations ne sont, à ce jour, pas à notre disposition. Nous sommes donc dans l'incapacité de présenter les résultats de cette étude dans ce document.

Cependant, d'après les données retrouvées à plusieurs reprises dans la littérature scientifique, nous pouvons nous attendre à des activations détectées près des électrodes pariétales pour tous les stimuli présentés (Ansari et al., 2005; Cantlon et al., 2006; Diester & Nieder, 2007; Nieder, 2005; Piazza et al., 2004) ; hormis les pseudo-nombres, qui n'ont aucun sens numérique naturel ou acquis par apprentissage. Nous attendons également une activation plus importante des stimuli digitaux canoniques, dont la charge sémantique est importante, comme nous l'avons évoqué dans le contexte théorique (Di Luca et al., 2010; Di Luca & Pesenti, 2008).

Discussion

1. Hypothèses et analyse

Le traitement cérébral de la numérosité a été largement étudié dans la littérature scientifique, comme nous l'avons évoqué dans notre partie théorique (Ansari et al., 2005; Dehaene et al., 2003; Diester & Nieder, 2007; Naccache & Dehaene, 2001; Nieder & Merten, 2007; Piazza et al., 2004). Les résultats de ces différentes études ont apporté des données intéressantes à la recherche, permettant de mieux appréhender le développement des habiletés numériques précoces et sophistiquées, qui sont des compétences nécessaires au quotidien dans notre société. En effet, dès le plus jeune âge, les enfants sont confrontés à la numérosité dans le milieu scolaire ou familial. En grandissant, la compréhension et l'utilisation du nombre sont indispensables pour s'organiser, se repérer dans le temps, gérer un budget, etc). C'est pourquoi la perspective d'un diagnostic fiable et rapide (aujourd'hui réalisé par des protocoles papier-crayon dépendant du contexte et de l'opérateur) paraît intéressante.

Le projet que nous avons mené est, à cet égard, la première partie d'une étude plus large. Une étude plus large qui consistera à présenter des stimuli non-symboliques et symboliques à des adultes dyscalculiques, puis à des enfants sains et dyscalculiques. A l'instar de notre présent projet, les données de ces études futures seront également recueillies au moyen

de la technique de l'enregistrement de l'EEG, et en particulier la technique SSVEP qui permet de recueillir des données cérébrales objectives et sensibles. La partie du projet que nous avons menée permettra de recueillir des données objectives, en un temps de passation rapide, afin de comprendre les activations présentes chez l'adulte sans trouble de la cognition mathématique, lorsqu'il est confronté à différents stimuli numériques. Les résultats attendus après le traitement des données ont été axés sur les données disponibles dans la littérature. Ainsi, nous attendons une réponse marquée du sillon intrapariétal pour les stimuli non-symboliques (Cantlon et al., 2006); et symboliques (Ansari et al., 2005), puisque les adultes testés ont automatisé le traitement des symboles, auxquels ils ont notamment été exposés au cours de leur scolarité. Ils ne devraient, par conséquent, pas présenter d'activation du réseau fronto-pariétal (présent chez les enfants dans certaines études) qui permet de traiter le symbole pour l'associer à la quantité qu'il représente (Ansari et al., 2005). Nous ne nous attendons pas non plus à retrouver une activation des aires visuelles primaires lors de la diffusion des stimuli numériques, contrairement aux études de Park (2017) et de Guillaume et al. (2018), avec lesquelles nous partageons la méthodologie d'enregistrement EEG. D'autre part, nous avons ajouté, par rapport à ces deux dernières études (qui portaient uniquement sur la perception de patterns de points), deux types de stimuli (doigts et chiffres arabes), afin d'élargir le champ de recherche aux numérosités symboliques et non seulement aux numérosités analogiques (i.e., patterns de points), permettant ainsi de tester tous les types de stimuli visuels numériques.

Concernant les stimuli, notons que les conditions « points non-canoniques » et « configurations digitales non-canoniques » sont des stimuli numériques, il est donc attendu qu'ils déclenchent des activations pariétales. En revanche, la condition « pseudo-chiffres » ne devraient pas activer le sillon intrapariétal, ou du moins déclencher une activation moins grande, puisqu'ils n'ont aucun sens numérique et ne représentent pas des signes appris. Ils ne représentent qu'une variation graphique des chiffres arabes connus et appris dans notre société. Nous pouvons mettre cette réflexion en lien avec l'étude de Cantlon et al. (2006), dont les stimuli ont été modifiés lors de leur présentation afin de contrôler la sensibilité du SIP à la numérosité : le sillon intrapariétal était plus sensible au changement de numérosité qu'au changement des formes présentées (e.g., les patterns de points étaient changés en triangles ou en carré). Ainsi, les pseudo-chiffres ne sont que des variations de formes auxquelles le SIP ne devrait pas se montrer sensible.

De plus, les symboles sont par définition arbitraires et uniques, ils peuvent donc difficilement avoir un équivalent numérique plus rare, contrairement aux configurations digitales qui, elles, peuvent être classées à la fois comme des symboles appris (les représentations canoniques) ou comme des numérosités analogiques, permettant la correspondance terme à terme (les représentations non-canoniques, qu'il faut ainsi dénombrer).

Par conséquent, nous attendons également des activations pariétales importantes pour les configurations digitales, qu'elles soient non-canoniques ou canoniques. Toutefois, les représentations canoniques dépendent de la culture dans laquelle nous évoluons (Bender & Beller, 2012). Leur statut à cet égard est donc symbolique et leur charge sémantique semble plus importante que les configurations que nous n'avons pas l'habitude de rencontrer (Di Luca et al., 2010; Di Luca & Pesenti, 2008). C'est pourquoi les activations pariétales pour les configurations canoniques devraient être renforcées.

Ce projet, dans lequel s'insère notre étude, pourrait apporter à la clinique un moyen complémentaire, plus fiable et plus précoce que le simple protocole papier-crayon, pour dé-

tecter un trouble d'apprentissage des mathématiques chez les enfants en âge scolaire. En effet, les protocoles de tests ne sont pas totalement fiables puisqu'ils dépendent de l'opérateur et évaluent un individu à un instant précis comme nous l'avons déjà évoqué. De plus, l'évaluation et le diagnostic sont également tardifs la plupart du temps, car ils résultent d'une inquiétude des enseignants ou de la famille, suite à une accumulation de lacunes dans un ou plusieurs domaine.s scolaire.s. La fiabilité d'un test papier-crayon pourrait ainsi être infirmée ou confirmée grâce à un test objectif comme l'EEG, de la même façon que Houdé et ses collaborateurs (2011) ont pu mettre en avant des preuves de la fiabilité des observations de Piaget concernant son épreuve de conservation du nombre : ils répliquent ainsi l'épreuve de Piaget en utilisant l'IRMf (Imagerie par Résonance Magnétique Fonctionnelle) pour comparer les différences d'activations cérébrales entre un groupe de jeunes enfants (5-6 ans) qui échouent et ne conservent pas le nombre et un groupe d'enfants plus âgés (9-10 ans) qui réussissent et conservent le nombre. La tâche consiste à montrer à l'enfant deux rangées de jetons identiques et en correspondance (figure 8, condition a) et il lui est demandé de juger s'il y en a le même nombre ou non. Une fois le jugement réussi, une des rangées de jetons est écartée devant les yeux de l'enfant, et devient donc plus longue. On demande une seconde fois à l'enfant de juger s'il y a le même nombre de jetons sur les deux rangées, sa réponse doit toujours être positive pour réussir la tâche. Le but de cette étude est de comparer les données cérébrales de ces deux groupes et de construire un troisième groupe d'enfants de 5-6 ans qui réussissent la tâche. Les chercheurs ont ainsi essayé de déterminer quelles activations sont nécessaires à la réussite de la tâche. Les résultats ont permis d'émettre l'hypothèse que l'échec à cette épreuve provient de l'absence d'activation du réseau fronto-pariétal. En effet, l'activation de ce réseau permet, dans ce cas, d'inhiber le paramètre de la longueur afin de traiter la numérosité et de donner la bonne réponse. Les enfants du groupe des 5-6 ans qui réussissent la tâche présentent une activation de ce réseau, et montrent un succès à presque tous les essais. Ce serait donc une immaturité cérébrale des fonctions exécutives qui empêcherait les enfants tout-venant de réussir cette épreuve de conservation du nombre. Un lien peut ainsi être fait avec le but de notre étude, ainsi que les données de la littérature que nous avons pu mettre en évidence dans le contexte théorique. En effet, le réseau fronto-pariétal est impliqué à la fois dans les fonctions exécutives (Houdé et al., 2011), et dans l'apprentissage des symboles (code arabe) (Ansari et al., 2005). Ainsi, une absence de cette activation fronto-pariétale, appelée aussi « mapping sémantique », pourrait révéler, soit une immaturité cérébrale, soit une absence de lien entre le SIP (centre de traitement de la quantité) et le lobe frontal, lien qui permet d'associer sémantiquement les symboles à la quantité, ou d'inhiber des paramètres en conflit. Repérer ces absences d'activations serait, par ailleurs, concordant avec l'hypothèse de trouble d'accès entre le système analogique et le code arabe (Butterworth, 1999; Landerl, Bevan, & Butterworth, 2004; cités par Rousselle & Noël, 2007).

2. Perspectives et limites de l'étude :

Si les hypothèses de notre étude étaient avérées, cela permettrait de mettre en avant une activation pariétale systématique lors de la présentation de matériel symbolique ou analogique à des adultes au développement typique, ne présentant pas de trouble d'apprentissage des mathématiques. Cela pourrait également permettre de détecter une différence d'activation chez les sujets dyscalculiques. En effet, les réseaux et les activations présents chez les adultes et

enfants sans trouble pourraient être absents ou présenter des différences chez les enfants et adultes dyscalculiques. Cette dernière hypothèse, qui pourrait être vérifiée grâce aux résultats de futures études, donnerait lieu à d'éventuelles tentatives d'explications des différents profils de dyscalculie observés en clinique (e.g., difficultés concernant le calcul mental vs difficultés pour mémoriser et restituer les faits arithmétiques). Ainsi, une personne dyscalculique présentant des difficultés pour effectuer des calculs mentaux pourrait avoir des réseaux d'activations différents des personnes sans trouble, ou des réseaux différents des personnes dyscalculiques ayant des difficultés de rétention des faits arithmétiques.

D'autre part, les données de notre étude, ainsi que celles des études à venir, pourraient également avoir des répercussions positives sur la pédagogie et l'enseignement des mathématiques chez les enfants d'âge scolaire. Les enseignants, forts des connaissances concernant les mécanismes de traitement cérébral de la quantité, pourraient privilégier certains modes de présentation de numérosités (e.g., présenter des configurations digitales plutôt que des chiffres arabes) afin de faciliter les apprentissages scolaires. En effet, les configurations digitales détiennent un lien étroit avec le comptage (Crollen, Seron, & Noël, 2011). Par ailleurs, leur statut à la fois symbolique (pour les représentations canoniques) et analogique (puisque un doigt représente un item dénombré) pourrait pallier les difficultés d'accès entre le système analogique et le code symbolique (Dehaene, Piazza, Pinel, & Cohen, 2003; Fayol, 2013; Rousselle & Noël, 2007). Les configurations digitales seraient ainsi « l'outil manquant » (Andres, Luca, & Pesenti, 2008; cités par Crollen et al., 2011) permettant de connecter les codes non-symboliques et symboliques. Ainsi, les doigts pourraient permettre de renforcer le mapping sémantique fronto-pariétal observé chez les enfants (Ansari et al., 2005). Par ailleurs, les mêmes données, issues de notre étude et des suivantes, pourraient permettre d'améliorer les aménagements pour les enfants dyscalculiques. En effet, si nous partons du principe qu'un enfant présente un déficit d'accès entre le système analogique et le code arabe (Rousselle & Noël, 2007), lui présenter d'autres codes à manipuler pour le calcul et le comptage pourrait lui faciliter l'accès aux habiletés mathématiques simples et élaborées, malgré son trouble.

Enfin, dans la perspective d'une réplique de cette étude, nous pourrions proposer un élargissement du nombre de participants afin d'augmenter la fiabilité des résultats. De plus, il serait intéressant d'observer les résultats de cette étude en contrôlant le ratio hommes-femmes parmi les participants, ainsi que leur niveau socio-culturel (NSC) et leur région d'origine. Ces critères permettraient, si les activations étaient pariétales dans tous les groupes, de généraliser des résultats, malgré le sexe, la provenance ou le niveau socio-culturel et ainsi de pouvoir créer à terme un outil diagnostique plus fiable. Par ailleurs, l'outil diagnostique qui pourrait être créé grâce au présent projet et aux études suivantes, représenterait un test rapide, fiable et peu coûteux, contrairement à d'autres examens tels que l'IRM, ce qui lui confère un atout non négligeable. Enfin, le choix des stimuli pourrait être modifié pour la condition 2 des chiffres (i.e., les pseudo-chiffres). En effet, les trois stimuli choisis pour cette étude sont des stimuli chargés sémantiquement au niveau numérique (chiffres arabes, configurations digitales et ensemble de points). La deuxième condition choisie pour chacun de ces stimuli est une représentation non-canonique, pour les points comme pour les doigts (de la même façon que dans l'étude de Di Luca et al. (2008)). Toutefois, les pseudo-chiffres sont les seuls stimuli qui ne représentent pas une variation des symboles arabes possédant un sens numérique. Par conséquent, les pseudo-chiffres pourraient éventuellement être remplacés par des chiffres d'horloge

analogique, afin de garder un sens numérique tout en modifiant les paramètres graphiques de présentation.

Dans le cadre d'une autre étude, il serait également intéressant de se pencher sur la question des configurations digitales. En effet, ces dernières étant considérées comme ancrées dans une culture (Bender & Beller, 2012), il pourrait y avoir un intérêt à enregistrer les activations présentes chez les adultes et enfants d'autres pays, ayant des habitudes de comptage différentes de celles qui sont les plus fréquentes en France, et de pouvoir ainsi les comparer à celles qui seront recueillies dans notre projet afin de mettre en évidence d'éventuelles similitudes ou différences.

Conclusion

La compréhension et la maîtrise des quantités et des chiffres est une compétence nécessaire dans notre société actuelle. Les difficultés de traitement de la numérosité peuvent ainsi représenter un handicap au niveau des apprentissages scolaires, mais aussi dans la vie quotidienne (pour s'organiser dans le temps et dans l'espace, gérer de l'argent, etc.).

Par ailleurs, la littérature scientifique manque d'études dans lesquelles différents stimuli numériques sont testés sur les mêmes participants. La méthode FPVS que nous avons utilisée sur des adultes sains, associée à l'enregistrement EEG steady-states (SSVEP) permet de multiplier les stimuli testés, car elle est rapide et apporte des réponses neuronales marquées. De plus, le diagnostic des troubles de la cognition mathématique est actuellement effectué par des protocoles papier-crayon, alors que les implications neuro-anatomiques pourraient être mises en évidence et compléter les tests actuels.

C'est pourquoi il semblait intéressant de travailler sur ce que les données électrophysiologiques pouvaient apporter comme informations sur le traitement cérébral des numérosités visuelles. En effet, la compréhension des mécanismes de traitement des chiffres, des quantités analogiques et des configurations digitales chez les adultes sans trouble sont un premier pas vers une meilleure compréhension des réseaux d'activations chez les enfants sans trouble, mais surtout chez les enfants et adultes dyscalculiques.

Dans le cadre de notre projet, nous nous attendions à trouver des activations pariétales chez les adultes sans trouble pour les trois types de stimuli, sans qu'il y ait de traitement précoce de la numérosité par les aires visuelles primaires. Nous nous attendions également à trouver des activations plus marquées lors de la présentation de stimuli digitaux canoniques, du fait de leur statut ambigu, proche d'un code symbolique.

Toutefois, en l'absence de résultat, il paraît difficile de répondre à la problématique ainsi qu'aux hypothèses que nous avons exposées dans ce document.

Nous pouvons toutefois mettre ce projet, ainsi que les études qui suivront, en perspective avec les possibilités qu'elles amèneraient dans l'évaluation et la pratique orthophonique. En effet, la création d'un nouvel outil diagnostique, tel que celui que nous avons tenté d'amorcer, pourrait compléter les diagnostics effectués par les orthophonistes pas le biais des protocoles papier-crayon. En effet, ces protocoles donnent davantage d'informations sur la nature des domaines mathématiques altérés, et non sur le fonctionnement cérébral et la possibilité d'une absence d'activation face à du matériel numérique.

En outre, les futurs résultats de notre projet, ainsi que ceux des études à suivre, pourraient avoir des répercussions sur les méthodes pédagogiques et l'enseignement des mathématiques, puisque certains stimuli pourraient activer davantage les réseaux neuronaux chez les

enfants sains et/ou dyscalculiques, et donc favoriser les apprentissages. Par conséquent, présenter des configurations digitales (plutôt que des chiffres arabes) à des enfants présentant un déficit d'accès entre la quantité et le code arabe pourrait par exemple favoriser l'acquisition des compétences numériques de bases en renforçant le mapping sémantique fronto-pariétal.

Bibliographie

- Adrian, E. D., & Matthews, B. H. . (1934). The Berger Rhythm: Potential Changes from the Occipital Lobes in Man. *Brain*, 57, 355. <https://doi.org/10.1192/bjp.81.335.940-a>
- Andres, M., Luca, S. D., & Pesenti, M. (2008). Finger counting: The missing tool? *Behavioral and Brain Sciences*, 31(6), 642-643. <https://doi.org/10.1017/S0140525X08005578>
- Ansari, D., Garcia, N., Lucas, E., Hamon, K., & Dhital, B. (2005). Neural correlates of symbolic number processing in children and adults. *Neuroreport*, 16(16), 1769-1773.
- Bender, A., & Beller, S. (2012). Nature and culture of finger counting: diversity and representational effects of an embodied cognitive tool. *Cognition*, 124(2), 156-182. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2012.05.005>
- Butterworth, B. (1999). *The mathematical brain*. London : Macmillan.
- Cantlon, J. F., Brannon, E. M., Carter, E. J., & Pelphrey, K. A. (2006). Functional Imaging of Numerical Processing in Adults and 4-y-Old Children. *PLOS Biology*, 4(5), e125. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0040125>
- Clements, D. H. (1984). Training effects on the development and generalization of piagetian logical operations and knowledge of number. *Journal of Educational Psychology*, Vol. 76(No.5), 766-776.
- Cohen, L., & Dehaene, S. (1996). Cerebral networks for number processing : Evidence from a case of posterior callosal lesion. *Neurocase*, 2, 155-174.
- Crollen, V., Seron, X., & Noël, M.-P. (2011). Is Finger-counting Necessary for the Development of Arithmetic Abilities? *Frontiers in Psychology*, 2. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00242>
- Dehaene, & Cohen. (1995). Towards an anatomical and functional model of number processing, 1(1), 83-120.
- Dehaene, & Cohen. (1997). Cerebral pathways for calculation: double dissociation between rote verbal and quantitative knowledge of arithmetic. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, 33(2), 219-250.
- Dehaene, S. (2014). *La bosse des maths, quinze ans après*. Paris : Odile Jacob.
- Dehaene, S., & Cohen, L. (1991). Two mental calculation systems: A case study of severe acalculia with preserved approximation. *Neuropsychologia*, 29(11), 1045-1074. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(91\)90076-K](https://doi.org/10.1016/0028-3932(91)90076-K)
- Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., & Cohen, L. (2003). Three Parietal Circuits for Number Processing. *Cognitive Neuropsychology*, 20(3-6), 487-506. <https://doi.org/10.1080/02643290244000239>
- Dellatolas, G., Von Aster, M. (2006). *Zareki-R : batterie pour l'évaluation du traitement des nombres et du calcul chez l'enfant*. Paris : ECPA.
- Di Luca, S., Lefèvre, N., & Pesenti, M. (2010). Place and summation coding for canonical and non-canonical finger numeral representations. *Cognition*, 117(1), 95-100. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2010.06.008>

- Di Luca, S., & Pesenti, M. (2008). Masked priming effect with canonical finger numeral configurations. *Experimental Brain Research*, *185*(1), 27-39. <https://doi.org/10.1007/s00221-007-1132-8>
- Diester, I., & Nieder, A. (2007). Semantic associations between signs and numerical categories in the prefrontal cortex. *PLoS Biology*, *5*(11), e294. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0050294>
- Fayol, M., Barrouillet, P., & Marinthe, C. (1998). Predicting arithmetical achievement from neuro-psychological performance: a longitudinal study. *Cognition*, *68*(2), B63-70.
- Fayol, Michel. (2013). *L'acquisition du nombre* (Vol. 2è éd.). Paris: Presses Universitaires de France. Consulté à l'adresse <https://www.cairn.info/l-acquisition-du-nombre--9782130625735.htm>
- Gaillard, F. (2000). *Numerical : test neurocognitif pour l'apprentissage du nombre et du calcul*. Signes Ed.
- Gerstmann, J. (1940). Syndrom of finger agnosia, disorientation for right and left, agraphia, and acalculia. Consulté 20 avril 2018, à l'adresse https://www.researchgate.net/publication/233813446_Syndrome_of_finger_agnosia_disorientation_for_right_and_left_agraphia_and_acalculia
- Gracia-Bafalluy, M., & Noël, M.-P. (2008). Does finger training increase young children's numerical performance? *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, *44*(4), 368-375. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2007.08.020>
- Guillaume, M., Mejias, S., Rossion, B., Dzhelyova, M., & Schiltz, C. (2018). A rapid, objective and implicit measure of visual quantity discrimination. *Neuropsychologia*, *111*, 180-189. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.01.044>
- Gunderson, E. A., Spaepen, E., Gibson, D., Goldin-Meadow, S., & Levine, S. C. (2015). Gesture as a window onto children's number knowledge. *Cognition*, *144*, 14–28.
- Houdé, O., Pineau, A., Leroux, G., Poirel, N., Perchey, G., Lanoë, C., ... Mazoyer, B. (2011). Functional magnetic resonance imaging study of Piaget's conservation-of-number task in preschool and school-age children: a neo-Piagetian approach. *Journal of Experimental Child Psychology*, *110*(3), 332-346. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2011.04.008>
- Izard, V., Sann, C., Spelke, E. S., & Streri, A. (2009). Newborn infants perceive abstract numbers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *106*(25), 10382-10385. <https://doi.org/10.1073/pnas.0812142106>
- Lafay, A., Helloin, M.C. (2016). *EXAMATH 8-15. Batterie informatisée d'examen des habiletés mathématiques*. Happyneuron.
- Landerl, K., Bevan, A., & Butterworth, B. (2004). Developmental dyscalculia and basic numerical capacities: a study of 8-9-year-old students. *Cognition*, *93*, 99-125. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2003.11.004>
- Libertus, M. E., Brannon, E. M., & Woldorff, M. G. (2011). Parallels in Stimulus-Driven Oscillatory Brain Responses to Numerosity Changes in Adults and Seven-Month-Old Infants. *Developmental neuropsychology*, *36*(6), 651-667. <https://doi.org/10.1080/87565641.2010.549883>

- Long, I., Malone, S. A., Tolan, A., Burgoyne, K., Heron-Delaney, M., Witteveen, K., & Hulme, C. (2016). The cognitive foundations of early arithmetic skills: It is counting and number judgment, but not finger gnosis, that count. *Journal of Experimental Child Psychology*, *152*, 327-334. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2016.08.005>
- Mayer, E., Martory, M. D., Pegna, A. J., Landis, T., Delavelle, J., & Annoni, J. M. (1999). A pure case of Gerstmann syndrome with a subangular lesion. *Brain: A Journal of Neurology*, *122* (Pt 6), 1107-1120.
- McCloskey, M., Caramazza, A., & Basili, A. (1985). Cognitive mechanisms in number processing and calculation: evidence from dyscalculia. *Brain and Cognition*, *4*(2), 171-196.
- Mehler, J., & Bever, T. G. (1967). Cognitive capacity of very young children. *Science (New York, N.Y.)*, *158*(3797), 141-142.
- Meljac, C., Lemmel, G. (1999). *UDN-II. Construction et utilisation du nombre*. Paris : ECPA.
- Métral, E. (2008). *Malette B-LM cycle 2*. Chavanod : Orthopratic.
- Naccache, L., & Dehaene, S. (2001). The priming method: imaging unconscious repetition priming reveals an abstract representation of number in the parietal lobes. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, *11*(10), 966-974.
- Nieder, A. (2005). Counting on neurons: the neurobiology of numerical competence. *Nature Reviews. Neuroscience*, *6*(3), 177-190. <https://doi.org/10.1038/nrn1626>
- Nieder, A., & Merten, K. (2007). A labeled-line code for small and large numerosities in the monkey prefrontal cortex. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, *27*(22), 5986-5993. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1056-07.2007>
- Noël, M.-P. (2005). Finger gnosis: a predictor of numerical abilities in children? *Child Neuropsychology: A Journal on Normal and Abnormal Development in Childhood and Adolescence*, *11*(5), 413-430. <https://doi.org/10.1080/09297040590951550>
- Noël, M.P., Grégoire, J. (2015). *Tedi-math grands. Test diagnostique des compétences de base en mathématiques*. Paris : ECPA.
- Norcia, A. M., Appelbaum, L. G., Ales, J. M., Cottareau, B. R., & Rossion, B. (2015). The steady-state visual evoked potential in vision research: A review. *Journal of Vision*, *15*(6). <https://doi.org/10.1167/15.6.4>
- Park, J. (2017). A neural basis for the visual sense of number and its development: A steady-state visual evoked potential study in children and adults - ScienceDirect. Consulté 16 avril 2018, à l'adresse <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878929316301591>
- Pesenti, M., Thioux, M., Seron, X., & Volder, A. D. (2000). Neuroanatomical Substrates of Arabic Number Processing, Numerical Comparison, and Simple Addition: A PET Study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *12*(3), 461-479. <https://doi.org/10.1162/089892900562273>
- Piaget, J., & Szeminska, A. (1980). *La genèse du nombre chez l'enfant*. Delachaux et Niestlé.
- Piazza, M., Izard, V., Pinel, P., Le Bihan, D., & Dehaene, S. (2004). Tuning curves for approximate numerosity in the human intraparietal sulcus. *Neuron*, *44*(3), 547-555. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2004.10.014>

- Rousselle, L., & Noël, M.-P. (2007). Basic numerical skills in children with mathematics learning disabilities: a comparison of symbolic vs non-symbolic number magnitude processing. *Cognition*, *102*(3), 361-395. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2006.01.005>
- Rubinsten, O., & Henik, A. (2005). Automatic activation of internal magnitudes: a study of developmental dyscalculia. *Neuropsychology*, *19*(5), 641-648. <https://doi.org/10.1037/0894-4105.19.5.641>
- Rubinsten, O., Henik, A., Berger, A., & Shahar-Shalev, S. (2002). The development of internal representations of magnitude and their association with Arabic numerals. *Journal of Experimental Child Psychology*, *81*(1), 74-92. <https://doi.org/10.1006/jecp.2001.2645>
- Simon, O., Mangin, J. F., Cohen, L., Le Bihan, D., & Dehaene, S. (2002). Topographical layout of hand, eye, calculation, and language-related areas in the human parietal lobe. *Neuron*, *33*(3), 475-487.
- Takayama, Y., Sugishita, M., Akiguchi, I., & Kimura, J. (1994). Isolated acalculia due to left parietal lesion. *Archives of Neurology*, *51*(3), 286-291.
- Temple, C. M., (1992). Developmental dyscalculia. In S. J. Segalowitz & I. Rapin (Eds.), *Handbook of neuropsychology* : Vol. 7, *Child neuropsychology* (pp. 211-222). New York : Elsevier.
- Thioux, M., Pesenti, M., De Volder, A., & Seron, X. (2001). Category-specific representation and processing of numbers and animal names across semantic tasks: A PET study. *Neuroimage*, *13*, 617-617. [https://doi.org/10.1016/S1053-8119\(01\)91960-3](https://doi.org/10.1016/S1053-8119(01)91960-3)
- Van Nieuwenhoven, C., Grégoire, J., Noël, M.P. (2001). *Tedi-math. Test diagnostique des compétences de base en mathématiques*. Paris : ECPA.
- Wynn, K. (1992). Addition and subtraction by human infants. *Nature*, *358*(6389), 749-750. <https://doi.org/10.1038/358749a0>
- Xu, F., & Spelke, E. S. (2000). Large number discrimination in 6-month-old infants. *Cognition*, *74*(1), B1-B11.

Liste des annexes

Annexe n°1 : lettre d'information et de recrutement.

Annexe n°2 : questionnaire du participant.

Annexe n°3 : lettre d'information et de consentement.

Annexe n°4 : questionnaire sur les habitudes de comptage.

Annexe n°5 : fiche particulier.