
Exploration des habiletés visuo-spatiales chez les enfants dyscalculiques

Auteur : Doyère, Claire

Promoteur(s) : Attout, Lucie

Faculté : Faculté de Psychologie, Logopédie et Sciences de l'Éducation

Diplôme : Master en logopédie, à finalité spécialisée en neuropsychologie du langage et troubles des apprentissages verbaux

Année académique : 2019-2020

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/10785>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



Faculté de Psychologie, Logopédie et Sciences de l'Education

Exploration des habiletés visuo-spatiales
chez les enfants dyscalculiques

Mémoire présenté par Claire DOYERE

En vue de l'obtention du grade de Master en Logopédie

Promotrice : Lucie ATTOUT

Lectrices : Valérie LIBIOUL et Line VOSSIUS

Année académique : 2019-2020

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer mes remerciements à l'égard de toutes les personnes m'ayant aidée et soutenue dans la réalisation de ce mémoire.

Tout d'abord, je remercie sincèrement mon encadrante Madame Lucie Attout, pour ses nombreux conseils, sa disponibilité et sa bienveillance ainsi que pour m'avoir accompagnée dans ma réflexion tout au long de ce travail.

Je remercie Mesdames Valérie Libioul et Line Vossius pour le temps consacré à la lecture et l'intérêt porté à mon mémoire.

Je remercie également tous les participants -parents, enfants et enseignants-, sans qui je n'aurais pu mener ces évaluations, et les personnes ayant contribué à mes recherches, soient mes professeurs et les logopèdes.

Enfin, une parenthèse plus personnelle, pour remercier mes collègues de promotion, ma famille et mes amis, pour leur soutien et leurs encouragements.

Table des matières

Introduction générale.....	3
Introduction théorique.....	5
1 – La dyscalculie.....	5
1.1 - Définition.....	5
1.2 - Prévalence et co-morbidité.....	6
1.3 – Variabilité des profils.....	7
1.4 - Etiologie.....	8
1.4.1 Génétique.....	8
1.4.2 Neurobiologique	9
1.4.3 Fonctionnelle	9
A) Facteurs cognitifs généraux	10
B) Facteurs cognitifs spécifiques au domaine numérique.....	14
1.5 – Résumé.....	15
2 – Les capacités visuo-spatiales.....	16
2.1 – Définition et exploration.....	16
2.2 - Les compétences visuo-spatiales liées aux compétences mathématiques.....	19
2.2.1 Représentation visuo-spatiale de la magnitude.	19
2.2.2 La mémoire visuo-spatiale.....	22
2.2.3 L'attention visuo-spatiale.....	24
2.3 L'influence des habiletés visuo-spatiales sur les compétences mathématiques.....	25
2.3.1 Les syndromes génétiques.....	25
2.3.2 L'influence des compétences visuo-spatiales sur les habiletés arithmétiques.....	26
2.3.3 Les habiletés visuo-spatiales : prédicteur des compétences mathématiques ?.....	28
2.4 – Résumé	30
Objectif et hypothèses.....	31
Méthodologie.....	36
1 – Participants.....	36
1.1 – Recrutement.....	36
1.2 – Critères d'inclusions et d'exclusions.....	37
2 – Procédure.....	38
3 – Description du matériel.....	39
3.1 - Evaluation de l'efficacité intellectuelle.....	39
3.2 - Evaluation des habiletés mathématiques.....	39
3.3 - Evaluation des habiletés visuo-spatiales.....	40
3.4 – Evaluation du domaine attentionnel.....	42
3.5 – Evaluation du domaine mnésique.....	43
Résultats.....	45
1 – Statistiques utilisées.....	45
2 – Analyse du raisonnement verbal.....	46
3 – Analyse des compétences numériques.....	47
3 – Analyse quantitative du domaine visuo-spatiales.....	48
3.1 Questionnaire.....	48
3.2 Tâches visuo-spatiales	49
3.3 Raisonnement non-verbal.....	51
3.4 Tâche attentionnelle.....	52
3.5 Tâches mnésiques	52
4 – Analyse de corrélations.....	57
4.1 Estimations numériques et compétences mathématiques.....	57

4.2 Capacités visuo-spatiales et estimation numériques	58
5 – Analyse qualitative des compétences visuo-spatiales chez les dyscalculiques.....	60
Discussion.....	62
1 – Analyse des résultats.....	62
2 – Limites	70
Conclusion et perspectives.....	71
Bibliographie.....	74
Annexes.....	83
1 – Formulaires de recrutement.....	83
2 – Tâche de mémoire à long terme.....	88
3 - Résultats au test de normalité de Shapiro-Wilk	90
4 – Résultats au test d'égalité de la variance de Levene.....	91
5 – Résultats au test non paramétrique de Welch.....	92
Résumé.....	93

Introduction générale

Lire l'heure, découper un gâteau, calculer un budget, monnayer des achats ou encore prendre des mesures (longueur, distance, poids) et se les représenter sont des pratiques usuelles quotidiennes intégrant nécessairement l'utilisation des nombres. Ainsi, les mathématiques sont inévitablement présentes dans notre vie. Elles sont étudiées implicitement, via l'éducation, et seront explicitement développées à l'école. Dès lors, un enfant présentant des difficultés dans le développement et l'apprentissage de ces compétences sera dérangé dans la réalisation d'activités courantes et scolaires. Quand ces difficultés se révèlent sévères et persistantes, on diagnostiquera un trouble des apprentissages : « la dyscalculie ». Ce terme n'est apparu que récemment et son étude s'est intensifiée dans les années 1980, en parallèle à l'introduction de la neuropsychologie chez l'adulte et plus spécifiquement chez l'enfant. Toutefois, bien que les recherches se soient considérablement accrues, ce trouble demeure encore relativement méconnu alors qu'il touche 3 à 6 % de la population. D'où la nécessité d'en reconnaître l'existence et l'origine, notamment chez les enfants scolarisés. De fait, mettre un terme sur cette difficulté permet au patient de comprendre que cela ne relève pas de sa volonté mais d'un trouble spécifique, pouvant faire l'objet d'une rééducation.

D'autres compétences nécessaires à notre quotidien sont les habiletés visuo-spatiales, que nous retrouvons également dans de nombreuses activités quotidiennes, professionnelles ou scolaires : assembler un meuble, étudier un itinéraire, se repérer ou repérer des objets, ou encore comprendre un tableau ou un graphique. Comme pour les compétences numériques, une atteinte du domaine visuo-spatial affectera négativement notre quotidien. Mais, de nouveau, ces aptitudes et leurs implications dans les apprentissages sont méconnues et encore sous-estimées.

Depuis quelques années, les recherches scientifiques mettent de plus en plus en relation ces deux compétences et cherchent à comprendre comment elles interagissent. Il est aujourd'hui admis par de nombreuses études que de bonnes compétences visuo-spatiales favorisent un bon développement des habiletés numériques. Par conséquent, dès l'enfance, ces compétences peuvent être dépistées afin de prévenir les obstacles ultérieurs pour le jeune puis l'adulte. Si de nombreuses études ont été menées dans ce sens, très peu l'ont été pour explorer la relation inverse ; établir si les difficultés visuo-spatiales sont systématiquement présentes chez les jeunes dyscalculiques. Ce postulat est l'objet de notre étude ; éclairer la littérature sur le profil des patients dyscalculiques, et particulièrement au niveau du domaine visuo-spatial.

Cette recherche s'inscrit dans la poursuite d'un autre mémoire mené par Delcour en 2018 dont l'objectif était d'explorer les habiletés visuo-spatiales chez les dyscalculiques. Notre but est de continuer ce travail afin d'analyser si nous obtenons des résultats similaires.

Pour ce faire, des enfants de la 2^{ème} à la 6^{ème} primaire présentant une dyscalculie ont été évalués dans les domaines numériques et surtout visuo-spatiaux afin d'analyser si des difficultés visuo-spatiales se retrouvent dans ce trouble.

La section théorique de notre mémoire explore d'abord la littérature existante à propos de la dyscalculie. Cette description permettra de comprendre cette pathologie en s'attardant sur sa définition, ses caractéristiques et son étiologie. Puis, l'étude de la littérature se poursuivra avec l'exploration du domaine visuo-spatial, et plus spécifiquement avec l'investigation des processus qui unissent le visuo-spatial au numérique, avant de nous attarder sur l'influence de faiblesses visuo-spatiales sur les compétences mathématiques.

L'obtention d'une relation positive entre de faibles compétences numériques et de faibles habiletés visuo-spatiales, permettrait de re-penser la rééducation de ce trouble, voire même, l'enseignement des mathématiques au niveau scolaire.

Introduction théorique

1 – La dyscalculie

L'apprentissage des mathématiques est un des premiers enseignements auquel les jeunes enfants sont confrontés. Certains d'entre eux vont manifester des difficultés dans cet apprentissage, celles-ci sont aujourd'hui définies par le « Manuel Diagnostique et Statistiques V » ou DSM-V (American Psychiatric Association, 2013) comme un trouble des apprentissages, appelé « dyscalculie développementale ». Dans ce trouble, l'enfant ne peut utiliser ou manipuler les nombres, malgré un environnement éducatif correct, une intelligence normale et l'absence de trouble sensoriel. Cette atteinte, induit un impact négatif sur les performances scolaires de l'enfant, ainsi que sa vie quotidienne.

A travers cette première partie, il est nécessaire d'explorer ce que cette terminologie recouvre aujourd'hui, car de nombreuses définitions ont été données ces dernières décennies, mais elles ne prennent pas en compte les mêmes caractéristiques. Ensuite, nous rendrons compte des données épidémiologiques afin d'avoir une meilleure idée de la population concernée par ce trouble. Enfin, nous verrons qu'il n'a pas été aisé d'expliquer l'origine de ce trouble, nous analyserons comment les premiers auteurs ont tenté de l'éclaircir et ce qu'en dit la littérature actuelle.

1.1 - Définition

Les troubles mathématiques ont connu une terminologie très large : « acalculie, dyscalculie, trouble de l'apprentissage lié à l'arithmétique, handicap mathématique, trouble d'apprentissage en mathématiques, difficulté d'apprentissage mathématique ».

En 1974, Kosciuszko est le premier à employer le terme de « dyscalculie développementale » et la définit comme « une déficience des aptitudes à réaliser les opérations arithmétiques » (cité dans Van Hout & Meljac, 2001, p.141).

Aujourd'hui, dans le DSM-V, un ouvrage répertoriant différents troubles, la dyscalculie est reconnue comme un trouble spécifique des apprentissages numériques. Elle est définie comme :

« Un ensemble de problèmes caractérisés par des difficultés à traiter des données numériques, à apprendre des faits arithmétiques et à réaliser des calculs exacts et fluides. Si le terme de dyscalculie est utilisé pour définir cet ensemble spécifique de difficultés mathématiques, il est important de préciser toute difficulté éventuellement présente telle que des difficultés de raisonnement mathématique ou de raisonnement verbal correct »

(American Psychiatric Association, 2013, cité dans Lafay, 2018, p. 16).

Cet ouvrage permet de diagnostiquer la dyscalculie si une difficulté d'apprentissage est observée, depuis environ 6 mois, avec la présence d'au moins un des symptômes qui suit :

- « 1. Lecture de mots inexacte, lente ou laborieuse.
2. Difficulté à comprendre la signification de ce qui est lu (même si lu correctement).
3. Difficulté d'orthographe.
4. Difficulté dans l'expression écrite.
5. Difficulté à maîtriser le sens des nombres, les faits arithmétiques, le calcul ou le raisonnement mathématique.
6. Difficulté dans le raisonnement mathématique. »

(American Psychiatric Association, 2013, cité dans Lafay, 2018, pp.16-17)

Un de ces symptômes doit être persistant malgré la mise en place d'une rééducation ciblée.

De plus, la présence d'un décalage entre les compétences de l'enfant et celles attendues pour son âge doit être notable, tel qu'il présente des difficultés au niveau scolaire et dans ses occupations quotidiennes. Enfin, les troubles ne doivent pas être le résultat d'une déficience intellectuelle, d'un déficit sensoriel ou d'un déficit éducatif/scolaire. Ces difficultés se répercutent au quotidien et se marquent par une désorientation dans l'espace et/ou dans le temps, par une impossibilité de gérer un budget, par des difficultés à suivre des consignes séquentielles ou encore par l'incompréhension de concepts musicaux (rythmique par exemple).

1.2 - Prévalence et co-morbidité

Les données sur la prévalence de ce trouble se doivent d'être précisées afin de déterminer la proportion de la population touchée, dans le but de mettre en place une prévention efficace. Dans l'article de Shalev, Auerbach, Manor et Gross-Tsur (2000), la prévalence de la dyscalculie développementale est de 3 à 6 % dans la population, et selon eux elle touche légèrement plus les filles que les garçons (11 pour 10).

Alors que, dans une étude plus récente (Devine, Soltész, Nobes, Goswami & Szücs, 2013), la différence selon le genre n'est pas marquée. De fait, les auteurs de cette étude notent que cette différence varie selon la définition choisie et selon la variable mathématique désignée pour parler de déficience. Par conséquent, la dyscalculie représente une part non négligeable de la population, indépendamment du sexe.

De plus, une « dyscalculie pure » est rare en clinique. La dyscalculie est généralement associée à d'autres troubles, notamment à des faiblesses en lecture dans environ 64 % des cas (Lewis, 1994, cité par Inserm, 2007) ou encore à des troubles de l'attention dans 26 % des cas (Gross-Tsur, Manor & Shalev, 1996, cité par Inserm, 2007). Ces données sont également à prendre en compte lors de la prise en charge de ces patients.

1.3 – Variabilité des profils

Aucun « profil type de dyscalculie » n'existe, chaque enfant est singulier ainsi que ses troubles. Des auteurs ont donc tenté de classifier les difficultés numériques selon le type de traitements impliqués. L'exploration de ces classifications est pertinente afin d'examiner le type de difficultés relevées, et d'examiner ce qu'il en est du domaine visuo-spatial.

Dans une des classifications la plus connue, Temple (1992, cité par Inserm, 2007) se base sur la neuropsychologie cognitive de l'adulte, il distingue alors 3 sous-types de dyscalculies :

- Lié au « traitement numérique » : difficulté de traitement des symboles numériques avec principalement des difficultés de transcodage (lecture et écriture).
- Lié aux « faits numériques » : difficulté à rappeler des petits calculs stockés en mémoire.
- Lié à la procédure de calcul : difficulté à organiser et réaliser les différentes étapes pour la réalisation de calculs complexes écrits.

Dans cette classification, aucun élément ne fait explicitement référence aux habiletés visuo-spatiales. Cependant, dans une classification plus ancienne (Hécaen, Angelergues & Houillier, 1961, cité par Noël, 2009), les auteurs évoquent une « acalculie spatiale ».

Celle-ci se caractérise notamment par des difficultés spatiales au niveau de l'alignement ou de l'orientation des nombres ainsi qu'en géométrie. La notion de difficultés visuo-spatiales dans la dyscalculie a donc été évoquée relativement tôt en clinique mais n'a pourtant pas fait l'objet de recherches supplémentaires.

Actuellement, il n'existe pas de typologie de la dyscalculie car les profils cliniques sont très variés. Certains auteurs évoquent plutôt des difficultés primaires ou des difficultés secondaires (Mazeau & Pouhet, 2014). Dans les premières, il y aurait un développement atypique des capacités arithmétiques, sans autres difficultés apparentes. Alors que dans les secondes, la dyscalculie serait secondaire à une pathologie, tel qu'un syndrome ou un autre trouble cognitif (langagier, exécutif ou encore visuo-spatial par exemple). Finalement, même si des études antérieures mentionnent les difficultés visuo-spatiales dans la dyscalculie, elle n'a pas suffisamment et complètement fait l'objet de recherches et n'est pas considérée comme une difficulté systématiquement associée à la dyscalculie.

1.4 - Etiologie

Suite à la description des caractéristiques de la dyscalculie, il est maintenant nécessaire d'étudier les hypothèses étiologiques avancées dans la littérature afin de comprendre l'origine de ce trouble. Plusieurs hypothèses ont été avancées : génétique, neurobiologique et fonctionnelle. Nous accorderons plus d'intérêt à cette dernière dans laquelle certains auteurs examinent plus particulièrement le domaine visuo-spatial.

Les hypothèses décrites ci-dessous sont exposées indépendamment les unes des autres, mais elles peuvent co-exister de manière plus ou moins importante chez un même patient dyscalculique.

1.4.1 Génétique

Une première hypothèse serait d'origine génétique.

En effet, des auteurs ont constaté qu'un parent proche (au 1er degré) d'un enfant dyscalculique présentait également des difficultés en mathématiques, soit 10 fois plus que dans la population générale (Shalev et al. 2001).

Par ailleurs, l'hypothèse d'héritabilité de la dyscalculie a également fait l'objet de recherches auprès de jumeaux, dont l'un d'eux était diagnostiqué dyscalculique. Entre autres, Alarcon, De Fries, Light et Pennington (1997) ont constaté que 58 % des jumeaux monozygotes et 39 % des jumeaux dizygotes partageaient les difficultés d'apprentissage en mathématiques avec leur jumeau. Toutefois, les auteurs soulignent qu'il n'existe pas uniquement un facteur génétique, car 42% des jumeaux monozygotes restant ne partagent pas les mêmes difficultés. D'autres hypothèses ont donc été explorées.

1.4.2 Neurobiologique

Dans la littérature, d'autres études se sont intéressées à la possibilité d'un dysfonctionnement cérébral qui pourrait alors générer des difficultés mathématiques, avec notamment, une atteinte des sillons intra-pariétaux. En effet, l'une d'elle (Isaacs, Edmonds, Lucas & Gadian, 2001) montre qu'en IRM, une seule région distingue des adolescents avec des faiblesses numériques par rapport à des contrôles : le sillon intra-pariétal gauche. La poursuite des études dans ce domaine révèle que d'autres auteurs constatent que l'activation de cette région serait importante lors du traitement visuel et auditif des nombres (Eger, Sterzer, Russ, Giraud & Kleinschmidt, 2003), ou encore dans la réalisation de calculs. Reflétant ainsi le traitement de la magnitude numérique (Ansari, 2008).

Toutefois, Szucs et Goswami (2013) mettent en garde quant à l'interprétation de ces résultats, notamment concernant la méthodologie de ces études. D'autant que, d'autres études d'imagerie ne retrouvent pas l'atteinte de ce sillon. D'ailleurs, Arsalidou et Taylor (2011) soulignent l'implication de plusieurs cortex : préfrontal dorsolatéral, ventrolatéral, cingulaire antérieur, temporo-pariétal, occipito-ventral et le lobe temporal médial. Par exemple, le cortex préfrontal est souvent associé aux fonctions exécutives : mémoire de travail, inhibition, attention, qui sont des fonctions nécessaires dans des tâches numériques. Cette variabilité des aires cérébrales impliquées est plus cohérente avec la diversité des troubles cognitifs chez les dyscalculiques.

Enfin, nous relevons aussi que l'atteinte du sillon intra-parietal sus-mentionnée, pourrait aussi rendre compte du déficit d'autres processus cognitifs (également impliqués dans les habiletés mathématiques). En effet, il est impliqué dans la mémoire de travail (Dumontheil & Klingberg, 2011), dans l'attention de type alerte (Gliksman & Henik, 2019) ou encore dans le traitement de l'information spatiale (Yang, Han, Chui, Shen & Wu, 2012 ; cité dans Szucs & Goswami, 2013).

Ces diverses études soulignent l'implication d'un large réseau cérébral dans la réalisation de tâches numériques, d'autant que, nous verrons plus loin que la relation entre plusieurs processus est nécessaire dans cette réalisation (processus inhibiteur, mnésique, attentionnel, visuo-spatial).

1.4.3 Fonctionnelle

Dans cette hypothèse sont distingués les facteurs cognitifs dits généraux et ceux dits spécifiques au domaine numérique. Considérant l'absence de profil type de dyscalculie, il faut préciser que plusieurs de ces facteurs cognitifs peuvent se combiner chez un patient.

Dans les facteurs cognitifs généraux, les auteurs ont décrit différents troubles cognitifs comme étant potentiellement à l'origine des difficultés des dyscalculiques ; l'inhibition, les gnosies digitales, la mémoire de travail, l'attention ou encore les habiletés visuo-spatiales.

Les premiers (inhibition etgnosies digitales), seront abordés succinctement car ils ne font pas l'objet de cette étude. En revanche, la mémoire de travail et l'attention seront analysées de manière plus précise car ces compétences sont liées aux habiletés visuo-spatiales. Quant aux compétences visuo-spatiales elles-mêmes, elles seront abordées en détail dans la deuxième partie.

Dans les facteurs cognitifs spécifiques, la littérature aborde une difficulté spécifique aux troubles dyscalculiques, soit un déficit d'accès aux symboles numériques.

A) Facteurs cognitifs généraux

Gnosies digitales & Défaut d'inhibition et sensibilité à l'interférence

Les gnosies digitales désignent la capacité de percevoir l'environnement grâce au sens du toucher par les doigts et permettent notamment des apprentissages mathématiques (compter, calculer, dénombrer). Noël (2005) a montré que les gnosies digitales d'enfants étaient corrélées avec les compétences mathématiques et non celles en lecture. Ainsi, les gnosies sont un prédicteur spécifique au domaine numérique. De plus, l'entraînement des gnosies digitales chez des enfants de 1ère primaire a permis d'améliorer leurs compétences au niveau numérique : maîtrise de la chaîne numérique verbale et comptage (Gracia-Bafalluy & Noël, 2008).

Ces données mettent en évidence l'importance de l'utilisation des gnosies dans le développement des habiletés numériques.

Quant à l'inhibition, c'est une fonction exécutive permettant à un individu de s'empêcher de produire une réponse automatique ou encore d'écarter ou de supprimer une réponse non pertinente, qu'elle soit verbale ou motrice. En mathématiques, l'inhibition est liée à la récupération des faits arithmétiques (petits calculs, tel que $1+1$) en mémoire (pour lesquels il faut inhiber les réponses proches mais non pertinentes). L'interférence quant à elle, désigne le fait qu'une information récente vienne perturber la récupération d'une autre information.

Barouillet, Fayol et Lathuliere (1997) ont montré que des adolescents présentant des difficultés en mathématiques, possédaient également un défaut d'inhibition des réponses incorrectes. De plus, ils étaient aussi plus sensibles à l'interférence dans la résolution de multiplications. En effet, ils produisaient une réponse fautive et avaient tendance à choisir une réponse faisant partie du tableau d'une des opérandes.

Dans une étude similaire à la précédente, De Visscher et Noël (2014), émettent l'hypothèse qu'il n'y aurait pas tant un déficit d'inhibition chez ces patients mais plutôt une sensibilité plus élevée à l'interférence. Effectivement, ces auteurs démontrent que lorsque l'interférence est faible, les résultats des enfants de 4ème primaire (faibles vs bons en faits arithmétiques) sont identiques. Mais, lorsque l'interférence est importante, les enfants avec des difficultés en faits arithmétiques ont des performances largement inférieures.

De fait, l'atteinte des fonctions exécutives, notamment de l'inhibition (à l'origine d'une sensibilité plus importante à l'interférence) impacte négativement le développement des compétences numériques.

Mémoire de travail

La mémoire de travail, aussi appelée mémoire à court terme, est l'aptitude à stocker, maintenir et manipuler des informations de façon temporaire. La capacité de stockage de cette mémoire est de 7 (+/-2) informations chez un adulte et d'environ 3-4 informations chez un enfant. Cette fonction cognitive est indispensable pour les apprentissages scolaires et le développement cognitif de l'enfant et plus tard, de l'adulte. En mathématiques, la mémoire de travail permet de stocker temporairement les opérateurs et les faits numériques qui sont récupérés pour réaliser des opérations. Donc, l'hypothèse avancée est qu'une atteinte de la mémoire de travail aurait des conséquences négatives sur les habiletés arithmétiques.

Cette mémoire de travail s'avère primordiale dans la constitution des faits arithmétiques. Selon Geary (1990), la rétention des faits arithmétiques ne peut s'opérer que lors de la coactivation du problème et de sa réponse en mémoire de travail. Ainsi, l'utilisation de stratégies opératoires matures ainsi que la maîtrise de la chaîne numérique orale sont nécessaires. Or, les enfants dyscalculiques présentent des difficultés dans ces 3 domaines (Hitch & McAuley, 1991). Par conséquent, ils sont dans un cercle vicieux car ils ne peuvent retenir des faits arithmétiques, alors, ils multiplient les procédures de calculs, les empêchant de retenir les faits numériques.

D'autres auteurs ont approfondi l'aspect prédictif de la mémoire de travail sur les compétences mathématiques. Entre autres, De Smedt et al. (2009) ont mené une étude longitudinale dans laquelle ils ont comparé les performances d'enfants en mathématiques en 1ère puis en 2ème année de primaire, après les avoir entraînés sur des tâches de mémoire de travail (vs des enfants non entraînés). Les résultats montrent que les composants du modèle de la mémoire de travail de Baddeley sont impliqués (administrateur central, calepin visuo-spatial et boucle phonologique) et semblent prédire les compétences arithmétiques des enfants en 1ère et 2ème année.

Il ressort alors qu'une mémoire de travail fonctionnelle est nécessaire pour le développement des habiletés arithmétiques.

Cependant, le modèle théorique de Baddeley n'intègre pas suffisamment les processus mis en jeu dans la mémoire de travail. En effet, des recherches plus récentes conceptualisent la mémoire de travail dans un modèle intégratif comprenant l'interaction de 3 processus : les connaissances stockées en mémoire à long terme, un processus de traitement de l'ordre sériel de présentation des informations et un processus de traitement exécutif, attentionnel (Majerus, 2013). Dans ce cadre, une étude s'est penchée sur l'implication du processus de traitement sériel dans le développement numérique ultérieur (Majerus, Attout & Noël, 2014). Pour ce faire, les mêmes enfants ont été testés en 3ème maternelle, en 1ère et 2ème primaire. Les tâches utilisées évaluent la mémoire de travail via le traitement de l'information de type « ordre sériel » et le traitement de l'information de type « item », et des tâches sont aussi employées pour les mathématiques (jugement numérique et calculs). Les résultats révèlent que les compétences dans le traitement de type « ordre sériel » chez les enfants de 3ème maternelle prédisent les compétences ultérieures en mathématiques de ces mêmes enfants en 1ère et 2ème primaire. En outre, ce processus « ordre sériel » se révèle être un prédicteur beaucoup plus fiable des compétences en calcul, que le processus « item ». Par conséquent, un lien fort unit la capacité de réalisation de certaines tâches mathématiques au processus « sériel » de la mémoire de travail.

Ces résultats sont d'autant plus pertinents qu'en 2015, Attout et Majerus ont démontré que des enfants dyscalculiques âgés de 8 à 11 ans présentent des difficultés spécifiques de rétention des informations de type « ordre sériel ». Alors qu'ils n'en manifestent pas pour les informations de type « item ». Donc, les compétences de rétention de l'ordre sériel sont nécessaires dans le développement des habiletés numériques.

Enfin, dans une revue de la littérature récente, Majerus et Attout (2018) constatent 2 faits. D'abord, le processus sériel de la mémoire de travail serait amodal et permettrait l'encodage de plusieurs types d'informations ; verbale, non verbale ou encore, visuo-spatiale. Ensuite, il existerait une relation fonctionnelle entre le domaine numérique et l'aspect sériel de la mémoire de travail, avec l'existence d'un lien spécifique avec la capacité verbale de la mémoire de travail. Cette relation pourrait être expliquée par le fait que l'encodage d'informations séquentielles et temporaires soit important, afin de maintenir actif les différents nombres de l'opération et le résultat associé (rétention de faits arithmétiques), et ce, dans l'ordre dans lequel les données sont présentées.

Attention

Cette fonction cognitive entre en jeu dès que l'individu s'investit dans une activité cognitive. Dès lors, elle intervient inévitablement dans les tâches mathématiques mais, relativement peu d'études rendent compte du lien entre l'attention et le développement des capacités arithmétiques.

Anobile, Stievano et Burr (2013) se sont intéressés à la relation entre l'attention visuelle et la performance à des tâches mathématiques basiques (lecture/écriture de chiffres arabes) et non symboliques chez des enfants de 8-11 ans. Les résultats montrent une corrélation entre l'attention visuelle et les performances en mathématiques ; si les capacités attentionnelles sont faibles, alors elles impactent négativement les performances mathématiques. Par conséquent, une atteinte de l'attention serait impliquée dans un trouble tel que la dyscalculie.

D'autres auteurs ont donc poursuivi ces recherches en évaluant des étudiants atteints de « dyscalculie pure » (sans trouble attentionnel) et des étudiants contrôles, avec des tâches attentionnelles et mathématiques (Askenazi & Henik, 2010). Les résultats indiquent un déficit au niveau de l'attention de type « alerte » chez les étudiants dyscalculiques (l'état d'alerte désigne une attitude d'attention intense, de vigilance accrue, généralement sur une courte durée, faisant suite à un signal avertisseur ou une consigne). En revanche et contrairement à l'étude précédente, aucune différence de performance au niveau de l'orientation de l'attention ne se manifeste.

Des auteurs souhaitent alors vérifier l'implication de l'attention « alerte » chez les adultes dyscalculiques (Gliksman & Henik, 2019). Pour ce faire, ils explorent un processus numérique : le subitizing (désigne la capacité de quantifier très rapidement de petits ensembles de 3-4 éléments) et teste si celui-ci peut être amélioré en engageant l'attention de type « alerte » chez des dyscalculiques par rapport à des contrôles. Les résultats révèlent que l'attention des personnes atteintes de dyscalculie est effectivement plus engagée avec le signal d'alerte mais cela n'impacte pas leurs performances mathématiques (ici, la précision dans la réponse du subitizing).

Finalement, les difficultés attentionnelles semblent apparaître indépendamment de la présence d'un trouble numérique, comme énoncé précédemment, il y a souvent une comorbidité des troubles (dyscalculie – trouble de l'attention). Toutefois, la présence d'une atteinte spécifique de l'attention « alerte » semble présente chez les dyscalculiques. L'influence de l'attention spatiale sur les aptitudes mathématiques sera développée dans la deuxième section de cette partie théorique.

Capacités visuo-spatiales

Les habiletés spatiales regroupent toute une série de capacités ; visuo-perceptive, visuo-spatiale, visuo-constructive, mémoire de travail visuo-spatiale, attention visuo-spatiale. Lorsque celles-ci sont atteintes, elles impactent négativement les compétences mathématiques. De plus, ces habiletés soutiennent le développement de compétences numériques avec le développement de capacité telle que la ligne numérique mentale. Cette partie sera analysée en détail dans le 2ème section théorique.

B) Facteurs cognitifs spécifiques au domaine numérique

Après les facteurs cognitifs généraux pouvant intervenir dans la dyscalculie, considérons les facteurs cognitifs plus spécifiques qui sous tendraient un déficit purement numérique.

D'abord, des auteurs se sont questionnés sur la possibilité d'un déficit de représentation de la magnitude chez des dyscalculiques. Landerl, Bevan et Butterworth (2004) évaluent des enfants contrôles, dyslexiques, dyscalculiques et ayant le double déficit en proposant plusieurs tâches afin de mesurer les compétences mathématiques. Les résultats révèlent que les enfants dyscalculiques ou à double déficit présentent une lenteur dans les tâches de lecture de nombres arabes à 1 ou 2 chiffres, en comparaison de nombres arabes, en comptage et en énumération de points. Ainsi, l'hypothèse d'une atteinte de la représentation de la magnitude se confirme.

Cependant, les tâches présentées impliquent la manipulation de symboles numériques (nombres arabes), or, les difficultés peuvent provenir de l'utilisation de ces symboles. C'est pourquoi, Rousselle et Noël (2007) ont reproduit le même schéma d'étude (même population) avec une tâche de comparaison de symboles numériques et une tâche de comparaison de collections non numériques. Les auteurs ont comparé les résultats des participants pour les symboles numériques vs non numériques et constatent que dans une tâche à symboles numériques, les dyscalculiques sont toujours plus lents que les contrôles. En revanche, pour les symboles non numériques, aucune différence significative entre les deux groupes n'est relevée. Donc, les difficultés des dyscalculiques ne proviennent non pas d'un problème d'accès à la magnitude mais d'un problème d'accès au symbole (déficit de compréhension des nombres arabes). Des résultats identiques sont également reproduits dans la méta-analyse de Schwenk et al. (2017). Elle reprend plusieurs études comparant des enfants avec et sans difficultés mathématiques dans des tâches de comparaison de magnitude symbolique et non symbolique. Les auteurs démontrent effectivement que les enfant à difficultés mathématiques sont plus lents pour les tâches symboliques que non symboliques.

1.5 – Résumé

En conclusion, la dyscalculie se définit comme un trouble des apprentissages caractérisé par des difficultés dans la réalisation de diverses tâches arithmétiques. L'étiologie de ce trouble fait l'objet de nombreuses recherches, celles-ci mettent en avant des facteurs génétiques et neurobiologiques probables. La dyscalculie peut aussi résulter d'un déficit numérique de base, notamment une difficulté de compréhension des symboles, des nombres arabes. Ou encore, elle peut également être la conséquence d'un déficit cognitif général tel qu'un déficit de la mémoire de travail (principalement au niveau du processus de rétention sérielle), de l'attention, des compétences visuo-spatiales, des gnosies digitales ou encore une sensibilité plus importante à l'interférence. Ces multiples hypothèses étiologiques ne s'excluent pas mutuellement. Ainsi, une telle variabilité de l'origine du trouble implique qu'aucun profil n'est identique dans la dyscalculie.

Dans le cadre de notre travail, les premiers facteurs cognitifs soulèvent notre intérêt (mémoire de travail et attention) car, nous démontrerons qu'au delà de leur lien avec l'arithmétique, ils sont également liés aux compétences visuo-spatiales. Ainsi, une relation entre habiletés arithmétiques et visuo-spatiales pourra être établie. De plus, nous analyserons en détail comment les compétences visuo-spatiales peuvent intervenir dans le développement numérique.

2 – Les capacités visuo-spatiales

Cette seconde partie définit et décrit les diverses caractéristiques des compétences visuo-spatiales. Puis, sera abordé ce qui lie ces compétences aux mathématiques, notamment à travers différents processus (ligne numérique, mémoire de travail et attention). Enfin, l'influence des habiletés visuo-spatiales sur les capacités numériques sera examinée, d'abord chez des personnes atteintes de syndromes divers, puis chez des personnes n'ayant pas de fragilité neurologique ou génétique.

2.1 – Définition et exploration

Les compétences visuo-spatiales peuvent être définies comme des fonctions mentales permettant de localiser et d'orienter des objets ou nos actions et mouvements. Elles servent aussi à situer les objets les uns par rapport aux autres, par rapport à soi dans l'environnement ou encore à effectuer des manipulations mentales de rotation, de perspectives des objets environnants.

Signifiant ainsi, que si nos compétences visuo-spatiales dysfonctionnent, la réalisation de ces tâches peut s'avérer difficile au quotidien.

Les habiletés visuo-spatiales se catégorisent de la manière suivante :

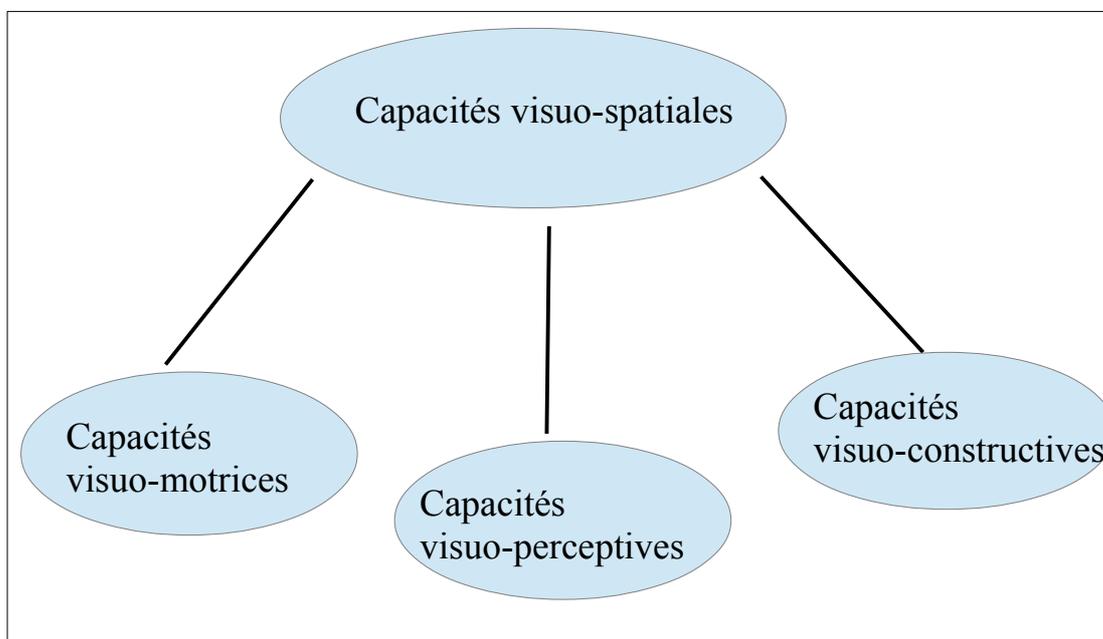


Figure 1 : Schéma de la représentation des habiletés visuo-spatiales.

Les processus en jeu dans ces différentes compétences se nuancent selon les différences suivantes :

- Les habiletés visuo-motrices représentent la coordination entre les processus visuels et moteurs. S'il y a des difficultés en terme de coordination visuo-motrice, un impact négatif sur les compétences visuo-spatiales en découle (Barisnikov & Pizzo, 2007).
- Les processus visuo-perceptifs, quant à eux, permettent « le traitement et la reconnaissance des éléments visuels » (Schmetz & Rousselle, 2016) et se partagent en 2 niveaux d'analyses ; d'abord perceptifs puis associatifs. Le premier concerne une reconnaissance visuelle de l'objet et le second une dénomination de l'objet (Barisnikov & Pizzo, 2007).
- Les processus visuo-constructifs permettent la réalisation de figures en 2 ou 3 dimensions, avec ou sans modèle, en combinant des éléments pour former un tout. Ces processus nécessitent une étape perceptive d'intégration des informations visuelles et une étape motrice.

Les capacités visuo-spatiales se révèlent multiples, d'où la complexité de les classifier. En effet, dans la littérature, les premières définitions présentaient une approche psychométrique, c'est-à-dire qu'elles employaient les tests visuo-spatiaux – inclus au sein des tests d'intelligence –. Mais, ces tests manquaient d'appuis théoriques et n'ont pas permis une classification. Alors, Uttal et al. (2013) ont proposé une classification basée sur une autre approche ; linguistique, cognitive et neuroscientifique. D'une part, ils distinguent les informations spatiales intrinsèques et extrinsèques ; les premières favorisent une représentation de l'objet (forme, taille, couleur) alors que les secondes permettent de situer les objets les uns par rapport aux autres dans l'espace. D'autre part, ils différencient les tâches statiques des dynamiques, référant à la possibilité d'impliquer ou non un mouvement (pliage, coupage, pivotement de figures). Par ailleurs, Höffler (2010) insiste sur l'importance des capacités spatiales dans l'apprentissage utilisant la visualisation, constatant que les individus à capacités visuo-spatiales élevées obtiennent de meilleures performances que ceux à faibles capacités car ils s'appuient sur la visualisation dynamique.

Puisque ces habiletés intègrent de multiples fonctions, l'évaluation se doit d'être également variée, afin d'investiguer tous les processus impliqués. Ainsi, les tâches employées peuvent être les suivantes : localisation, orientation, attention spatiale, mémoire de travail visuo-spatiale, rotation mentale, compréhension de relation entre les objets, copie ou reconstruction d'un modèle (Newcombe & Ratcliff, 1989, cité par Barisnikov & Pizzo, 2007).

Certaines permettent de rendre compte des processus extrinsèques et statiques, telle la localisation, soit la capacité à identifier la position d'un élément dans l'espace. Ou encore, la compréhension de la relation entre les objets, qui repose sur la perception spatiale des objets les uns par rapport aux autres.

D'autres, comme l'orientation spatiale, évalue plutôt les processus extrinsèques et dynamiques puisqu'elle désigne la capacité du sujet à s'imaginer (ou à imaginer un objet) dans différentes perspectives (Hegarty & Waller, 2005, cité par Höfller, 2010).

La rotation mentale, quant à elle, consiste en la capacité à effectuer mentalement des rotations sur un objet/une figure en 2 ou 3 dimensions, permettant ainsi de le comparer à une référence. Cette tâche implique des processus intrinsèques et dynamiques.

Dans les épreuves de copies ou de reconstruction de modèle, le participant doit dessiner ou construire une figure à partir d'un modèle (ou sans celui-ci, mais dans ce cas, la mémoire intervient). Ces tâches impliquent des processus à la fois intrinsèques (analyse de la taille, forme, couleur) et extrinsèques (position des éléments dans l'espace). De plus, elles impliquent un processus dynamique par des mouvements de rotation des objets ou d'orientation du dessin.

Concernant la mémoire de travail visuo-spatiale, elle contribue à la rétention d'informations visuo-spatiales de façon temporaire, elle peut se diviser en 2 processus : séquentiel et simultané.

L'attention spatiale, quant à elle, se définit comme étant l'orientation de l'attention vers un élément extérieur.

Au niveau neurologique, les processus visuo-spatiaux et perceptifs sont traités de deux manières ; par une voie dorsale, spécialisée dans l'analyse visuo-spatiale (« où » est l'objet) et par une voie ventrale, spécialisée dans l'analyse visuo-perceptive (« comment » est l'objet). Ces deux systèmes doivent être intègres afin d'encoder correctement les informations sensorielles pour ensuite agir sur l'environnement de manière adéquate. D'ailleurs, la revue de Schmetz et Rousselle (2016) met en évidence l'importance des aptitudes visuo-perceptives sur les compétences visuo-spatiales.

2.2 - Les compétences visuo-spatiales liées aux compétences mathématiques.

De plus en plus d'études s'intéressent au lien unissant les habiletés numériques et visuo-spatiales. Cette partie permettra d'explorer ce que la littérature relate à ce sujet.

Dans certains exercices – notamment scolaires – ces deux notions sont indissociables : en géométrie ou encore pour poser des calculs écrits. Toutefois, bien avant l'apprentissage de ces notions, des éléments spatiaux se combinent au développement numérique, et ce, dès l'apprentissage des nombres : compter sur ses doigts ou encore placer les nombres sur une ligne numérique. Les compétences spatiales seraient même à la base du développement des capacités numériques de l'enfant puisque des études montrent qu'un codage spatialisé des nombres permettrait de les placer les uns par rapport aux autres. Dès lors, un lien est établi entre ces deux compétences (arithmétique et visuo-spatiale).

Nous aborderons également la mémoire de travail et l'attention spatiale car ces deux compétences apparaissent également liées aux mathématiques. Comme démontré précédemment, la spécificité de cette mémoire est la rétention d'éléments spatialisés, également utilisée en géométrie ou en copie de figure. Quant à l'attention spatiale, elle permettrait à l'enfant d'orienter son attention vers les éléments qui l'intéressent ; chercher un nombre-cible au bon endroit sur la ligne numérique par exemple.

2.2.1 Représentation visuo-spatiale de la magnitude.

Des auteurs se sont penchés sur les compétences mathématiques pour expliquer comment certains bénéficient de meilleurs aptitudes que d'autres. Ainsi, les compétences numériques supérieures ont été analysées afin d'examiner une éventuelle dépendance avec les compétences numériques de base (Sella, Sader, Lolliot & Kadosch, 2016). Pour ce faire, ils ont testé des individus d'un niveau élevé, doctorant en mathématiques, et d'autres d'un niveau plus « commun », doctorants en sciences humaines. Plusieurs tâches arithmétiques furent soumises ; une simple où doit être placé un nombre, positif ou négatif, sur une droite numérique et une, plus exigeante, soit répondre à des opérations complexes dans un temps imparti. Ajouté à ces 2 premières tâches arithmétiques, était proposé un tangram afin d'estimer les habiletés spatiales. Une corrélation est avérée entre la tâche d'estimation et les compétences mathématiques supérieures ; les doctorants en mathématiques sont significativement plus précis dans le placement des nombres positifs. Par conséquent, il existe une corrélation entre les compétences mathématiques basiques, telle que l'estimation numérique et le développement de compétences élevées en arithmétique.

Par ailleurs, les performances des participants deviennent similaires à la tâche d'estimation numérique lorsque les scores obtenus à la tâche visuo-spatiale sont pris en compte. Ainsi, les performances à la tâche d'estimation numérique seraient causées par les compétences spatiales des participants. Dans cette étude, les doctorants en mathématiques présentent en moyenne des performances spatiale supérieures.

Ces premières données démontrent la relation existante entre les habiletés spatiales et numériques. Plus important encore, ces données suggèrent que les compétences spatiales sont nécessaires au développement numérique de base chez l'enfant.

D'autres chercheurs ont également sondé la représentation de la magnitude (capacité à reconnaître la quantité à laquelle réfère les nombres et à les discriminer). Dehaene, Bossini et Giroux (1993) ont constaté que les participants répondaient plus rapidement avec leur main gauche pour les petits nombres et avec leur main droite pour les grands nombres. Ces données sont interprétées comme étant une preuve de la nature spatiale de la représentation de la magnitude. Elle est représentée le long d'une ligne numérique invisible, comportant les petits nombres dans l'espace gauche et les grands nombres dans l'espace droit. Cette abstraction numérique est appelé l'effet SNARC (Spatial Numerical Association of Response Code).

Ce principe a encouragé d'autres recherches concernant l'existence de la spatialisation de cette droite numérique. Ainsi, l'étude de certaines pathologies, comme l'hémi-négligence spatiale (patients délaissant les stimuli présentés soit à droite, soit à gauche suite à une lésion cérébrale) permettant l'observation systématique d'erreurs lorsque les patients doivent couper une ligne physique en deux, ou trouver le milieu d'une suite numérique (Zorzi, Priftis & Umiltà, 2002). Cette donnée conforte le postulat que la représentation de la magnitude est spatiale dans la mesure où ces patients négligent une portion de cette ligne abstraite (soit le côté gauche, soit le droit).

Par ailleurs, d'autres études ont développé deux propriétés spatiales à cette magnitude : l'orientation et l'échelle.

L'orientation correspond au sens de lecture. Dans la culture occidentale, le sens de cette ligne numérique correspond à celui de la lecture classique ; de gauche à droite. Alors que dans la culture arabe, c'est de droite à gauche. Cependant certains auteurs émettent l'hypothèse que cette spatialisation des nombres de gauche à droite ne tient pas uniquement à la culture (De Hevia, Veggiotti, Steri & Bonn, 2017). Ils testent des nouveau-nés en leur faisant écouter des syllabes (6 vs 18) tout en leur montrant des lignes de tailles différentes à gauche et à droite d'un écran.

Ils constatent que les nourrissons fixent la ligne du côté gauche lorsqu'ils entendent 6 syllabes, et celle du côté droit lorsqu'ils en entendent 18. L'origine culturelle ne serait pas le facteur interférant dans l'orientation de la ligne numérique ; dès la naissance, la représentation des quantités serait spatialisée, avec les petites quantités à gauche et les grandes quantités à droite.

Ensuite, l'échelle est la deuxième propriété spatiale de cette ligne numérique. Elle correspond à la distance séparant les nombres sur la ligne numérique mentale. Chez l'enfant, la représentation des nombres sur la ligne numérique est d'abord « logarithmique », signifiant que plus on avance dans la chaîne numérique, plus les nombres sont comprimés. Tandis que, chez l'adulte, la représentation des nombres sur cette ligne numérique, est dite « linéaire » : les intervalles spatiaux entre les nombres sont égaux (Booth & Siegler, 2006 ; Siegler & Booth, 2004).

Cette organisation spatiale de la droite numérique est mise en évidence par la présence de deux effets : l'effet de distance et l'effet de taille. Selon l'effet de distance, plus la distance séparant 2 quantités est grande, plus elles seront faciles et rapides à comparer (2 vs 10 est plus facile à comparer que 10 vs 11). Selon l'effet de taille, les quantités seront plus rapidement comparées si elles sont petites que si elles sont grandes (comparer 3 vs 6 est plus simple que comparer 26 vs 29).

Ces données mettent en lumière le lien entre une compétence mathématique (le jugement de magnitude) et les compétences visuo-spatiales ; les nombres sont spatialement codés le long d'une ligne numérique mentale.

Chez les enfants, cette représentation logarithmique est également visible dans des tâches où ils doivent placer un nombre. Siegler et Opfer (2003) ont proposé une tâche d'estimation numérique à des enfants de primaire (2ème, 4ème et 6ème primaire) et des adultes ; les participants placent un nombre donné sur une ligne numérique allant de 0 à 100 ou de 0 à 1000. Une progression dans la représentation et l'emploi de la ligne numérique mentale se confirme : les enfants de 2ème et de 4ème primaire sont moins précis que les enfants de 6ème primaire et les adultes dans leurs estimations. Les premiers font appel à une représentation logarithmique alors que les seconds, à une représentation linéaire.

De plus, plus les intervalles proposés sont grands, plus les participants feront appel à une représentation logarithmique. Par exemple, des enfants de 5-6 ans donneront des estimations typiques d'une représentation logarithmique pour des lignes allant de 0 à 100. Alors que des enfants de 7-8 ans, donneront des estimations correspondant à une représentation linéaire. Et, ces mêmes enfants (7-8 ans) auront une représentation logarithmique d'une ligne allant de 0 à 1000 alors que des enfants de 9-10 ans en auront une représentation linéaire (Booth & Siegler, 2006 ; Siegler & Booth, 2004).

Ces nombreuses expérimentations établissent une relation entre les habiletés spatiales et numériques. De plus, le degré de précision de cette droite numérique est déterminée par un raisonnement mathématique élevé. Effectivement, une corrélation existe entre la tâche d'estimation numérique et les compétences mathématiques (Schneider, et al. 2018).

2.2.2 La mémoire visuo-spatiale

Précédemment, nous avons énoncé que la mémoire de travail est liée aux performances mathématiques, notamment via l'étude d'enfants dyscalculiques montrant une altération de la rétention d'informations « sérielles » par rapport aux informations « items ». Toutefois, la littérature actuelle met de plus en plus l'accent sur un autre processus sous-jacent : le processus visuo-spatial. En effet, des études avancent des troubles spécifiques de la mémoire de travail visuo-spatiale chez les jeunes dyscalculiques.

Plusieurs modèles ont été proposés pour décrire le fonctionnement de cette mémoire visuo-spatiale. Précédemment, Uttal et al. (2013) ont distingué les tâches statiques et dynamiques. Ce constat peut être mis en lien avec le modèle de Cornoldi et Vecchi (2003, cité par Mammarella, Pazzaglia & Cornoldi, 2008), qui dégage un facteur visuel, permettant le stockage d'informations visuelles (couleur, forme, texture des objets) et un facteur spatial, permettant le stockage d'informations spatiales simultanées (tâche statique) ou séquentielles (tâche dynamique). Ces deux types de tâches nécessitent la mémorisation d'éléments visuels mais dans la séquentielle ; les éléments sont présentés en séquence, avec pour objectif de rappeler la position correcte du stimulus tout en tenant compte de l'ordre dans lequel il a été présenté. Alors que dans la simultanée, tous les éléments sont présentés simultanément, le but étant d'en mémoriser la position afin de rappeler le positionnement correct de chacun des éléments (Mammarella et al. 2006).

L'étude de cette mémoire de travail a fait l'objet de diverses recherches concernant le lien qu'elle entretient avec les mathématiques. Szucs, Devine, Soltesz, Nobes et Gabriel (2013) ont examiné diverses compétences (mémoire de travail, mémoire de travail visuo-spatiale, inhibition, attention et représentation de la magnitude) chez des enfants de 9-10 ans. Ils constatent une atteinte importante de la mémoire de travail, de la mémoire de travail visuo-spatiale ainsi que des difficultés d'inhibition -notamment liées à l'interférence- chez les enfants ayant une dyscalculie développementale, comparés aux enfants sans troubles. Donc, la mémoire de travail visuo-spatiale intervient de façon conséquente dans les difficultés arithmétiques des enfants dyscalculiques.

Dans une étude plus récente, Mammarella, Caviola, Giofrè et Szucs (2018) montrent que les enfants dyscalculiques ou à faibles capacités mathématiques présentent une faiblesse de la mémoire de travail visuo-spatiale séquentielle et simultanée, comparé à des enfants contrôles. Bien qu'aucune difficulté visuelle n'ait été relevée chez ces enfants. Ces recherches confirment un déficit du composant visuo-spatial de la mémoire de travail chez des enfants ayant des difficultés mathématiques mais une intelligence verbale normale.

Par ailleurs, la présentation de la tâche impacte la mémorisation des informations, donc dans les performances de rappel. En effet, chez des participants de tout âge et sans difficulté particulière, la présentation structurée de stimuli permet une meilleure rétention des informations, qu'une présentation non structurée (Imbo, Szmalec & Vandierendock, 2009). Selon les auteurs, cette différence entre les performances à ces deux types de tâches peut révéler l'implication des connaissances en mémoire à long terme visuo-spatiale sur la rétention d'informations structurées, plus familières. En d'autres termes, les informations présentées de manière structurée vont faire écho à des éléments connus, ainsi, la mémorisation sera plus aisée.

Pour ce qui est de la mémoire à long terme visuo-spatiale, De Visscher, Szmalec, Van der Linden et Noël (2015) ont émis l'hypothèse d'un déficit de l'apprentissage de l'ordre sériel chez des adultes atteints de dyscalculie. Pour la tester, ils ont utilisé une tâche d'apprentissage de type « Hebb » (n'impliquant pas le traitement de la magnitude). Ce qu'on appelle « le paradigme de Hebb » est un apprentissage implicite survenu suite à la présentation répétée d'une stimulation, qui est entre-coupée d'autres stimulations non-répétées. Suite à ce type de tâche, il est habituellement admis que le participant s'améliore dans le rappel de la stimulation répétée alors qu'il ne s'améliore pas dans le rappel des stimulations non répétées. Dans leur recherche, ce paradigme est mis en place via une tâche de stimulation verbale : la présentation de syllabes. Le participant voit apparaître des séries de 9 syllabes et, il ne sait pas que 2 d'entre-elles reviennent plusieurs fois. Le participant doit ensuite rappeler les syllabes. Les résultats mettent en évidence que les personnes atteintes de dyscalculie montrent plus de difficultés dans la rétention d'informations de type ordre, ainsi, leur apprentissage serait plus lent que les participants contrôles.

Peu d'études se sont concentrées sur l'apprentissage d'informations visuo-spatiales. Cependant, des chercheurs ont constaté que le paradigme de Hebb était reproductible dans d'autres modalités ; pour des séquences visuelles mais surtout pour des séquences spatiales (Couture & Tremblay, 2006).

2.2.3 L'attention visuo-spatiale

L'attention est une fonction impliquée dans les habiletés mathématiques. Dans cette section, il reste à approfondir l'impact des nombres sur le déplacement de l'attention -via le foyer attentionnel, il désigne le déplacement du regard dans le champ visuel, sans mouvement de la tête- dans l'espace afin d'analyser plus finement la relation entre l'attention visuo-spatiale et les compétences numériques.

Fischer, Castel, Dodd et Pratt (2003) ont examiné si la présentation préalable d'un chiffre à une détection de points influence la vitesse de déplacement du foyer attentionnel. Effectivement, un petit nombre rend le déplacement du foyer attentionnel plus rapide vers la gauche, tandis qu'un grand nombre vers la droite. Cette étude conforte la théorie précédente sur la ligne numérique mentale avec une spatialisation des nombres de gauche à droite, et elle implique également que le déplacement de l'attention dans l'espace est lié aux nombres.

Plus récemment, Salvaggio, Masson et Andres (2019) investissent le mouvement du regard, via un appareil de poursuite oculaire, durant une tâche de comparaison à un standard chez des enfants d'âge scolaire. La comparaison se déroule oralement ; les enfants entendent les nombres dans un casque audio et déterminent oralement si le nombre entendu est plus grand ou plus petit que la référence. L'expérience se découpe en 2 sous-expériences ; dans la première, les participants donnent leur réponse en fixant un écran « vide » alors que dans la deuxième, ils fixent un écran « paysage ». L'idée consiste à stimuler les mouvements oculaires avec des éléments visuels plus riches. Les résultats de ces nouvelles expériences confirment le postulat précédent, à savoir qu'il existe une interaction entre la manipulation numérique (ici, en discrimination) et l'attention visuo-spatiale car les petits nombres sont associés à l'espace gauche et les grands nombres à l'espace droit, par rapport à la référence. De plus, la poursuite oculaire montre également qu'en plus d'être spatialisés sur une ligne horizontale, les nombres sont également spatialisés verticalement ; les petits nombres induiraient un mouvement oculaire vers le bas. Une corrélation entre le déplacement visuel horizontal et vertical est mise en évidence, signifiant ainsi que notre représentation des nombres serait bidimensionnelle.

En outre, ils témoignent, pour la première fois, que lors d'une comparaison de nombres éloignés de la référence, le déplacement oculaire s'opère avant même que le participant ne réponde. En effet, le traitement de la dizaine permet de déterminer rapidement si la cible est plus grande ou non que la référence. Toutefois, les participants sont plus lents à discriminer les nombres proches de la référence. Ces données sont en accord avec les effets de taille et de distance énoncés précédemment.

Ainsi, ces études soulignent l'existence d'un lien entre les habiletés numériques et l'orientation de l'attention spatiale.

2.3 L'influence des habiletés visuo-spatiales sur les compétences mathématiques

C'est indiscutable, les habiletés visuo-spatiales sont impliquées dans la réalisation de tâches mathématiques, notamment via la ligne numérique mentale, la mémoire de travail visuo-spatiale et l'attention spatiale.

Nous allons maintenant examiner l'impact des faibles capacités visuo-spatiales sur les performances mathématiques. D'abord à travers l'étude de patients chez qui les difficultés sont secondaires à un syndrome génétique car, dans plusieurs de ces syndromes, il existe une dissociation entre le domaine numérique/visuo-spatial et le domaine langagier. Puis, chez des personnes présentant un profil où les difficultés arithmétiques sont au premier plan, sans réelle cause neurobiologique. Enfin, il est également nécessaire d'analyser la littérature témoignant de l'aspect prédicteur des habiletés visuo-spatiales sur les compétences mathématiques.

2.3.1 Les syndromes génétiques

Dans la littérature, plusieurs syndromes génétiques sont documentés et connus pour la dissociation qu'ils présentent ; les capacités langagières sont meilleures que les capacités visuo-spatiales. Cette spécificité est effectivement constatée dans le syndrome de Williams (Bellugi, Korenberg & Klima, 2001), trouble génétique rare provoquant une malformation cardiaque et fréquemment associé à un retard moteur, à des spécificités cognitives et comportementales. Cette dissociation est également retrouvée dans le syndrome de Turner (Hong, Kent & Kesler, 2009), anomalie chromosomique affectant le chromosome sexuelle (X) chez la femme. Cette caractéristique est aussi reconnue dans le syndrome vélo-cardio-facial (Sobin et al. 2005), affection congénitale pouvant entraîner des troubles cardiaques, une malformation faciale, laryngée et des troubles des apprentissages.

En plus d'une difficulté au niveau visuo-spatial, on retrouve également dans ces syndromes des compétences numériques plus faibles (Rousselle, 2011). Cette observation se révèle aussi en faveur d'un lien entre les habiletés visuo-spatiales et mathématiques car, dans ces syndromes, ces deux compétences sont déficitaires alors que le langage ne l'est pas.

Attout, Noël, Vossius et Rousselle, (2017) ont alors voulu tester l'influence du traitement visuo-spatial sur la représentation de la magnitude chez des patients atteints du syndrome 22q11 (vélo-cardio-facial). Les auteurs ont comparé des patients atteints de ce syndrome avec deux groupes contrôles ; l'un apparié au niveau du quotient intellectuel (QI) verbal et l'autre apparié au niveau du QI non verbal. Ils ont passés des tests évaluant la magnitude avec des tâches numériques et non numériques , au sein desquels les aspects visuo-spatiaux ont été contrôlés en proposant des items visuels (faisant appel aux habiletés visuo-spatiales) et auditifs (n'y faisant pas appel). Les participants 22q11 manifestent des difficultés dans des tâches de traitement des quantités qui demandent une manipulation visuo-spatiale et ce, indépendamment de la modalité (numérique ou non numérique). Alors qu'aucune difficulté n'est décelée dans le traitement de quantité n'impliquant pas un traitement visuo-spatial. Autrement dit, ces patients ne présentent des difficultés de traitement des quantités que lorsque le domaine visuo-spatial est impliqué.

Cette étude confirme donc le postulat : les habiletés visuo-spatiales sont requises pour le développement des compétences mathématiques.

2.3.2 L'influence des compétences visuo-spatiales sur les habiletés arithmétiques

S'appuyant sur le constat de l'influence des compétences visuo-spatiales sur les habiletés mathématiques chez les individus porteur d'un syndrome, des chercheurs ont étudié si ce même bilan concernait également des individus non porteurs d'un syndrome génétique. L'objectif étant de vérifier si effectivement de pauvres habiletés visuo-spatiales affectent le développement de la cognition numérique.

Une première étude de Bachot, Gevers, Fias et Roeyers (2005) a été réalisée pour examiner le développement de la représentation mentale de la magnitude numérique chez des enfants de 7-12 ans ayant des faiblesses visuo-spatiales et mathématiques, comparés à des enfants sans difficultés. Pour ce faire, les auteurs testent l'effet SNARC de ces jeunes avec une tâche de comparaison à un standard. Les analyses attestent la présence de l'effet SNARC chez les participants contrôles mais, cet effet est absent chez les enfants avec fragilités visuo-spatiales et mathématiques. De faibles capacités numériques et visuo-spatiales peuvent donc entraver le développement de la représentation de la magnitude numérique.

Dans le même objectif, Crollen et Noël (2015) ont également expérimenté l'incidence de faiblesses visuo-spatiales sur le traitement numérique en confrontant les performances d'enfants à faiblesses visuo-spatiales et celles d'enfants à compétences visuo-spatiales correctes.

Globalement, les premiers sont moins performants dans les tâches numériques (comme la comparaison numérique, l'estimation numérique). Néanmoins, les auteurs ne rapportent pas de différence entre les deux groupes concernant l'effet SNARC. Ces résultats contredisent ceux de Bachot et al. (2005) mais, contrairement à eux, les enfants ne sont pas testés au niveau mathématiques. Par conséquent, il serait possible d'imputer les difficultés de représentation de la magnitude à des faiblesses mathématiques plutôt que visuo-spatiales. Davantage de recherches sont nécessaires pour le confirmer.

Par ailleurs, plus récemment, McCaskey, von Aster, O'Gorman Tuura et Kucian (2017), explorent les performances d'adolescents dyscalculiques dans des tâches visuo-spatiales et numériques ; il faut noter ici qu'ils mesurent séparément les capacités visuo-perceptives, visuo-cognitives et visuo-constructives. Au niveau visuo-perceptif, plusieurs tâches sont proposées ; le test Birmingham de reconnaissance d'objets (BORB) ainsi que 3 tâches informatisées testant la perception de longueur (quelle ligne est la plus longue parmi 2), de taille (quel point est le plus gros parmi 2) et l'estimation de la position (observer si l'écart entre 2 figures est le même). Pour tester le visuo-cognitif, une tâche de « constance des formes » est proposée ; les participants doivent retrouver une figure cible parmi 6 éléments (2 réponses sont correctes). Dans les figures proposées, ils incluent des distracteurs, modulés au niveau de la taille (plus grand, plus petit), de la position (pivotée ou non). Puis une tâche de pliage est également soumise pour évaluer le visuo-cognitif ; les participants doivent trouver la forme correcte du papier une fois déplié, avec des réponses à choix multiples. Enfin, pour le visuo-constructif, sont proposés une tâche de copie de dessin (en 2 puis 3 dimensions) et un exercice de construction de figures avec modèle en 3 dimensions à l'aide de cubes.

Les résultats confirment que les participants dyscalculiques présentent des performances moins élevées dans les tâches visuo-cognitives et visuo-constructives, par rapport aux contrôles. Cependant, leurs capacités visuo-perceptives sont identiques dans les deux groupes.

Ces différentes études, attestent que des habiletés visuo-spatiales fragiles influencent la réalisation des tâches mathématiques, en particulier lorsque ces tâches impliquent des compétences visuo-cognitives et visuo-constructives. Cependant, les capacités visuo-perceptives seraient épargnées ; ce type de compétence fait en effet uniquement appel à des habiletés visuelles, donc liées aux sens plutôt qu'aux compétences spatiales, liées à la localisation et la manipulation.

2.3.3 Les habiletés visuo-spatiales : prédicteur des compétences mathématiques ?

Considérant cette interaction entre les compétences visuo-spatiales et mathématiques, quelques chercheurs se sont questionnés sur l'aspect prédicteur des habiletés visuo-spatiales sur les mathématiques.

Ainsi, Thompson, Nuerk, Moeller et Kadosh (2013) examinent le lien entre les capacités de rotation mentale et les représentations numériques de base (représentation mentale de la magnitude). Des étudiants d'une vingtaine d'année sont évalués sur une tâche de rotation mentale et 3 tâches numériques : comparaison numérique, estimation numérique et génération de nombres aléatoires. Une corrélation est constatée entre la tâche de rotation mentale et les 2 premières tâches numériques car selon eux, celles-ci font appel explicitement à la représentation de la magnitude, alors que la génération de nombres aléatoires y ferait appel implicitement. Les compétences de rotation mentale sont donc significativement liées au développement des habiletés numériques de base ayant toutes deux recours à des capacités de représentations spatiales.

Par ailleurs, Lauer et Lourenco (2016) ont réalisé une étude longitudinale auprès de nourrissons de 6 mois auxquels ils proposent un paradigme de détection de changement spatial. Puis, 3 ans plus tard, à l'âge de 4 ans, ils proposent une batterie de tests (dont des tests spatiaux et des tests mathématiques). Une stabilité des habiletés spatiales est relevée pendant le développement ; en effet, les nourrissons de 6 mois ayant de bonnes performances spatiales en montrent également de bonnes à 4 ans. Ces résultats suggèrent également que des habiletés visuo-spatiales supérieures chez le nourrisson prédiraient leurs futures compétences mathématiques.

Pour la première fois, Cornu, Schiltz, Martin et Hornung (2018) ont examiné si les capacités numériques verbales dépendaient significativement plus des habiletés visuo-spatiales, plutôt que des capacités verbales. Pour ce faire, ils ont testé des enfants d'âge préscolaire au niveau verbal ; tâches lexicales (dénomination d'images), conscience phonologique (identification de phonèmes, segmentation syllabiques, etc) et mémoire de travail verbale (répétition de séries de pseudo-mots et une tâche d'empan). En parallèle, ils ont également examiné les capacités numériques verbales des participants via des tâches de comptage à l'endroit, à rebours, une tâche de dénomination rapide automatisée de l'utilisation des doigts et une tâche où doit être nommé le nombre. Puis, le domaine visuo-spatial est aussi testé, par des épreuves de mémoire de travail visuo-spatiale (adaptée sur ordinateur des blocs de Corsi), de perception spatiale (identification d'images parmi des objets et détection d'image cible parmi des distracteurs ; pivotés ou tournés) et de tâches visuo-motrices (copie de dessins et de figures). L'existence d'une corrélation entre les compétences numériques verbales et les habiletés visuo-spatiales est constatée.

Ces conclusions démontrent que les compétences visuo-spatiales sont le socle des premiers apprentissages mathématiques et qu'elles sont fondamentales à ce développement -bien plus que des compétences verbales-. Ainsi, découle une question majeure à propos de l'enseignement des mathématiques ; la verbalisation est-elle réellement une méthode adaptée (actuellement utilisée) ? Ne faudrait-il pas revoir cet enseignement en y incluant des concepts visuo-spatiaux ? Car ces études identifient le lien étroit existant entre compétences visuo-spatiales précoces efficaces et compétences mathématiques ultérieures.

Un dernier aspect montrant que les habiletés visuo-spatiales ont des répercussions sur les compétences mathématiques est d'évaluer l'impact de leur entraînement. Cheng et Mix (2014) ont réparti des enfants de 6-8 ans en 2 groupes : l'un recevait un entraînement ciblant les capacités de rotation mentale tandis que le groupe contrôle effectuait des mots croisés. Le groupe recevant l'entraînement spatial montre une augmentation des performances mathématiques, particulièrement en calculs (opérations à terme manquant) par rapport au groupe contrôle. Ce fait conforte l'utilisation de stratégies spatiales par les enfants ayant reçu cet entraînement.

Ce bilan est aussi soutenu par une étude de Lowrie, Logan et Ramful (2017), qui, pour la première fois teste la mise en place d'un programme d'entraînement visuo-spatial, en classe ordinaire, pour des élèves de 10-12 ans et en collaboration avec leur professeur. Cette étude est une première car elle permet un entraînement en situation scolaire habituelle. Deux groupes d'élèves sont formés, le premier suit un programme ciblé sur le raisonnement visuo-spatial, à partir de tâche de visualisation spatiale, d'orientation spatiale et de rotation mentale. Alors que le second groupe suit un programme de formation mathématique classique. Les résultats mettent en évidence une amélioration des habiletés visuo-spatiales, et surtout une amélioration significative dans certaines tâches mathématiques (géométrie et opérations).

Cependant, des auteurs (Hawes, Moss, Caswell & Poliszczuk, 2015), ayant tenté de reproduire cette étude en allongeant le temps d'entraînement, n'ont pas retrouvé ces résultats. Ils ont réparti des enfants de 6-8 ans soit dans un groupe de formation à la rotation mentale, soit dans un groupe de formation à la littérature. Les résultats révèlent une augmentation des performances en rotation mentale, ainsi que dans d'autres tâches visuo-spatiales (rotation mentale en 3 dimensions, de la transformation mentale (rotation ou l'inversion en miroir) et des complétions de puzzles visuo-spatiaux). Toutefois, en évaluant les habiletés mathématiques avec des opérations à termes manquants et avec une tâche à jetons (montrés à l'enfant, puis cachés et l'expérimentateur y ajoute ou enlève des jetons ; à l'enfant de retrouver le nombre correct de jetons), les auteurs soulignent qu'aucune amélioration n'apparaît dans ces tâches mathématiques.

De plus, Rodán, Gimeno, Elosúa, Montoro et Contreras (2019) obtiennent les mêmes conclusions ; l'entraînement de la rotation mentale permet, certes, une amélioration de cette capacité visuo-spatiale mais pas d'amélioration significative des compétences mathématiques.

Actuellement, beaucoup de données montrent clairement l'existence d'une relation entre les habiletés spatiales et le développement des compétences numériques. Cependant, au regard de la divergence des résultats obtenus, il est clair que nous manquons encore d'informations sur la manière dont ces processus interagissent pour comprendre précisément les relations causales qui se jouent.

2.4 – Résumé

En définitive, les nombreuses études rapportées attestent que les habiletés visuo-spatiales prennent une place prépondérante dans l'acquisition des habiletés mathématiques.

D'une part parce qu'elles sont à la base de la compréhension de la magnitude via la ligne numérique mentale (spatialisée). Et d'autre part, parce qu'elles sont impliquées dans d'autres compétences (mémoire de travail et attention visuo-spatiales) également nécessaires aux habiletés arithmétiques. Enfin, les recherches impliquant les capacités visuo-spatiales chez des patients atteints d'un syndrome génétique puis chez les patients ne présentant pas d'anomalie génétique et les dyscalculiques démontrent l'importance d'acquérir des facultés visuo-spatiales solides afin d'optimiser les bases mathématiques.

Toutefois, rares sont les études qui ont examinés les habiletés visuo-spatiales chez des individus présentant une dyscalculie. En effet, nous n'avons relevé qu'une étude investiguant les compétences visuo-spatiales chez des adolescents dyscalculiques (McCaskey et al. 2017). Par conséquent, l'objet de cette recherche se justifie dans la mesure où elle consiste à déterminer si une faiblesse des habiletés visuo-spatiales est constatée systématiquement chez un patient dyscalculique.

Objectif et hypothèses

La partie théorique met en lumière que de nombreux chercheurs se sont penchés sur l'exploration de la relation unissant le domaine visuo-spatial au domaine arithmétique.

Des recherches ont démontré l'existence d'un déficit commun des compétences numériques et visuo-spatiales en observant divers syndromes génétiques. Dès lors, il était nécessaire de poursuivre les recherches dans ce domaine afin de mieux cerner cette relation. Ainsi, d'autres études ont témoigné de l'existence de ce lien à travers diverses compétences, telle que la ligne numérique mentale. En effet, elle permet d'avoir une représentation de la magnitude spatialisée de gauche à droite et sa précision est corrélée avec les habiletés numériques (Schneider et al. 2018 ; Sella et al. 2016). Ainsi, des habiletés mathématiques efficaces favorisent une meilleure précision dans la réalisation de tâches d'estimation numérique.

Nous avons aussi constaté qu'à travers d'autres processus -mémoire de travail visuo-spatiale et attention spatiale- les compétences numériques et spatiales sont étroitement liées.

Des chercheurs ont aussi testé la relation entre ces compétences numériques et spatiales chez des personnes sans anomalies génétiques ; effectivement, des enfants à faibles compétences visuo-spatiales obtiennent de faibles performances dans des tâches mathématiques (Crollen & Noël, 2015). D'autres chercheurs démontrent même la présence d'une corrélation entre les capacités de rotation mentale et des tâches numériques (Thompson et al. 2013). D'ailleurs, les compétences numériques verbales dépendent significativement plus des aptitudes visuo-spatiales, que verbales (Cornu et al. 2018).

Ces conclusions témoignent de l'influence évidente des habiletés visuo-spatiales dans le développement des acquisitions arithmétiques.

Les recherches exposent que la dyscalculie est multi-déterminée et présente des profils variés. L'intérêt de cette étude consiste à apporter des informations supplémentaires dans la compréhension de ce trouble des apprentissages afin d'en améliorer la prise en charge en ciblant les habiletés visuo-spatiales. D'autant que ces compétences, chez les jeunes enfants, sont prédictives du développement de la cognition numérique (Lauer & Lourenco, 2016), et ce de manière plus significative que les compétences verbales (Cornu et al. 2018). En outre, l'entraînement des compétences spatiales peut se transférer à d'autres compétences spatiales non travaillées.

Alors, exercer ces compétences peut être pertinent car certaines recherches montrent que cela influence ensuite les compétences mathématiques (Cheng & Mix, 2014 ; Lowrie et al. 2017). Toutefois, d'autres études n'obtiennent pas ces résultats (Hawes et al. 2015 ; Rodán et al. 2019). Poursuivre les recherches dans ce domaines s'avère donc nécessaire afin de préciser et comprendre comment ces compétences interagissent, pour proposer une rééducation adaptée et efficace.

Finalement, les recherches à propos des compétences visuo-spatiales se sont relativement peu intéressées à la population dyscalculique. Certains auteurs ont exploré la représentation mentale de la magnitude chez des enfants ayant des faiblesses visuo-spatiales et mathématiques, et constatent que ces enfants ne présentent pas d'effet SNARC (Bachot et al. 2005). D'autres ont évalué des adolescents dyscalculiques dans des tâches visuo-spatiales, décelant une atteinte au niveau visuo-constructif et visuo-cognitif mais pas au niveau visuo-perceptif (McCaskey et al. 2017). Toutefois, les participants était déjà d'un âge avancé, or actuellement, nous savons qu'une intervention précoce est primordiale pour limiter l'impact de ce trouble des apprentissages.

Donc, notre étude explore plus spécifiquement les habiletés visuo-spatiales chez des enfants dyscalculiques afin de déterminer si les difficultés dans ce domaine sont récurrentes. De plus, quand les habiletés visuo-spatiales sont atteintes, l'intérêt est d'analyser précisément dans quelle forme de compétence visuo-spatiale. La dyscalculie est actuellement reconnue plus aisément chez les enfants, il est donc nécessaire d'investiguer les habiletés visuo-spatiales dans cette population plus jeune.

Ainsi, notre étude évalue et compare les compétences numériques et spatiales d'un échantillon d'enfants atteints d'une dyscalculie, apparié à un groupe contrôle, sans trouble des apprentissages.

Les différents aspects du domaine visuo-spatial évalués sont les suivants : la mémoire de travail visuo-spatiale, l'attention spatiale, les compétences visuo-constructives, visuo-spatiales et visuo-perceptives. Par ailleurs, pour s'assurer de la présence d'une difficulté au niveau mathématiques ou non (dyscalculie vs contrôle), des tests mathématiques vont également être utilisés : fluences mathématiques et estimations sur des droites numériques. Nos deux groupes sont appariés verbalement avec le test de vocabulaire de l'EVIP.

Hypothèses

En se basant sur la littérature, nous pouvons émettre plusieurs hypothèses quant aux résultats attendus dans les divers domaines évalués, notamment au niveau visuo-spatial.

D'abord, pour apparier nos 2 groupes, nous utilisons le test de raisonnement verbal en vocabulaire réceptif (EVIP), pour lequel nous n'attendons pas de différence significative entre nos deux groupes.

En ce qui concerne les tests mathématiques, en fluences mathématiques et au Tempo Test Reneken (TTR), les dyscalculiques devraient montrer des performances moindres que les enfants contrôles.

Pour les tâches d'estimation numérique, des études (Schneider et al, 2018 ; Sella et al. 2016) révèlent que les estimations sont plus précises lorsque les participants ont de bonnes compétences mathématiques, nous supposons alors que les dyscalculiques seront moins précis que les enfants contrôles pour la réalisation de cette tâche. De plus, les mêmes auteurs démontraient même l'existence d'une corrélation entre la précision de l'estimation numérique et les compétences mathématiques. Nous pouvons donc nous attendre à obtenir ce même type de corrélation.

Concernant le domaine visuo-spatial, à propos des tâches visuo-perceptives (ici, « les figures enchevêtrées » et le « Visual Perceptual Subtest »), les résultats entre les 2 groupes ne devraient pas différer puisque les 2 niveaux d'analyse (perceptif et associatif) ne sont pas des processus atteints chez les dyscalculiques (McCaskey et al. 2017). En revanche, nous attendons des résultats plus faibles dans le groupe expérimental par rapport aux contrôles pour les tâches visuo-spatiales plus complexes (Thompson et al. 2013). Ainsi, nous nous attendons à des difficultés pour les tâches de rotation mentale et de localisation. De plus, plusieurs auteurs avaient également trouvé une corrélation entre la tâche d'estimation numérique et les tâches visuo-spatiales, nous pouvons donc supposer obtenir ce même type de corrélation (Cornu et al. 2018 ; Thompson et al. 2013). Pour ce qui est des capacités visuo-constructives, que nous évaluons avec la tâche des cubes, il devrait également y avoir une différence notable entre les performances des dyscalculiques et des contrôles (McCaskey et al. 2017).

Enfin, pour la réalisation des Matrices Progressives de Raven (raisonnement non-verbal), des chercheurs montrent l'implication de processus visuo-spatiaux (DeShon, Chan & Weissbein, 1995). Donc, le groupe expérimental pourrait montrer plus de difficulté dans la réalisation de cette tâche.

Quant aux compétences attentionnelles, nous avons vu que le déplacement du foyer attentionnel peut être influencé par la présentation préalable d'un nombre (Fischer et al. 2003). Néanmoins, chez les dyscalculiques, il ne semble pas y avoir de difficultés de l'orientation de l'attention (Askenazi & Henik, 2010). Alors, nous présumons avoir des performances identiques chez nos participants contrôles et dyscalculiques concernant le déplacement du foyer attentionnel.

Dans le domaine mnésique, pour la mémoire de travail visuo-spatiale, nous nous attendons à obtenir de faibles résultats de la part des enfants dyscalculiques, indépendamment du type de mémoire : simultanée ou séquentielle (Mammarella et al. 2018). De plus, la modalité de présentation des informations (structurée ou non) devrait impacter les performances de rétention des participants contrôles (Imbo, Szmalec & Vandierendock, 2009). Toutefois, concernant les dyscalculiques, aucune étude ne permet de montrer qu'ils seront soutenus par cette présentation. Néanmoins, nous pouvons supposer qu'une présentation structurée les soutiendra probablement moins que les contrôles, puisqu'il faut faire appel aux représentations visuo-spatiales stockées en mémoire à long terme. Il est probable que ces représentations soient moins présentes dans notre groupe expérimental.

A propos de la mémoire à long terme visuo-spatiale, nous avons précédemment relevé que les adultes dyscalculiques étaient embarrassés pour l'apprentissage d'informations verbales sérielles -apprentissage de Hebb- (De Visscher et al. 2015). Or, dans les épreuves que nous utilisons, les stimulations sont visuo-spatiales et non verbales. Toutefois, des auteurs ont montré (Couture & Tremblay, 2006 ; Majerus et Attout, 2018) que l'encodage s'effectue indépendamment de la modalité de présentation du matériel à apprendre (verbale ou visuo-spatial). Autrement dit, nous pouvons nous attendre à ce que les participants dyscalculiques soient également en difficulté pour un apprentissage sériel si le matériel présenté est visuo-spatial. Donc, pour la mémoire à long terme visuo-spatiale, les enfants dyscalculiques devraient être plus lents dans leur apprentissage que le groupe contrôle. Toutefois, puisque nous prenons en considération le rappel de l'ordre et des items, nous pouvons imaginer que les dyscalculiques seront d'autant plus en difficulté concernant le rappel de l'ordre (Attout & Majerus, 2015)

En ce qui concerne les distracteurs proposés, puisque ce sont des items présentés en séquence, nous nous attendons au même résultat que pour la mémoire de travail visuo-spatiale séquentielle. Autrement dit, nous nous attendons à ce que les participants dyscalculiques obtiennent de moins bonnes performances que les contrôles.

Enfin, nous pouvons également émettre une dernière hypothèse, qui sera analysée qualitativement car nous n'avons pas de recherches permettant de l'appuyer. Basé sur la description de la population dyscalculique effectuée précédemment, nous savons que les profils sont très hétérogènes. Par conséquent, nous supposons que les profils des participants au niveau visuo-spatiales, seront également très hétérogènes.

Méthodologie

1 – Participants

L'échantillon est composé de 36 participants : 18 enfants atteints de dyscalculie et 18 enfants contrôles. Parmi les dyscalculiques, 4 garçons et 14 filles sont répartis en différentes classes de primaire : deux en 2ème primaire, six en 3ème primaire, trois en 4ème primaire, trois en 5ème primaire et quatre en 6ème primaire. La moyenne d'âge de ces enfants est alors de 9 ans et 7 mois (avec un écart type de 1,5 soit environ 17 mois). Ces enfants sont majoritairement droitiers : 2 gauchers pour 16 droitiers.

2 participants dyscalculiques ont été exclus par manque de participants contrôles pour les appairer.

Quant aux 18 enfants contrôles, ils sont appariés au groupe d'enfants dyscalculique en niveau scolaire, en latéralité. Il y a 5 garçons pour 13 filles (soit un garçon de plus que dans le groupe dyscalculie) et la moyenne d'âge est de 9 ans et 9 mois (avec un écart type de 1,4 soit environ 16 mois).

1.1 – Recrutement

Afin de tester les hypothèses avancées, nous avons recruté des enfants en primaire et ayant une dyscalculie diagnostiquée. Soit le diagnostic a été posé par le/la logopède de l'enfant, soit nous avons sélectionné certains tests supplémentaires à faire passer à l'enfant afin de mettre en évidence des difficultés mathématiques, permettant de l'inclure ou non dans l'étude.

Ensuite, nous avons recruté des enfants contrôles. Ils ont été appariés au niveau scolaire, de la latéralité et au niveau des scores de l'EVIP -afin d'avoir un niveau verbal identique- avec les enfants dyscalculiques.

Tous ces enfants ont été recrutés auprès de logopèdes, d'écoles ou par connaissances en établissements scolaires (français ou belges). Tous les participants recrutés proviennent de Liège et sa province (Belgique) ou de Normandie (France).

Avant toute passation, un formulaire d'informations sur l'étude ainsi qu'une lettre de consentement sont fournis à un parent (ou tuteur), afin qu'ils approuvent la participation de leur enfant à la recherche. Puis, les enfants sont aussi informés sur les raisons de l'étude, et donne également leur consentement pour participer. Toutes les informations liées aux participants sont rendues anonymes. Les divers formulaires sont présentés en annexes (pp. 83-87).

Cette étude a précédemment été soumise et validée par le comité éthique.

1.2 – Critères d'inclusions et d'exclusions

Les enfants dyscalculiques remplissent les critères suivants :

- Dyscalculie diagnostiquée par un/une logopède ou par nous-même via un testing.
- Être scolarisé en primaire en 2ème, 3ème, 4ème, 5ème ou 6ème primaire. Le doublement est admis car c'est une population présentant des difficultés en mathématiques, donc certains enfants sont amenés à refaire une année.
- Être monolingue français (pas d'immersion ou de bilinguisme).
- Absence de diagnostic de haut potentiel, de dyspraxie ou trouble de l'attention avec ou sans hyperactivité (ADH/D), car elles pourraient impacter leurs résultats aux tests visuo-spatiaux. En revanche, les enfants présentant des difficultés en lecture/orthographe comme une dyslexie-dysorthographe sont admis car la comorbidité de ces troubles (dyscalculie-dyslexie) est fréquente.

Les enfants contrôles remplissent les critères suivants :

- Être scolarisé en 2ème 3ème, 4ème, 5ème ou 6ème primaire, sans redoublement.
- Être monolingue français (pas d'immersion ou de bilinguisme).
- Absence de trouble des apprentissages (dyslexie-dysorthographe, dyscalculie, trouble développemental du langage).
- Absence de diagnostic de haut potentiel, de dyspraxie ou de trouble de l'attention car cela pourrait impacter leurs résultats aux tests visuo-spatiaux.

2 – Procédure

Avant de commencer la passation des tests, il était demandé aux parents -ou au logopède- de l'enfant de fournir le bilan réalisé en mathématiques, en ayant préalablement demandé l'accord du/des parents. Le bilan permet d'objectiver les difficultés arithmétiques de l'enfant et notamment de différencier « des difficultés » et un réel « trouble » (dyscalculie). Dans le cas où les parents ne donnaient pas leur accord ou que le bilan manquait de précisions, l'enfant était évalué par nos soins. Ces tests supplémentaires proviennent de la Batterie du Tedi-Math ; petit ou grand, selon le niveau scolaire de l'enfant (Noël & Gregoire, 2015 ; Van Nieuwenhoven, Gregoire, & Noël, 2001).

Les épreuves utilisées sont les suivantes :

- Tedi-Math petit : la partie dénombrement, le test de comparaison de nombres arabes (dans la compréhension du système numérique), la partie système en base 10, les opérations avec un support imagé et le transcodage vers l'écrit (dictée de nombres).
- Tedi-Math grand : le transcodage (dictée de nombres) et la partie système positionnel en base 10.

Pour le groupe contrôle, la tâche EVIP est d'abord proposée, afin de vérifier qu'il puisse être apparié à un des enfants du groupe expérimental. Le reste de la procédure est identique que pour le groupe expérimental.

La passation des différents tests est répartie sur 2 séances pour éviter un biais de fatigue, qui pourrait fausser les scores. Le lieu de passation est convenu avec les parents ; à l'école ou à la maison. Les épreuves sont réparties en deux sessions et les enfants ont été distribués aléatoirement dans le groupe 1 ou dans le groupe 2 :

Groupe 1

Séance 1	Séance 2
EVIP	Matrices
Mémoire de travail visuo-spatiale séquentielle	Estimation numérique
Enchevêtrement (BEVPS)	Fluence mathématique : soustractions
Déplacement du foyer attentionnel (TEA)	Rotation
Cubes (NEPSY II)	Mémoire à long terme visuo-spatiale
Mémoire de travail visuo-spatiale simultanée	Visual Perceptual Subtest (VMI)
Fluence mathématique : multiplications	Localisation (BEVPS)
TTR	Fluence mathématique : additions

Groupe 2

Séance 1	Séance 2
Matrice	EVIP
Mémoire de travail visuo-spatiale simultanée	Fluence mathématique : multiplications
Localisation (BEVPS)	Mémoire à long terme visuo-spatiale
Fluence mathématique : additions	Foyer attentionnel (TEA)
Mémoire de travail visuo-spatiale séquentielle	Cubes (NEPSY II)
Fluence mathématique : soustractions	Visual Perceptual Subtest (VMI)
Rotation	Enchevêtrement (BEVPS)
Estimation numérique	TTR

3 – Description du matériel

3.1 - Evaluation de l'efficacité intellectuelle

Echelle de Vocabulaire en Images Peabody – EVIP (Dunn, Theriault-Whalen & Dunn, 1993).

Objectif : évaluer le vocabulaire sur le versant réceptif.

La version A est utilisée dans cette étude, et comporte 170 items. 4 images sont présentées à l'enfant et un mot lui est donné, il doit retrouver l'image correspondant au mot énoncé. Le mot peut être répété autant de fois que l'enfant le demande. Les items sont présentés sur ordinateur avec une difficulté croissante. L'item de départ est choisi selon l'âge de l'enfant. L'enfant doit réussir 8 items consécutifs afin de pouvoir poursuivre. S'il produit une erreur, alors nous revenons à des items antérieurs jusqu'à obtenir une base de 8. La tâche s'arrête lorsque 6 échecs sont notés dans une série de 8. Le score brut maximal est 170.

3.2 - Evaluation des habiletés mathématiques

Fluence mathématique : additions/soustractions/multiplications.

Objectif : évaluer la réalisation d'opérations.

Dans un temps imparti (90 secondes), l'enfant doit réaliser un maximum d'opérations dans un ordre donné, s'il est trop en difficulté avec une, il peut passer. Les opérations sont réparties en 3 colonnes, proposées à l'écrit. Une feuille différente est proposée pour chaque type d'opération : addition, soustraction, multiplication. 1 point est attribué par réponse correcte, les erreurs sont également comptabilisées, et ce pour chaque type d'opérations.

Tempo Test Reneken – TTR (De Vos, 2004).

Objectif : évaluer la réalisation d'opérations.

Ce test néerlandophone est constitué de 5 colonnes de calculs. Dans la première, ce sont des additions, dans la deuxième des soustractions, dans la troisième des multiplications, dans la quatrième des divisions et dans la dernière colonne, un mélange de ces 4 types d'opérations. Il est demandé à l'enfant de réaliser un maximum d'opérations par colonne en 1 minute. Si l'enfant est trop en difficulté sur un item, il peut passer à l'opération suivante. 1 point est attribué par réponse correcte, ainsi le score total correspond aux nombres d'items bien réalisés.

Estimation numérique. (basé sur Siegler & Opfer, 2003).

Objectif : évaluer la représentation de la ligne numérique mentale.

Des feuilles avec des lignes numériques sont proposées à l'enfant, il doit placer le nombre donné sur la ligne. Il y a 10 lignes numériques allant de 0 à 100, sur lesquelles il doit placer : 2, 3, 4, 6, 18, 25, 42, 67, 71, 86. Il y a 10 autres lignes numériques allant de 0 à 1000 sur lesquelles il doit placer : 4, 6, 18, 25, 71, 86, 230, 390, 780, 810. Seules les bornes extérieures sont indiquées sur les lignes numériques. Pour ne pas influencer les résultats, l'enfant ne voit qu'une seule ligne à la fois. Pour cette tâche, nous mesurons en millimètres l'écart entre la réponse de l'enfant et la réponse attendue (en moyenne), et nous comptabilisons le nombre d'écarts positifs (vers la droite) et d'écarts négatifs (vers la gauche). Puis, nous distinguons ces résultats pour les lignes de 0 à 100 et de 0 à 1000. Il n'y a pas de limite de temps et l'enfant doit réaliser tous les items.

3.3 - Evaluation des habiletés visuo-spatiales

Questionnaire Visuo-Spatial – pour les Parents - QVS-P (Wansard, Catale, Geurten & Lejeune).

Objectif : évaluer le domaine visuo-spatial dans le quotidien de l'enfant.

Ce questionnaire est composé de 30 items pour lesquels le parent répond à l'aide d'une échelle de Lickert : jamais, parfois, souvent, toujours ou non applicable. Cette enquête vise à cerner certains comportements de l'enfant au cours des 6 derniers mois. Chaque réponse se voit attribuée 1, 2, 3 ou 4 points, et permet d'obtenir un score (minimum de 30 et maximum de 120).

Figures enchevêtrées de la Batterie BEVPS

(Schmetz, Rousselle, Ballaz, Detraux & Barisnikov, 2017).

Objectif : évaluer les capacités visuo-perceptives.

L'enfant dénomme les dessins qu'il perçoit dans les figures enchevêtrées. Les figures sont composées de 2 à 4 dessins et sont présentées avec une complexité croissante via le programme « open sesame ». Douze items apparaissent à l'écran, pour chaque item, 1 point est attribué par figure reconnue. Il y a 36 figures en tout, ainsi, le score maximal est de 36.

Developmental Test of Visual Perception – VMI (Beery, Buktenica & Beery, 2010).

Objectif : évaluer les compétences visuo-spatiales et visuo-perceptives.

Des figures cibles encadrées sont présentées à l'enfant et il doit entourer la figure identique parmi les propositions qui lui sont faites ; parmi 30 figures de complexité croissante. Le test est chronométré. 1 point est attribué lorsque le bon item est entouré (score maximal de 30), 2 types d'erreurs sont également relevées ; les erreurs visuo-perceptives et les erreurs visuo-spatiales.

Localisation de la Batterie BEVPS (Schmetz et al. 2017).

Objectif : évaluer la localisation spatiale des éléments les uns par rapport aux autres.

L'enfant doit retrouver la figure identique à la cible parmi plusieurs propositions, ainsi, lui sont présentés 40 items. Les items se composent de grilles au format 6x6 ou 7x7 mais seul le cadre et les 2 ou 3 carrés rouges à l'intérieur sont visibles. Cette tâche s'effectue sur ordinateur, avec le logiciel « open sesame », l'enfant utilise le clavier pour répondre. 1 point est attribué par bonne réponse ; le score maximal que l'enfant peut obtenir est 40. Le temps moyen par réponse est également mesuré.

Rotation de la Batterie BEVPS (Schmetz et al. 2017)

Objectif : évaluer la rotation mentale.

Cette tâche est également présentée sur le logiciel « open sesame », l'enfant répond avec le clavier et doit trouver, parmi les 3 propositions, la figure identique à la cible (pour ça, il doit tourner la figure mentalement). Il y a 33 items, 1 point est attribué par item ; la note maximale possible est donc de 33. De nouveau, le temps moyen par réponse est également mesuré.

Cubes – NEPSY II (Korkman, Kirk & Kemp, 2012).

Objectif : évaluer les capacités visuo-constructives.

19 items représentant une construction avec des cubes en 3D (items de 1 à 5) ou en 2D (items de 6 à 19) sont présentés à l'enfant. Il est demandé à l'enfant de reproduire la construction avec des cubes, le plus rapidement possible. Le nombre correct de cube est donné à l'enfant. Pour les items 1 à 7, le temps imparti est de 30 secondes, et de 60 secondes pour les autres. On commence à l'item 8 pour les enfants de 7 ans et plus, si une erreur est commise, alors on revient à l'item précédent, sinon, on poursuit la tâche. Le test est interrompu quand le participant produit 3 erreurs consécutives. 1 point est attribué lorsque l'enfant reproduit correctement la figure et dans le temps imparti. Le score maximal est de 28.

Les Matrices de Raven colorées (Raven, Court & Raven, 1998).

Objectif : évaluer le raisonnement non verbal et les capacités déductives.

L'enfant est face à un écran sur lequel des diapositives défilent. Une matrice dont une partie est manquante est présentée sur une diapositive. L'enfant doit choisir parmi plusieurs possibilités, la partie qui correspond le mieux. Cette épreuve est chronométrée. Il y a 36 matrices, le score maximal est donc 36.

3.4 – Evaluation du domaine attentionnel

Foyer attentionnel (TEA, Zimmermann & Fimm, 1994).

Objectif : évaluer le déplacement du foyer attentionnel.

Ce test est présenté sur le logiciel « open sesame ». L'enfant doit fixer un élément central et détecter le plus rapidement possible l'apparition d'une croix à gauche ou à droite de l'écran. Il donne sa réponse en appuyant sur les touches du clavier. L'apparition d'une flèche précède l'apparition de la croix et donne le côté d'apparition de la croix (dans 80 % des cas, elle indique correctement l'apparition de la croix, c'est congruent et c'est non congruent dans 20 % des cas). 100 items sont présentés à l'enfant, pour 50 d'entre eux, la flèche est présentée à gauche et les 50 autres sont présentés à droite. Plusieurs scores sont mesurés : un score total sur 100 (1 point est attribué par réponse correcte), un score pour les item « congruent » (pour lesquels le sens de la flèche correspond à l'emplacement de la croix), un score « incongruent » (où le sens de la flèche et l'emplacement de la croix ne correspondent pas) et le temps moyen de réponse pour chacune de ces 3 conditions.

3.5 – Evaluation du domaine mnésique

Mémoire de travail simultanée (Attout, Noël & Rousselle, 2018)

Objectif : évaluer la mémoire de travail visuo-spatiale simultanée.

Une grille comportant des points noirs est présentée à l'enfant pendant 5 secondes, puis elle est cachée. Il est demandé au participant de replacer les jetons aux places correspondantes aux points noirs. Le participant possède le nombre correct de jetons. Ici, c'est la mémoire de travail visuo-spatiale simultanée qui est évaluée car tous les points noirs sont présentés simultanément à l'enfant. La difficulté est croissante ; les grilles sont d'abord au format 4x4 puis 4x5. Il y a 2 modalités : structurée et non structurée. On passe progressivement de 4 à 10 points noirs à replacer. Pour cette tâche, plusieurs scores « items » sont obtenus, 2 scores selon la présentation de la tâche : structurée et non-structurée et un score total (rassemblant structuré et non-structuré). 1 point est attribué lorsqu'un jeton est correctement placé. Le score maximal est de 120 (60 en structurée et 60 en non structurée).

Mémoire de travail séquentielle (Attout et al. 2018).

Objectif : évaluer la mémoire de travail visuo-spatiale séquentielle.

Une grille vierge est présentée à l'enfant, l'expérimentateur, à côté de l'enfant, touche les cases dans un ordre défini (1 case/seconde). L'enfant a le nombre de jetons correspondants et doit les placer dans les cases désignées par l'expérimentateur, et dans le même ordre. La difficulté est croissante ; les grilles passent du format 4x4 au format 4x5 et le nombre de jetons à placer passe de 4 à 10. Il y a également 2 modalités : structurée et non structurée.

Cette tâche évalue la mémoire de travail visuo-spatiale séquentielle puisque les points noirs sont présentés en séquence, l'enfant ne les voit pas tous en même temps. Pour ce test, plusieurs scores « ordres » sont calculés, comme précédemment, 2 scores selon la modalité de présentation de la tâche (structurée ou non-structurée) et un score total (total des 2 modalités de présentation). 1 point est attribué lorsque le jeton est correctement placé et selon l'ordre de présentation. Le score maximal est de 120 (60 en structurée et 60 en non structurée).

Mémoire à long terme. (Exemple en Annexes pp. 88-89).

Objectif : évaluer la mémoire à long terme visuo-spatiale (séquentielle).

Une grille vierge est présentée au participant, au format 4x5. Comme pour l'épreuve précédente, l'expérimentateur touche les cases dans un ordre défini (1 case/seconde), et l'enfant doit placer les jetons dans le même ordre et sur les mêmes cases que celles désignées par le chercheur. L'enfant possède le nombre correct de jetons (8 pour chaque grille). Ainsi, 12 grilles sont présentées. La différence avec la tâche précédente, est que la moitié des grilles présente les points aux mêmes emplacements et dans le même ordre (paradigme de Hebb) afin d'observer si le participant fait un apprentissage. Alors que les autres grilles sont des distracteurs (absence d'apprentissage).

Dans cette tâche, sont calculés des scores items et des scores ordres, avec une distinction des scores selon qu'ils aient été obtenus dans les grilles de type « apprentissage » (de Hebb) ou les grilles distractrices (mémoire à court terme). Deux scores totaux sont aussi identifiés ; un pour les grilles d'apprentissages (reprenant le score ordre + le score item) et un pour les autres grilles (ordre + item).

Résultats

1 – Statistiques utilisées

Tous les tests statistiques ont été réalisés via le programme informatique « JASP ». Avant de commencer la comparaison des 2 groupes dans les différentes variables, il est important de vérifier que celles-ci respectent la loi normale. Ces données permettront de choisir le test adéquat pour nos comparaisons (test paramétrique ou non paramétrique). Ainsi, le test de Shapiro-Wilk est recommandé pour évaluer la normalité des variables (hypothèse nulle, H0) pour les échantillons de moins de 50 participants. Cette hypothèse de normalité est rejetée si la valeur de p est inférieure à 5% ($p < .05$). Les résultats du test Shapiro-Wilk sont repris dans le tableau A1 dans les annexes. Nous porterons moins d'attention sur les résultats des variables du groupe « dyscalculie » car c'est un groupe pathologique, par conséquent, il est évident que certaines variables ne suivent pas la loi normale. Pour le groupe contrôle, les variables ne suivant pas la loi normale sont : les estimations numériques (valeur totale pour les lignes de 0 à 100, de 0 à 1000 ainsi que les sur et sous estimations pour les lignes de 0 à 1000), le score total de rotation, tous les scores attentionnels, la mémoire de travail simultanée uniquement pour les items structurés, le Hebb total et la mémoire à court terme item.

De plus, nous avons également vérifié l'égalité des variances (H0) avec l'utilisation du test de Levene. Cette hypothèse d'égalité des variances est aussi rejetée si la valeur de p est inférieure à 5% ($p < .05$). Dans le cas où les variances ne sont pas homogènes, il faudra utiliser un test non-paramétrique pour compléter nos observations de comparaison des moyennes. Les résultats du test de Levene (cf Tableau A2 en Annexes) mettent en évidence une inégalité des variances pour les variables suivantes : les multiplications correctes, l'estimation numérique totale pour les lignes de 0 à 100, le questionnaire total, les figures enchevêtrées, le VMI total, le score au test de localisation, le temps pour la rotation, les temps dans le domaine attentionnel, tous les scores de la mémoire à court terme visuo-spatiale séquentielle, le score de la mémoire à court terme visuo-spatiale simultanée items structurés et les scores Hebb total et Hebb item.

Les données décrites ci-dessus sont nécessaires pour la suite de la réalisation de nos tests statistiques. En effet, les variables ne suivant pas la loi normale et les variables hétérogènes au niveau de la variance nécessitent l'emploi d'un test non-paramétrique. Ainsi, le test de Welsch sera utilisé et les résultats sont repris en annexe (cf Tableau A3 en Annexes).

Concernant le test statistique permettant de comparer nos 2 groupes, nous utilisons principalement le T de Student (test paramétrique) pour échantillons indépendants ; il est appliqué à chaque variable étudiée. En outre, pour effectuer une bonne analyse pour les variables ne respectant pas la loi normale (expliqué précédemment), le test non-paramétrique de Welch sera utilisé. Avec ces tests, nous évaluons l'égalité des performances moyennes de nos deux groupes : dyscalculique et contrôle (H0). Cette hypothèse est rejetée si la valeur p est inférieure à 5% ($p < .05$).

De plus, une analyse de la variance (ANOVA) est également utilisée afin d'examiner s'il existe un effet principal d'apprentissage et/ou un effet d'interaction entre l'apprentissage et le groupe, dans la tâche de mémoire à long terme visuo-spatiale.

Pour terminer cette partie, des analyses de corrélations seront effectuées entre diverses variables, afin de déterminer si nous reproduisons les mêmes résultats que ceux de la littérature.

En outre, nous effectuerons également une exploration plus qualitative des résultats obtenus au niveau visuo-spatial.

2 – Analyse du raisonnement verbal

Selon notre hypothèse, nous n'attendons pas de différence significative entre nos 2 groupes pour le test de l'EVIP (raisonnement verbal). Le test t pour échantillon indépendant réalisé sur les scores bruts de l'EVIP ne montre aucune différence significative entre les deux groupes (cf. Tableau 1). Ces données confirment alors notre hypothèse de départ ; il n'existe aucune différence inter-groupe aux scores de l'EVIP. Ainsi les dyscalculiques réussissent aussi bien que les contrôles dans ce domaine.

Tableau 1 : Statistiques paramétrique : Test t de Student pour échantillon indépendant, appliqué à l'EVIP.

Variables	Groupes				Test T pour échantillon indépendant (N=36)			
	Groupe DYS		Groupe CTL		t	ddl	p	d
	M	E-T	M	E-T				
EVIP brut	110.667	20.979	115.222	17.145	0.713	34	.480	0.238

DYS = dyscalculiques, CTL = contrôles, M = moyenne, E-T = écart-type, t = statistique de Student, ddl = degré de liberté, p = probabilité de dépassement (seuil d'incertitude à 5%). * $p < .05$, ** $p < .01$, d = taille de l'effet.

3 – Analyse des compétences numériques

Pour les tâches de fluences mathématiques (additions, soustractions, multiplications et TTR), l'hypothèse avancée était l'existence d'une différence significative inter-groupe ; le groupe contrôle doit présenter de meilleures performances que le groupe expérimental. L'analyse du test t appliqué aux scores de réponses correctes des participants révèle que les scores au TTR, en additions, en soustractions et en multiplication sont significatifs (cf. Tableau 2). Cependant, la variable du nombre de réponses correctes aux multiplications ne suit pas la loi normale, nous effectuons donc -en plus du test de Student- le test non-paramétrique de Welch. Les résultats (cf. Tableau A3 en Annexe) montrent également une différence significative, $w = 2.899$, $p = .007$, $d = 0.966$, ce qui confirme notre hypothèse : les participants contrôles présentent de meilleurs scores que les dyscalculiques en fluences mathématiques, indépendamment du type d'opérations. Qualitativement, nous observons que le groupe contrôle réalise (en moyenne) le double d'opérations par rapport aux dyscalculiques : par exemple, la moyenne est de 72 additions réalisées par le groupe contrôle, alors qu'elle n'est que de 35 pour le groupe dyscalculique. De plus, l'investigation du test t pour les erreurs produites ne révèle pas de différence significative entre les deux groupes. Donc, il est intéressant de noter que le groupe expérimental ne fait pas plus d'erreurs que le groupe contrôle, mais, ils sont deux fois plus lents pour réaliser les différents calculs.

Ensuite, pour évaluer le domaine numérique, des tâches d'estimation numériques ont été administrées. Plusieurs scores sont calculés : la moyenne de la différence entre la réponse de l'enfant et la réponse correcte (calculée en millimètres), et le sens vers lequel tend cet écart (surestimation ou sous-estimation), pour les lignes allant de 0 à 100 et celles allant de 0 à 1000. Pour ces tâches, nous nous attendons à un écart significatif entre les deux groupes, en terme de précision. Le test t est appliqué à chacune des variables. Les analyses ne révèlent aucune différence significative que ce soit dans l'écart entre la réponse de l'enfant et la réponse correcte ou que ce soit au niveau du sens vers lequel tend cet écart (cf. Tableau 2). Le test non paramétrique de Welch est utilisé pour la variable « total » de la ligne allant de 0 à 100 ($w = -1.786$, $p = .084$, $d = -0.595$) et la ligne allant de 0 à 1000 ($w = -1.818$, $p = .078$, $d = -0.606$), et confirme cette absence de différence significative. Ce test est également appliqué aux variables « sur estimation » et « sous estimation » des lignes allant de 0 à 1000. Les résultats sont respectivement : $w = -1.075$, $p = .290$, $d = -0.358$ pour les sur estimations et, $w = 0.967$, $p = .341$, $d = 0.322$ pour les sous estimations.

Ainsi, ces résultats ne sont pas en accord avec nos hypothèses puisqu'il n'y a pas de différence entre nos deux groupes. Ces faits seront discutés dans la partie suivante.

Tableau 2 : Statistiques paramétrique : Test t de Student pour échantillon indépendant, appliqué aux tâches mathématiques (TTR, fluences numériques, estimation numérique).

Variables	Groupes				Test T pour échantillon indépendant			
	Groupe DYS		Groupe CTL		t	ddl	p	d
	M	E-T	M	E-T				
TTR	35.727	16.817	72.818	29.123	3.658	20	.002**	1.560
Additions correctes	13.222	8.164	25.778	11.101	3.866	34	<.001**	1.289
Additions erreurs	0.833	0.985	0.444	0.705	-1.362	34	.182	-0.454
Soustractions correctes	10.056	7.223	23.778	9.496	4.879	34	<.001**	1.626
Soustractions erreurs	2.333	5.980	0.667	0.970	-1.167	34	.251	-0.389
Multiplication correctes	8.500	7.838	19.056	13.308	2.899	34	.007**	0.966
Multiplications erreurs	0.944	0.802	0.611	0.698	-1.330	34	.192	-0.443
EN : 0-100 (mm) total	24.050	16.997	15.372	11.666	-1.786	34	.083	-0.595
EN : 0-100 sur-estimation	5.889	3.341	5.278	3.045	-0.574	34	.570	-0.191
EN : 0-100 sous-estimation	3.889	3.252	4.278	3.250	0.359	34	.722	0.120
EN : 0-1000 (mm) total	54.472	32.365	35.411	30.531	-1.818	34	.078	-0.606
EN : 0-1000 sur-estimation	8.611	1.720	7.889	2.272	-1.075	34	.290	-0.358
EN : 0-1000 sous-estimation	1.389	1.720	2.000	2.058	0.967	34	.341	0.322

TTR = Tempo Test Reneken, EN = estimation numérique, DYS = dyscalculiques, CTL = contrôles, M = moyenne, E-T = écart-type, t = statistique de Student, ddl = degré de liberté, d = taille de l'effet, p = probabilité de dépassement (seuil d'incertitude à 5%). *p<.05, **p<.01. (Les zones grisées = scores significatifs).

3 – Analyse quantitative du domaine visuo-spatiales

3.1 Questionnaire

L'objectif de ce questionnaire est de rapporter les observations des parents quant aux comportements visuo-spatiaux de leur enfant -pour rappel, il pouvait être attribué 1, 2, 3 ou 4 points par question-. Les examens du test t révèlent une différence significative entre les deux groupes pour le score total obtenu (cf Tableau 3). Toutefois, le test d'égalité des variances montre une déviation de la loi normale. Dès lors, nous réalisons le test non-paramétrique de Welch, qui signale aussi une différence inter-groupe, $w = -3.192$, $p = .004$, $d = -1.064$. Ces résultats confortent la différence de nos 2 groupes au niveau des observations des compétences visuo-spatiales effectuées par les parents, en défaveur des enfants ayant des difficultés en mathématiques.

Au niveau qualitatif, nous relevons que certaines questions semblent plus discriminantes car les scores obtenus sont plus élevés chez les dyscalculiques. Six questions sont relevées :

Q°1- « Comprend des consignes orales faisant intervenir des relations spatiales (par exemple ; « dessine en-dessous de la ligne », « prends le livre situé à gauche »...) ».

Q°4- « A des difficultés d'orientation spatiale (par exemple, il est incapable de se situer dans l'espace) ».

Q°16- « Interprète mal la trajectoire ou la localisation d'une balle dans l'espace (par exemple, frappe à côté de la balle) ».

Q°17- « Confond des lettres qui se ressemblent visuellement (par exemple p, q, b, d) ».

Q°26- « A des difficultés à percevoir ou à réagir à des objets ou à des personnes situées dans une partie de l'espace (par exemple, l'enfant ne réagit pas quand vous lui présentez une peluche à sa gauche alors qu'il n'a aucune difficulté lorsque celle-ci est présentée à sa droite) ».

Q°30- « Saute des lignes quand il lit. »

Tableau 3 : Statistiques paramétrique : Test t de Student pour échantillon indépendant, appliqué au Questionnaire visuo-spatial.

Variables	Groupes				Test T pour échantillon indépendant (N=36)			
	Groupe DYS		Groupe CTL		t	ddl	p	d
	M	E-T	M	E-T				
Questionnaire total	48.944	11.543	39.111	6.135	-3.192	34	.003**	-1.064

DYS = dyscalculiques, CTL = contrôles, M = moyenne, E-T = écart-type, t = statistique de Student, ddl = degré de liberté, d = taille de l'effet, p = probabilité de dépassement (seuil d'incertitude à 5%). *p<.05, **p<.01.

3.2 Tâches visuo-spatiales

Dans ce domaine, nous nous attendons à des performances moindres des dyscalculiques par rapport aux contrôles dans les tâches de localisation, rotation mentale et visuo-constructives (test des cubes). En revanche, leurs performances devraient être identiques aux contrôles dans les tâches visuo-perceptives (enchevêtrement et VMI).

Au niveau visuo-perceptif, les résultats du tests t appliqué aux figures enchevêtrées ne montre pas de différence significative entre nos deux groupes ($t(34) = 1.054, p = .299, d = 0.351$). Toutefois, l'analyse du test t des réponses correctes du VMI révèle une différence significative ($t(34) = 3.129, p = .004, d = 1.043$). Ces 2 variables ne suivent pas la loi normale, nous analysons donc les résultats au test de Welch ; ils confirment une absence d'effet au test des figures enchevêtrées ($w = 1.054, p = .301, d = 0.351$) et la présence d'un effet significatif pour le score total du VMI ($w = 3.129, p = .005, d = 1.043$). Ces résultats indiquent que les dyscalculiques ont des scores égaux aux contrôles dans la tâche de figures enchevêtrées, en revanche, leurs scores sont inférieurs aux contrôles dans la tâche de VMI. Ainsi, cela n'infirme, ni ne confirme notre hypothèse de départ. De plus, nous observons dans le VMI, que le groupe expérimental ne met pas plus de temps et ne commet pas plus d'erreurs que le groupe contrôle (cf Tableau 4). En outre, si l'on s'attarde sur la moyenne des scores aux erreurs perceptives et spatiales, nous constatons que les dyscalculiques commettent plus d'erreurs perceptives, alors que nous supposions des erreurs plus importantes au niveau spatiale. Ces résultats seront commentés en dernière partie.

Ensuite, au niveau visuo-spatial, la réalisation du test t sur l'analyse du nombre de réponses correctes et du temps pour la tâche de localisation révèle une différence significative inter-groupe pour les 2 variables ; le nombre de réponses correctes ($t(34) = 3.962, p < .001, d = 1.321$) et le temps ($t(34) = 2.616, p = .013, d = 0.872$). Pour la rotation mentale, les résultats sont également significatifs pour le nombre de réponses correctes ($t(34) = 2.891, p = .007, d = 0.964$). Cependant, aucun effet significatif dans le temps de réalisation de ce test n'est notable (cf Tableau 4). Comme deux de ces variables ne suivent pas la loi normale (« localisation total » et « rotation temps »), le test statistique non-paramétrique de Welch a été employé (cf Tableau A3 en Annexes) ; ces résultats ne diffèrent pas de ceux du t de Student.

Par conséquent, ces données confirment notre hypothèse attestant que les dyscalculiques commettent significativement plus d'erreurs que les contrôles dans ces tâches. Si l'on s'attarde sur les moyennes du temps de réalisation de ces tâches, elles indiquent que les dyscalculiques peuvent être plus rapides (en localisation) que les contrôles, mais pas systématiquement (en rotation mentale).

Enfin, au niveau visuo-constructif, le test t appliqué à la tâche des cubes ne montre pas de différence significative inter-groupe ($t(34) = 1.997, p = .054, d = -0.666$). Ce résultat n'est pas en accord avec notre hypothèse et sera donc analysé dans la partie discussion.

Tableau 4 : Statistiques paramétrique : Test t de Student pour échantillon indépendant, appliqué aux tâches visuo-spatiales.

Variables	Groupes				Test T pour échantillon indépendant (N=36)			
	Groupe DYS		Groupe CTL		t	ddl	p	d
	M	E-T	M	E-T				
Enchevêtrement	32.278	3.478	33.278	2.024	1.054	34	.299	0.351
VMI total	23.722	3.816	25.833	1.823	2.118	34	.042*	0.706
VMI temps	144.722	44.164	158.944	36.051	1.058	34	.297	0.353
VMI erreurs spatiales	1.889	1.937	1.000	1.138	-1.679	34	.102	-0.560
VMI erreurs perceptives	4.444	2.791	3.167	1.200	-1.784	34	.083	-0.595
Localisation total	27.722	5.949	33.778	2.579	3.962	34	<.001**	1.321
Localisation temps	5910.025	1888.599	7993.917	2802.723	2.616	34	.013*	0.872
Rotation total	17.889	5.535	22.889	5.040	2.891	34	.007**	0.964
Rotation temps	9333.257	4896.456	11109.000	2901.460	1.324	34	.194	0.441
Cubes	15.722	4.403	18.278	3.177	1.997	34	.054	0.666

VMI = Visual Perceptual Subtest, DYS = dyscalculiques, CTL = contrôles, M = moyenne, E-T = écart-type, t = statistique de Student, ddl = degré de liberté, d = taille de l'effet, p = probabilité de dépassement (seuil d'incertitude à 5%). *p<.05, **p<.01.

3.3 Raisonnement non-verbal

Pour le test des Matrices Progressives de Raven, nous avons émis l'hypothèse que le groupe expérimental obtiendrait des scores inférieurs au groupe contrôle car cette tâche implique des processus visuo-spatiaux. La réalisation du test t pour les scores totaux obtenus montre un effet significatif (cf. Tableau 5). Le groupe expérimental commet significativement plus d'erreurs que le groupe contrôle, d = 0.920. Ainsi, ce résultat est en accord avec notre hypothèse.

Tableau 5 : Statistiques paramétrique : Test t de Student pour échantillon indépendant, appliqué aux Matrices de Raven.

Variables	Groupes				Test T pour échantillon indépendant (N = 36)			
	Groupe DYS		Groupe CTL		t	ddl	p	d
	M	E-T	M	E-T				
RAVEN	24.556	4.617	28.667	4.311	2.761	34	.009**	0.920

DYS = dyscalculiques, CTL = contrôles, M = moyenne, E-T = écart-type, t = statistique de Student, ddl = degré de liberté, d = taille de l'effet, p = probabilité de dépassement (seuil d'incertitude à 5%). *p<.05, **p<.01.

3.4 Tâche attentionnelle

Pour cette tâche, nous n'attendons pas de différence significative inter-groupe. Différentes variables du domaine attentionnel ont été mesurées : le nombre de réponses correctes total, le nombre de réponses correctes sur les variables congruentes, incongruentes, le temps total et le temps pour les variables congruentes et incongruentes. La plupart de ces données ne suivent pas la loi normale, donc, nous analyserons les résultats au test de Student mais également au test de Welch. L'analyse du test t révèle qu'il n'existe aucune différence significative inter-groupes, que ce soit dans le nombre de réponses correctes, ou dans les temps (cf Tableau 5). Les résultats du test de Welch montrent également l'absence d'effet significatif (cf Tableau A3 en Annexes). Donc, conformément à nos hypothèses, les performances des participants des deux groupes sont similaires ; ils réalisent de nombreuses réponses correctes et le temps de réalisation de la tâche est identique.

Tableau 5 : Statistiques paramétrique : Test t de Student pour échantillon indépendant, appliqué au test attentionnel.

Variables	Groupes				Test T pour échantillon indépendant			
	Groupe DYS		Groupe CTL		t	ddl	p	d
	M	E-T	M	E-T				
Attention correct total	89.375	0.744	89.833	1.098	1.070	24	.295	0.455
Attention temps total	555.125	162.178	698.778	331.152	1.157	24	.259	0.492
Attention correct congruent	79.375	0.518	79.222	2.365	-0.179	24	.860	-0.076
Attention temps congruent	540.625	166.577	688.889	331.539	1.190	24	.246	0.506
Attention correct incongruent	10.000	0.535	10.611	2.253	0.750	24	.461	0.319
Attention temps incongruent	589.438	152.278	747.667	329.877	1.286	24	.211	0.546

DYS = dyscalculiques, CTL = contrôles, M = moyenne, E-T = écart-type, t = statistique de Student, ddl = degré de liberté, d = taille de l'effet, p = probabilité de dépassement (seuil d'incertitude à 5%). *p<.05, **p<.01.

3.5 Tâches mnésiques

Pour la mémoire de travail visuo-spatiale, nous présumons des performances plus faibles chez les enfants dyscalculiques, indépendamment du type de tâche (séquentielle, simultanée). Toutefois, nous nous attendons à des résultats plus faibles chez les dyscalculiques lorsque la tâche est structurée (vs non-structurée).

Pour ce qui est de la mémoire à long terme visuo-spatiale, nous nous attendons à ce que les enfants dyscalculiques soient plus lents dans l'apprentissage de la séquence spatiale. Concernant les variables « MCT » nous attendons une différence, tout comme la mémoire de travaille séquentielle.

Mémoire de travail visuo-spatiale séquentielle

Plusieurs mesures de l'ordre (placer le jeton au bon endroit et dans le bon ordre) ont été relevées ; selon que la présentation soit structurée ou non structurée, et un score total qui rassemble les 2 mesures précédentes. L'analyse des résultats du test t appliqué à ces 3 variables montre une différence significative inter-groupe pour chacune d'entre elles (cf Tableau 6). Pour ces variables, le test d'égalité des variances montre des résultats significatifs. Dès lors, nous appliquons également le test non-paramétrique de Welch (cf Tableau A3 en Annexes). Celui-ci révèle des résultats identiques avec la présence d'une différence significative inter-groupe ; les enfants dyscalculiques obtiennent de moins bons résultats que les enfants contrôles. Ces données confirment notre hypothèse ; les dyscalculiques sont moins performants dans la tâche de mémoire de travail visuo-spatiale séquentielle, que les items soient structurés ou non.

Mémoire de travail visuo-spatiale simultanée

Différentes mesures ont également été relevées pour évaluer cette mémoire ; des mesures « items » (placer le jeton au bon endroit) selon la présentation structurée ou non structurée, et un score total. Les résultats du test t montre une différence significative entre nos deux groupes, pour toutes les variables (cf Tableau 6). Nous avons aussi analysé la mesure « items structurés » avec le test non-paramétrique de Welch (car le test d'égalité des variances montrait une inégalité), il révèle le même résultat que le t de Student ($w = 3.197$, $p = .004$, $d = 1.066$). Ainsi, ces données concordent avec nos hypothèses ; dans les tâches de mémoire à court terme visuo-spatiale simultanée, le groupe dyscalculique est systématiquement moins bon que le groupe contrôle.

Tableau 6 : Statistiques paramétrique : Test t de Student pour échantillon indépendant, appliqué aux tâches de mémoire de travail visuo-spatiale (séquentielle et simultanée).

Variables	Groupes				Test T pour échantillon indépendant (N = 36)			
	Groupe DYS		Groupe CTL		t	ddl	p	d
	M	E-T	M	E-T				
MCTVS séquentielle ordre structuré	30.556	14.770	46.556	8.424	3.992	34	<.001**	1.331
MCTVS séquentielle ordre non-structuré	19.889	11.871	34.111	6.910	4.393	34	<.001**	1.464
MCTVS séquentielle ordre total	50.444	25.215	80.500	14.234	4.404	34	<.001**	1.468
MCTVS simultanée item structurés	50.278	7.805	56.722	3.495	3.197	34	.003**	1.066
MCTVS simultanée item non-structurés	38.722	8.635	46.778	6.975	3.079	34	.004**	1.026
MCTVS simultanée item total	89.000	14.974	103.500	9.703	3.448	34	.002**	1.149

MCTVS = mémoire de court terme visuo-spatiale, DYS = dyscalculiques, CTL = contrôles, M = moyenne, E-T = écart-type, t = statistique de Student, p = probabilité de dépassement (seuil d'incertitude à 5%). * $p < .05$, ** $p < .01$.

Présentation structurée vs non structurée

Nous voulons maintenant déterminer si la présentation de la tâche (structurée ou non) influence les performances. Selon notre hypothèse, la présentation structurée de la tâche devrait aider les participants, indépendamment du groupe.

Nous réalisons donc le test de student pour échantillon indépendant afin de confronter les performances intra-groupe, c'est-à-dire dans le groupe dyscalculie et dans le groupe contrôle. Nous effectuons ce test pour les variables mémoire de travail simultanée et pour la mémoire de travail séquentielle, en comparant la présentation (structurée ou non). L'analyse du test t souligne la présence d'une différence significative dans les deux tâches de mémoire de travail : séquentielle et simultanée, et dans les deux groupes : contrôle et dyscalculique (cf Tableau 7). Autrement dit, si la tâche est présentée de manière structurée, cela aide les participants, indépendamment du groupe.

Tableau 7 : Statistiques paramétrique : Test t de Student pour échantillon indépendant, appliqué aux tâches de mémoire de travail visuo-spatiale (séquentielle et simultanée) afin de comparer le type de présentation : structurée vs non-structurée.

Variables - Groupe	Présentation	M	E-T	Test T pour échantillon indépendant (N = 36)			
				t	ddl	p	d
MCTVS séquentielle – DYS	Non-structurée	19.889	11.871	-2.388	34	.023*	-0.796
	Structurée	30.556	14.770				
MCTVS simultanée – DYS	Non-structurée	38.722	8.635	-4.212	34	<.001**	-1.404
	Structurée	50.278	7.805				
MCTVS séquentielle - CTL	Non-structurée	34.111	6.910	-4.846	34	<.001**	-1.615
	Structurée	46.556	8.424				
MCTVS simultanée - CTL	Non-structurée	46.778	6.975	-5.408	34	<.001**	-1.803
	Structurée	56.722	3.495				

MCTVS = mémoire à court terme visuo-spatiale, DYS = dyscalculiques, CTL = contrôles, M = moyenne, E-T = écart-type, t = statistique de Student, ddl = degré de liberté, d = taille de l'effet, p = probabilité de dépassement (seuil d'incertitude à 5%). *p<.05, **p<.01.

Mémoire à long terme visuo-spatiale

Dans cette tâche, nous mesurons plusieurs variables ; les variables d'apprentissages, appelées « Hebb » et les variables distractrices, appelées « MCT » où nous supposons que les enfants dyscalculiques rencontrent plus de difficulté dans l'apprentissage d'une séquence visuo-spatiale.

Ainsi, les dyscalculiques devraient être davantage en difficulté aux variables Hebb, d'autant plus pour celle tenant compte de l'ordre.

Concernant les variables « MCT », elles correspondent au même type de tâche que celles de la mémoire à court terme visuo-spatiale séquentielle. Nous attendons également plus de difficulté chez les dyscalculiques.

L'analyse des résultats du test t appliqué aux mesures « Hebb » montre une différence significative entre les deux groupes pour les variables Hebb total ($t(34) = 3.405$, $p = .002$, $d = 1.135$) et Hebb ordre ($t(34) = 4.934$, $p < .001$, $d = 1.645$). En revanche, aucune différence n'est relevée pour la mesure Hebb item ($t(34) = 1.595$, $p = .120$, $d = 0.532$). Concernant les mesures « MCT », les résultats du test t montrent une différence significative pour la variable « MCT ordre » ($t(34) = 4.638$, $p < .001$, $d = 1.561$) et une absence d'effet pour « MCT item ». Le test de Student ne peut être réalisé sur la variable « MCT total » car les scores de tous les participants sont de 0.

Ces résultats concordent partiellement avec nos hypothèses puisque les dyscalculiques présentent des performances faibles aux variables « Hebb total » et « Hebb ordre ». Cependant, ils présentent des performances identiques au groupe contrôle pour la variable « Hebb item ». Il en est de même pour les résultats aux variables « MCT » ; pour la variable « ordre », les dyscalculiques présentent de moins bonnes performances. En revanche, pour les variables « item » et « total », les deux groupes présentent des performances identiques. Nous reviendrons sur ces résultats dans la partie discussion.

Tableau 8 : Statistiques paramétrique : Test t de Student pour échantillon indépendant, appliqué à la tâche de mémoire à long terme visuo-spatiale.

Variables	Groupes				Test T pour échantillon indépendant (N = 36)			
	Groupe DYS		Groupe CTL		t	ddl	p	d
	M	E-T	M	E-T				
Hebb total	0.056	0.236	1.556	1.854	3.405	34	.002**	1.135
Hebb ordre	12.611	8.719	30.000	12.146	4.934	34	<.001**	1.645
Hebb item	30.883	5.544	35.056	9.771	1.595	34	.120	0.532
MCT total	0	0	0	0	/	/	/	/
MCT ordre	5.778	4.466	13.278	5.120	4.638	34	<.001**	1.561
MCT item	25.056	4.318	27.556	4.133	1.774	34	.085	0.591

MCT = mémoire à court terme, DYS = dyscalculiques, CTL = contrôles, M = moyenne, E-T = écart-type, t = statistique de Student, ddl = degré de liberté, d = taille de l'effet, p = probabilité de dépassement (seuil d'incertitude à 5%). * $p < .05$, ** $p < .01$.

Présence d'un effet d'apprentissage ?

Nos deux groupes diffèrent significativement pour deux variables « Hebb », mais nous ne savons pas dans quelle mesure nos groupes effectuent ou non un apprentissage. Pour vérifier s'il existe un effet principal de l'apprentissage, nous réalisons une analyse de variance (ANOVA) à mesures répétées sur les scores de nos 6 mesures (Hebb 1, Hebb 2, ..., Hebb 6) x 2 groupes (dyscalculique vs contrôle). Cette analyse montre l'existence d'un effet d'apprentissage significatif, $F(5,80) = 4.021$, $p = .003$, $\eta^2 = 0.025$, révélant que tous les participants font un apprentissage au cours de la tâche. Cependant, si l'ANOVA est appliquée uniquement aux variables apprentissages du groupe dyscalculique, nous observons l'absence d'effet d'apprentissage, $F(5,80) = 0.843$, $p = .523$, $\eta^2 = 0.023$. Alors qu'il existe bien un effet significatif pour le groupe contrôle $F(5,80) = 3.577$, $p = .002$, $\eta^2 = 0.072$. Autrement dit, il n'y a pas d'effet principal de la variable apprentissage car les deux groupes n'en bénéficient pas. En revanche, un effet simple d'apprentissage est présent pour le groupe contrôle. De plus, nous observons un effet significatif du groupe, $F(1,16) = 30.002$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.302$, indiquant que les participants dyscalculiques obtiennent de moins bons résultats que les participants contrôles. Toutefois, il n'y a pas d'interaction entre l'apprentissage et le groupe, $F(5,80) = 1.081$, $p = 0.377$, $\eta^2 = 0.009$, signifiant que les 2 groupes suivent la même courbe d'apprentissage (cf Figure 2).

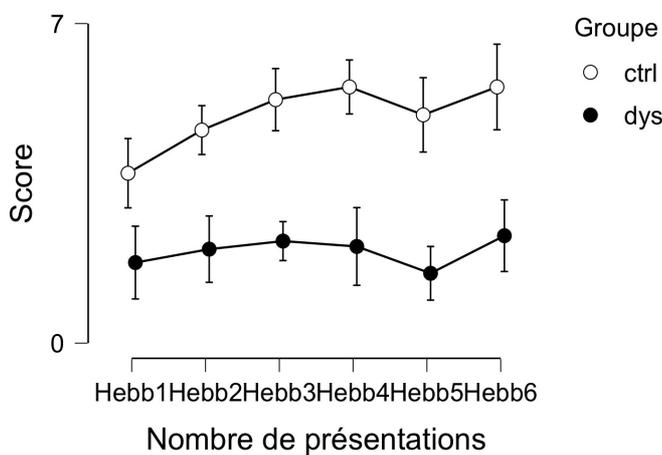


Figure 2 : ANOVA à mesures répétées examinant l'effet d'apprentissage au cours des essais, pour les 2 groupes. CTRL=contrôles, DYS=dyscalculiques

Tableau 9 : Statistiques descriptives : Moyennes et écart-types des 2 groupes aux différents essais de la tâche mémoire à long terme visuo-spatiale.

Variable Apprentissage	Groupe	Moyenn e	Ecart-type
Hebb 1	Dyscalculie	1.765	1.855
	Contrôle	3.706	1.896
Hebb 2	Dyscalculie	2.059	2.135
	Contrôle	4.588	2.210
Hebb 3	Dyscalculie	2.235	1.715
	Contrôle	5.235	2.682
Hebb 4	Dyscalculie	2.118	2.261
	Contrôle	5.529	2.095
Hebb 5	Dyscalculie	1.529	1.328
	Contrôle	4.824	3.046
Hebb 6	Dyscalculie	2.353	1.998
	Contrôle	5.471	2.672

4 – Analyse de corrélations

Plusieurs analyses de corrélations sont réalisées pour comparer nos résultats à ceux déjà obtenus dans la littérature. L'objectif reste le même ; élargir les connaissances sur la relation entre les compétences numériques et les habiletés visuo-spatiales.

Pour ces analyses, le test R de Pearson est utilisé pour déterminer s'il y a une corrélation entre les variables, cette hypothèse est rejetée si la valeur p est inférieure à 5% ($p < .05$).

4.1 Estimations numériques et compétences mathématiques

Selon les données de la littérature, la précision de l'estimation numérique est corrélée avec les compétences mathématiques. Donc, nous nous attendons à obtenir ce même type de résultat.

L'analyse des corrélations met en évidence des corrélations significatives principalement entre toutes les variables d'estimations numériques et les tâches de fluences (additions, soustractions et multiplications), excepté pour la sous estimation des lignes de 0 à 100 et les multiplications. Toutefois, ce score est quasiment significatif : $r = 0.325$, $p = .053$. Les corrélations significatives sont négatives pour les scores totaux et les sur estimations alors que les corrélations sont positives pour les sous estimations. Ces résultats sont en accord avec notre hypothèse ; plus les enfants auront de mauvaises performances aux tâches de fluences, moins ils seront précis dans l'estimation numérique et ils auront tendance à la sur estimation. Et plus les enfants auront de bonnes performances en fluences, plus ils auront tendance à sous estimer le placement du nombre dans les tâches d'estimations numériques.

Cependant, une seule corrélation est observée entre le test du TTR et l'estimation numérique total pour les lignes allant de 0 à 1000. Celle-ci est négative, indiquant que plus les enfants ont des performances faibles au TTR, moins ils seront précis dans le placement de nombres pour les lignes de 0 à 1000.

Tableau 10 : Corrélation de Pearson entre les tâches d'estimations numériques et les tâches de fluences mathématiques.

		EN : 0-100	Sur-estimation	Sous-estimation	EN 0-1000	Sur-estimation	Sous-estimation
TTR	Pearson's r	-0.409	-0.281	0.311	-0.584	-0.281	0.296
	p	.059	.205	.159	.004**	.204	.180
Additions correctes	Pearson's r	-0.571	-0.502	0.506	-0.684	-0.483	0.493
	p	<.001**	.002**	.002**	<.001**	.003**	.002**
Soustractions correctes	Pearson's r	-0.535	-0.427	0.408	-0.616	-0.387	0.391
	p	<.001**	.009**	.013*	<.001**	.020*	.018*
Multiplications correctes	Pearson's r	-0.427	-0.340	0.325	-0.557	-0.393	0.392
	p	.009**	.042*	.053	<.001**	.018*	.018*

TTR = Tempo Test Reneken, EN = estimation numérique, p = probabilité de dépassement (seuil d'incertitude à 5%). *p<.05, **p<.01.

4.2 Capacités visuo-spatiales et estimation numériques

Rappelons que les études précédentes montraient une corrélation entre les capacités de rotation mentale et l'estimation numérique. Ainsi, nous pensons obtenir ce même type de corrélation pour ces mêmes variables. Nous étendons également nos analyses de corrélations à toutes nos variables visuo-spatiales, afin d'examiner l'éventualité d'autres corrélations.

Tout d'abord, au niveau des tâches visuo-perceptives (enchevêtrement et VMI), l'analyse de corrélation montre que la relation entre la tâche d'enchevêtrement et tous les scores des estimations numériques sont significatifs (cf Tableau 10). Le coefficient de corrélation de Pearson souligne que la corrélation est négative pour les variables des scores totaux des estimations numériques et aux scores de sur-estimation. Alors qu'elle est positive pour les scores de sous estimations.

De plus, l'analyse des coefficients de corrélations au VMI montre une corrélation significative avec les variables des scores totaux aux estimations numériques (« EN 0-100 et EN 0-1000). Celles-ci sont négatives. Ainsi, plus les enfants présentent de faibles performances à l'enchevêtrement et au VMI, plus leurs difficultés à être précis dans la tâche d'estimation numérique sera marquée, avec notamment une surestimation plus importante (donc un décalage vers la droite sur la ligne numérique).

Quant aux tâches visuo-spatiales et celle visuo-constructive, les coefficients de corrélation de Pearson révèlent des corrélations négatives significatives entre les variables des scores totaux de l'estimation numérique et le nombre de réponses correctes aux tâches de localisation, de rotation mentale et à la construction des cubes. Cette analyse des corrélations montre également des corrélations négatives significatives au niveau du score de la localisation et des scores de surestimation (pour les lignes de 0 à 100 et pour celles de 0 à 1000). Ces différents résultats indiquent que moins un enfant est performant aux tâches de localisation, de rotation et de cubes, plus sa réponse s'éloignera de la réponse attendue en tâche d'estimation numérique. En outre, avec la significativité des résultats entre la surestimation et la localisation, plus les enfants auront de faibles scores en localisation, plus ils auront tendance à surestimer leur réponse par rapport à ce qui est attendu.

Tableau 11 : Corrélation de Pearson entre les tâches d'estimations numériques et les tâches visuo-spatiales.

		EN : 0-100	Sur-estimation	Sous-estimation	EN 0-1000	Sur-estimation	Sous-estimation
Enchevêtrement	Pearson's r	-0.344	-0.435	0.458	-0.466	-0.338	0.336
	p	.040*	.008**	.005*	.004**	.044*	.045*
VMI total	Pearson's r	-0.535	-0.260	0.254	-0.410	-0.298	0.296
	p	<.001**	.126	.134	.013*	.078	.080
VMI temps	Pearson's r	0.104	0.308	-0.348	0.079	0.140	-0.151
	p	.545	.068	.037*	.649	.414	.380
Localisation total	Pearson's r	-0.638	-0.356	0.322	-0.470	-0.424	0.409
	p	<.001**	.033*	.055	.004**	.010*	.013*
Rotation total	Pearson's r	-0.443	-0.199	0.187	-0.387	-0.328	0.312
	p	.007**	.243	.275	.020*	.051	.064
Cubes	Pearson's r	-0.490	-0.190	0.222	-0.525	-0.269	0.283
	p	.002**	.268	.192	.001**	.113	.095

VMI = Visual Perceptual Subtest, EN = estimation numérique, p = probabilité de dépassement (seuil d'incertitude à 5%). *p<.05, **p<.01.

5 – Analyse qualitative des compétences visuo-spatiales chez les dyscalculiques

Dans cette partie, il s'agit d'explorer plus qualitativement les résultats obtenus aux tâches visuo-spatiales, chez les participants dyscalculiques uniquement. L'objectif étant d'examiner s'il existe également une variabilité des profils dans ce domaine, ou bien, si tous les participants ont des difficultés dans des tâches spécifiques.

Nous examinons surtout les variables qui différencient nos patients dyscalculiques des contrôles : le score au questionnaire, au VMI, le score et le temps à la tâche de localisation, le score en rotation mentale, les Matrices de Raven, la mémoire à court terme visuo-spatiale (séquentielle et simultanée) et quelques scores de la mémoire à long terme visuo-spatiale (notamment « hebb ordre »). Nous prendrons également en compte la tâche des cubes, car bien qu'elle ne différencie pas nos groupes, les bilans peuvent être pertinents.

Tout d'abord, au questionnaire, nous constatons que les dyscalculiques présentent des scores relativement éparpillés ; 27,7% obtiennent un score entre 30 et 39, 22,2% entre 40 et 49, 38,8% entre 50 et 59 et 11,1% un score égal ou supérieur à 60. Ainsi, le questionnaire à lui seul ne permet pas de démontrer que les dyscalculiques manifestent des difficultés au niveau visuo-spatial.

En ce qui concerne le score total au VMI, 77,7% des dyscalculiques obtiennent un score dans le tiers supérieur par rapport au score maximal possible (de 30). Autrement dit, ils ont un score entre 21 et 30. Seulement 3 d'entre eux obtiennent un score entre 11 et 20, et un seul inférieur à 10. Si l'on s'attarde sur les erreurs, notons qu'il y a principalement 2 profils d'erreurs qui se dégagent : ceux qui font relativement le même nombre d'erreurs spatiales et perceptives (44,4%) et ceux qui font plus d'erreurs perceptives (50%). Un seul participant ne commet que des erreurs spatiales et aucune perceptive, c'est d'ailleurs un de ceux qui produit le plus d'erreurs spatiales -6 erreurs- (alors que les autres en font entre 1 et 3).

A la tâche de localisation, la majorité des dyscalculiques (55,5%) obtient des scores entre 21 et 30, deux d'entre eux (11,1%) un score se situant entre 11 et 20 et les six autres (33,3%) entre 31 et 40 (le score maximal étant de 40). Concernant les temps de latence, nous relevons que le plus rapide est aussi celui qui obtient le score le plus faible. Certains participants plus lents à répondre font partie de ceux commettant le moins d'erreurs. De nouveau, ici, une dispersion des scores et des erreurs ne permettent pas de conclure que tous les dyscalculiques ont des difficultés à cette tâche. Toutefois, nous pouvons relever que la plupart d'entre eux montrent des scores inférieurs à 30.

Au niveau de la rotation mentale, 11,1% des participants ont un score se situant entre 0 et 11, 72,2% un score entre 12 et 22 et 16,6% un score entre 23 et 30 (score maximal de 30). De nouveau, les scores sont assez éparses et les participants les plus lents ne sont pas nécessairement ceux qui réussissent le mieux ; le fait de mettre plus de temps à répondre ne semble pas aider à mieux réussir.

Ensuite, concernant les cubes, un seul participant obtient un score inférieur à 9, la majorité (77,7%) obtient entre 10 et 19 et 3 participants entre 20 et 24 (score maximal de 28).

Enfin, aux Matrices de Raven, la majorité des participants (55,5%) obtient un score appartenant au tiers supérieur, donc un score entre 25 et 36 et le reste des participants (44,4%) entre 13 et 24. Toutefois, ces pourcentages ne sont pas très représentatifs. Alors, chaque participants a été comparés aux normes de ce test, selon l'âge. Ainsi, 27,7% obtiennent un score dans la moyenne, 55,5% un score faible, 11,1% un score déficitaire, et un participant est hors norme (âge supérieur aux normes). Donc, 2/3 des participants dyscalculiques n'obtiennent pas un score dans la norme.

En ce qui concerne le domaine mnésique, en mémoire de travail visuo-spatiale simultanée, 2 participants (11,1%) obtiennent un score inférieur ou égal à 60 et 5 d'entre eux (22,2%) un score supérieur à 100 (score maximal de 120). La majorité (66,6%) obtient entre 70 et 100. Ici encore, les scores sont relativement éparpillés. Au niveau de la mémoire de travail visuo-spatial séquentielle, 11 participants (61,1%) ont un score inférieur à la moitié du score maximal, soit inférieur à 60. Ainsi, 38,8% un score supérieur, sachant que le score maximal obtenu est de 79. Comparé aux contrôles, dont le score minimal est de 62 et le score maximal de 102. Enfin, au niveau de la mémoire à long terme visuo-spatiale, et notamment de la variable « Hebb ordre », 44,4% obtiennent un score se situant entre 0 et 10, 27,7% entre 11 et 20 et 27,7% entre 21 et 26 (sachant que le score maximal est de 48). Alors que le score le plus faible chez les contrôles est de 10. Certains dyscalculiques montrent beaucoup de difficulté pour cette tâche, mais de nouveau, les résultats sont variables.

Finalement, à travers ces différentes tâches, aucune ne permet de dégager plus de difficultés chez les dyscalculiques, car pour chacune de ces tâches, les scores sont assez variables. Toutefois, on peut relever que 2 participants obtiennent les scores les plus faibles dans presque toutes les tâches présentées : VMI, localisation, rotation, cubes et les tâches mnésiques. Cependant, aucun participant n'obtient les meilleures performances dans chaque test. Ainsi, les dyscalculiques ne présentent pas un « profil type » de difficulté visuo-spatiale ; leurs profils sont très variables.

Discussion

L'objectif de cette étude consiste en l'investigation des compétences visuo-spatiales chez les enfants atteints de dyscalculie, afin d'enrichir les connaissances sur le profil de ces enfants. Ainsi, une meilleure compréhension et appréhension des divers processus spatiaux impliqués dans les habiletés numériques permettra notamment de proposer la prise en charge la plus efficace possible, adaptée aux difficultés du patient dans la mesure où chacun présente un profil spécifique. Lors de cette recherche, nous avons évalué de jeunes enfants (dyscalculiques et contrôles) via diverses tâches permettant de rendre compte de leurs compétences numériques, visuo-spatiales, attentionnelles, mnésiques, mais aussi de leurs habiletés en raisonnement verbal et non verbal.

1 – Analyse des résultats

Le raisonnement verbal

Le résultat obtenu à cette tâche (EVIP) concorde avec l'hypothèse de départ ; pas de différence significative entre nos deux groupes. Par conséquent, cette mesure se révèle être un bon choix pour l'appariement de nos groupes car ils ne se distinguent pas au niveau verbal, en vocabulaire réceptif.

Les compétences arithmétiques

En ce qui concerne les différentes tâches de fluences, elles permettent de différencier les deux groupes. En effet, toutes les mesures du nombre de réponses correctes (au TTR, en additions, en soustractions et en multiplications) montrent une différence significative, concordant avec notre hypothèse ; les dyscalculiques manifestent des difficultés dans la résolution d'opérations (additions, soustractions). Mais, ils ne commettent pas plus d'erreurs que les participants contrôles, ils sont plus lents dans la procédure de résolution. Ce fait s'explique par l'utilisation de stratégies plus laborieuses et immatures puisqu'elles sont de type « counting all » (« 3+3 », compte « 1, 2, 3 » puis rajoute « 4, 5, 6 ») ou « counting on » (« 1+7 », prend 1 et compte pour ajouter 7). La plupart des dyscalculiques utilisent également leurs doigts pour effectuer les opérations. Notons également que les faits arithmétiques sont souvent méconnus. Dans ce cas, la plupart utilisent des stratégies de comptage (additions répétées) avec ou sans les doigts, ou posent même les opérations à l'écrit.

En outre, nous relevons également que 3 des participants n'ont pas effectué la partie « divisions » du TTR car le principe des divisions était encore méconnu car non étudié. Cependant, puisqu'aux autres tâches de fluences, le groupe expérimental présente des difficultés, ces mesures permettent bien de différencier nos deux groupes.

Pour les tâches d'estimation numérique, les analyses statistiques ne concordent pas avec notre hypothèse ; les deux groupes ont des performances similaires. Ces résultats ne concordent pas non plus avec les données issues de la littérature (Schneider et al. 2018 ; Sella et al. 2006), qui observait que les participants à difficultés mathématiques montraient moins de précision dans leurs estimations. Ces résultats peuvent probablement s'expliquer par plusieurs points. D'une part, l'âge de nos participants est assez élevé, la moyenne du groupe dyscalculique est de 9 ans et 7 mois. Or, plus les enfants avancent en âge, plus leur représentation de la ligne numérique mentale est linéaire et précise. Ainsi, vers 9-10 ans, ils ont une représentation linéaire d'une ligne de 0 à 1000, leur permettant d'être plus précis dans leurs estimations (Booth & Siegler, 2006 ; Siegler & Booth, 2004). D'autre part, il est important de rappeler que la majorité des dyscalculiques testés sont également suivis pour une rééducation en logopédie. Par conséquent, puisque certaines logopèdes travaillent sur l'estimation numérique à partir de droites graduées avec les dyscalculiques, il n'est pas étonnant qu'ils aient des performances similaires aux participants contrôles. Des études confirment que les estimations numériques s'améliorent si elles sont exercées chez les dyscalculiques (Kucian et al. 2011). D'ailleurs, nous observons l'utilisation de stratégies leur permettant de proposer une réponse proche de la réponse attendue, comme situer d'abord le milieu de la ligne.

Le questionnaire visuo-spatial

Les retours du questionnaire soumis au parent (ou tuteur) révèlent une différence significative entre les deux groupes. Ainsi, l'utilisation de ce questionnaire peut se révéler être un indicateur de l'implication de processus visuo-spatiaux chez les enfants atteints d'une dyscalculie. Nous avons précédemment relevé plusieurs items pour lesquels les jeunes dyscalculiques se distinguent des jeunes sans difficultés. En accord avec nos hypothèses et les résultats qui suivent, nous remarquons que ces items montrent davantage de difficultés au niveau de tâches impliquant des compétences visuo-spatiales (items 1, 4, 16, 26). Plus spécifiquement, les items révèlent moins d'habiletés dans la localisation et l'orientation d'éléments ; de lignes, d'objets, de l'enfant lui-même,

dans l'environnement. Les autres items impliquent plutôt des compétences visuo-perceptives, comme la reconnaissance de lettres ou la lecture (items 17 et 30).

Ces résultats peuvent refléter la présence d'une dyslexie, car la dyscalculie est souvent associée à d'autres troubles (Lewis, 1994, cité par Inserm, 2007). Et, il se trouve que dans notre étude, presque la moitié des participants dyscalculiques testés présentaient également une dyslexie. Il serait par ailleurs profitable d'estimer l'influence de la présence de la dyslexie sur ce questionnaire afin de préciser quels items concernent uniquement les patients présentant une dyscalculie. Mais, pour cela, un échantillon plus conséquent est nécessaire.

Les compétences visuo-spatiales

Concernant ces tâches, et notamment au niveau visuo-perceptif, les résultats montrent une différence significative dans la tâche de VMI alors qu'aucune différence à la tâche d'enchevêtrement n'apparaît. Donc, ces résultats présentent une hétérogénéité dans des tâches qui évaluent pourtant le même domaine. Ils ne concordent ni avec notre hypothèse, ni avec l'étude précédente de McCaskey et al. (2017), qui ne trouvait pas de différence au niveau visuo-perceptif. Toutefois, dans cette étude, les tâches visuo-perceptives proposées semblaient simples : perception de longueur, de taille et de position. Or, nos résultats peuvent probablement s'expliquer par la divergence de complexité des 2 tâches. En effet, dans la tâche d'enchevêtrement, l'enfant doit « simplement » retrouver les figures entremêlées. Celles-ci sont élémentaires car bien connues des enfants (« échelle », « grenouille », « cuillère »), qui obtiennent des résultats plutôt élevés (dyscalculiques ou non). En effet, les moyennes obtenues par les deux groupes sont proches du score maximal. Par conséquent, cette tâche semble faire l'objet d'un effet plafond. Tandis que pour le test du VMI, l'exercice s'avère plus complexe ; retrouver la figure cible parmi plusieurs possibilités. Dans cette tâche, les figures proposées sont plus complexes, avec des éléments géométriques et ne représentant pas toujours des éléments connus. De plus, les dyscalculiques commettent plus d'erreurs perceptives que spatiales, alors que nous pouvions supposer un résultat contraire.

Cependant, d'autres recherches ont montré que l'appariement de figures était lié à certaines tâches mathématiques, comme la comparaison de numérosité (Zhou, Wei, Zhang, Cui & Chen, 2015). Autrement dit, plus les participants obtenaient de bonnes performances en mathématiques, plus les scores à la tâche d'appariement de figure étaient élevés. De plus, une étude récente de Cheng, Xiao, Chen, Cui et Zhou (2018) révèle l'existence de trouble visuo-perceptif commun chez les enfants présentant des troubles dyslexiques ou des troubles dyscalculiques (ou les deux).

Comme sus-mentionné, la plupart de nos participants présentent une dyscalculie et une dyslexie. Par conséquent, il est également possible que de telles difficultés se révèlent dans le test du VMI, particulièrement complexe.

En accord avec cette étude, nos participants présentent probablement des difficultés dans l'analyse et l'intégration d'informations visuelles. Néanmoins, restons vigilant quant à ce postulat puisque nos participants réussissent l'épreuve d'enchevêtrement d'une part. D'autre part, ils sont nombreux à présenter des troubles visuels ; ils sont corrigés mais peuvent également intervenir.

Quant aux tâches visuo-spatiales plus complexes, les résultats obtenus montrent que les deux groupes diffèrent dans les tâches de localisation et de rotation mentale. Ainsi, ils sont en accord avec notre hypothèse et les données issues de la littérature (Thompson et al. 2013). Par conséquent, la conclusion est qu'il est plus difficile pour les dyscalculiques de manipuler des informations visuelles sous différents angles. Toutefois, notre groupe expérimental montre également une atteinte visuo-perceptive au test du VMI. Dès lors, les difficultés des participants aux tâches visuo-spatiales complexes peuvent aussi être dues à ce trouble visuo-perceptif (Schmetz & Rousselle, 2016). En effet, si l'intégration des informations visuelles n'est pas fonctionnelle, les participants éprouvent des difficultés à manipuler ces informations.

En s'attardant sur le temps de réalisation de ces tâches, nous observons que les dyscalculiques sont significativement plus rapides que les contrôles à la tâche de localisation. En outre, même si ce constat n'est pas significatif, nous observons également qu'ils sont plus rapides que le groupe contrôle dans les tâches de VMI et de rotation mentale. Donc, les dyscalculiques commettent plus d'erreurs et sont plus rapides, mais il est difficile d'en cerner les causes. En effet, des difficultés dans l'utilisation de stratégies spatiales ou bien un défaut d'inhibition peuvent l'expliquer. De fait, nous avons relevé dans la littérature, que les dyscalculiques peuvent présenter un défaut d'inhibition, associé à une sensibilité à l'interférence dans des tâches arithmétiques (Barouillet et al. 1997 ; De Visscher & Noël, 2014). Or, dans les tâches présentées ici, les participants ont le choix entre différentes propositions, ainsi, l'interférence est plus ou moins importante.

Pour ce qui est de la tâche visuo-constructive (les cubes), nos résultats ne concordent pas avec notre hypothèse. Nous attendions en effet une atteinte de ce processus, tout comme dans l'étude de McCaskey et al (2017).

Ce résultat est assez inattendu car cette tâche fait intervenir des représentations mentales complexes. De plus, les compétences visuo-constructives dépendent des habiletés perceptives et visuo-spatiales car il est nécessaire d'avoir une bonne représentation visuelle de l'objet et de pouvoir effectuer des rotations mentales, puis motrices sur celui-ci (Schmetz & Rouselle, 2016). Or nos résultats précédents établissent justement une atteinte dans les tâches impliquant les habiletés visuo-perceptives et visuo-spatiales.

De plus, si l'on s'attarde sur la valeur du p obtenue ($p = .054$), elle n'est pas significative, mais très proche du seuil d'incertitude ($p < .050$). Comme notre échantillon est petit, il est probable que des variables interindividuelles entrent en jeu et ne permettent pas de rendre compte de résultats suffisamment fiables. Donc, un échantillon plus important serait nécessaire pour vérifier la réplication des résultats.

Pour le raisonnement non verbal (matrices de Raven), comme attendu, les résultats indiquent des performances inférieures pour le groupe expérimental. Ces résultats sont en accord avec notre hypothèse et avec la littérature. En effet, la réalisation de cette tâche est sous tendue par des processus spatiaux (DeShon, Chan & Weissbein, 1995), et ces habiletés font défaut chez les dyscalculiques (tâche de localisation, de rotation mentale). Ainsi, la mise en relation d'informations s'avère plus complexe pour les dyscalculiques, notamment lorsque ces informations sont spatiales.

Les compétences attentionnelles

Dans ce domaine, aucune différence significative n'est relevée entre les deux groupes. Ainsi, comme attendu, les enfants dyscalculiques n'éprouvent pas plus de difficultés que les contrôles dans les tâches impliquant le déplacement du foyer attentionnel. Ces données concordent avec la littérature actuelle, montrant que les dyscalculiques n'ont pas d'atteinte dans l'orientation de leur attention (Askenazi & Henik, 2010). Ainsi ces données permettent de conclure que ce n'est pas un problème d'orientation de l'attention qui entraîne des difficultés au niveau mathématiques, contrairement à ce que montre certains auteurs (Anobile et al. 2013). Toutefois, nous n'avons évalué que la partie « déplacement du foyer attentionnel » non décrite comme atteinte chez les dyscalculiques, tandis que nous n'avons pas évalué l'attention de type alerte. Or, des auteurs montraient une atteinte spécifique de ce processus dans la population dyscalculique (Askenazi & Henik, 2010 ; Gliksman & Henik, 2019). Il serait intéressant d'évaluer plus largement les compétences spatiales chez les dyscalculiques, notamment au niveau de l'attention de type alerte.

Les compétences mnésiques

Comme attendu, les enfants dyscalculiques présentent de moins bonnes performances que les contrôles, indépendamment du type de mémoire de travail visuo-spatiale (simultanée ou séquentielle). Ces résultats sont également en accord avec la littérature actuelle (Mammarella et al. 2018 ; Szucs et al. 2013), ce qui, par conséquent, confirme que la mémoire de travail visuo-spatiale est nécessaire dans les compétences numériques.

En outre, dans ces tâches, nos résultats révèlent également que les dyscalculiques présentent des difficultés dans le rappel d'informations sérielles (rappel de l'ordre) mais également dans le rappel d'informations items (rappel uniquement de la position). Ainsi, nos résultats ne concordent pas avec ceux d'Attout et Majerus (2015) qui n'avaient observé qu'une atteinte « sérielle » de la mémoire de travail chez les dyscalculiques. Cependant, dans leur étude, ils utilisent des tâches verbales, et non visuo-spatiales. Ainsi, il est probable que la modalité de présentation implique une difficulté plus importante et se répercute sur le rappel « ordre » et « item ». Toutefois, rappelons que nos participants présentent également des difficultés visuo-perceptives (VMI), il est alors possible que ce facteur intervienne.

Mais, de manière contradictoire, nous n'obtenons pas de différence significative à la variable « MCT item » de la tâche évaluant la mémoire à long terme. Alors que, cette variable, évalue également la mémoire de travail visuo-spatiale séquentielle sur le versant « item » (car c'est la variable « distracteur », ne permettant pas d'apprentissage). Soit nous pouvons expliquer ces données par le fait que cette tâche ait également mis en difficulté les participants contrôles car il fallait rappeler 8 informations. Or, la capacité de stockage de la mémoire de travail est d'environ 3-4 informations chez un enfant. Par conséquent, les enfants contrôles et les enfants dyscalculiques peuvent être en difficulté par le nombre d'informations présentées. Soit, notre échantillon est trop petit pour mettre en évidence un effet significatif, d'autant que pour la « MCT item », la valeur de p ($p = .085$) est relativement proche du seuil de dépassement.

Concernant la modalité de présentation de la tâche, elle est importante puisque les informations sont mieux rappelées lorsqu'elles sont structurées chez tous les participants. Ces résultats concordent avec la littérature actuelle pour les participants contrôles (Imbo, Szmalec & Vandierendock, 2009). Néanmoins, aucune étude ne s'est penchée sur cette problématique chez les patients dyscalculiques. Par conséquent, prendre en compte la structure des items présentés à ces patients est nécessaire, puisque des informations visuo-spatiales structurées les aident dans l'encodage.

Ensuite, les résultats obtenus à l'apprentissage en mémoire à long terme visuo-spatiale indiquent que les dyscalculiques sont moins performants, notamment lorsque l'ordre est pris en compte. En revanche, ils ont des performances égales aux contrôles lorsque l'on considère uniquement les « items ». Autrement dit, alors que les contrôles effectuent un apprentissage de la position et de l'ordre des éléments. Les dyscalculiques, eux, n'effectuent qu'un apprentissage de la position des éléments, mais pas de l'ordre de présentation. Ces données peuvent expliquer les difficultés des dyscalculiques dans les apprentissages numériques puisque l'aspect sériel est nécessaire pour l'acquisition de la chaîne numérique orale ou encore pour le calcul mental. Effectivement, en plus de retenir les opérands présentées, il est primordial de retenir l'ordre dans lequel elles sont énoncées. Ces résultats sont en accord avec la littérature actuelle (Attout et Majerus, 2015 ; Mammarella et al. 2018) et apportent également des renseignements supplémentaires. En effet, si De Visscher et al. (2015) montraient une difficulté de rétention d'informations sérielles verbales chez les dyscalculiques. Nous pouvons ajouter que ces patients montrent également davantage de difficulté dans la rétention d'informations sérielles visuo-spatiales ; les difficultés d'apprentissage sériel des dyscalculiques semblent être amodales.

De plus, nos analyses statistiques révèlent la présence d'un effet principal d'apprentissage ; en effet, les deux groupes bénéficient d'un apprentissage. Mais, les participants dyscalculiques sont nettement plus en difficulté que les contrôles ; il ne peuvent retenir autant d'informations (item et sériel). Par conséquent, ils retiennent principalement la position des items, mais pas l'ordre. Ces données sont en accord avec la littérature actuelle (Attout & Majerus, 2015).

L'estimation numérique, une compétence multi-déterminée.

Les résultats obtenus dans nos analyses de corrélations sont en accord avec la littérature actuelle. En effet, nous obtenons une corrélation significative entre l'estimation numérique et les compétences mathématiques évaluées par les tâches de fluence (Sella et al. 2016 ; Schneider et al. 2018). Ces données signifient que plus les compétences numériques sont faibles, plus l'estimation numérique sera imprécise. De plus, le sens des corrélations (négatives ou positives) révèlent également que plus les performances de fluence sont faibles, plus les participants ont tendance à sur estimer le placement du nombre. Et inversement, plus les participants présentent de bonnes performances en fluence, plus ils auront tendance à sous estimer le placement du nombre. Par conséquent, on aurait pu s'attendre à une sur estimation de la part des contrôles.

Nous constatons ces résultats aux diverses tâches de fluences. En revanche, au test TTR, nous n'obtenons pas de corrélation uniquement avec l'estimation numérique des lignes allant de 0 à 100. Toutefois, l'analyse de la valeur du p obtenue ($p = .059$) est proche du seuil d'incertitude. De nouveau, nous pouvons supposer qu'auprès d'un échantillon plus conséquent, les résultats au TTR seraient similaires aux autres tâches de fluence numérique.

Une corrélation significative entre l'estimation numérique et les habiletés visuo-spatiales est également observée, ces données sont en accord avec les études actuelles (Thompson et al. 2013). De plus, nous observons également une corrélation avec les tâches visuo-perceptives et visuo-constructives. Ces corrélations sont négatives entre les scores totaux des tâches spatiales et les scores totaux ainsi que les sur estimations. Ces données indiquent que plus les participants ont des faiblesses dans les tâches spatiales, moins ils seront précis dans leurs estimations, avec une tendance à sous estimer.

Par conséquent, l'existence de ces corrélations met en évidence des données mentionnées dans la littérature ; la représentation de cette ligne numérique est multi-déterminée. Elle dépend à la fois de compétences mathématiques et visuo-spatiales efficaces (Sella et al. 2016).

Ainsi, même si nous n'obtenons pas de différence significative entre nos groupes aux tâches d'estimations, les capacités numériques et visuo-spatiales des enfants influencent leurs performances à la tâche d'estimation. D'ailleurs, Cheng et Mix (2014) suggèrent que l'exercice à la rotation mentale permettrait à l'enfant de mieux faire pivoter les informations numériques dans des tâches de type « problèmes ». Ainsi, nous pouvons également supposer ici que les participants possédant de meilleures compétences à situer les éléments les uns par rapport aux autres (localisation), et à les manipuler (rotation, tâche des cubes), peuvent les aider pour à placer correctement un nombre sur une droite.

2 – Limites

Plusieurs limites peuvent être mentionnées dans cette recherche.

Tout d'abord concernant notre échantillon contrôle ; nous n'avons pas pu le compléter afin d'effectuer l'appariement souhaité. Ceci est dû à l'apparition d'une épidémie, entraînant des restrictions sanitaires. Par conséquent, nous n'avons pas mené à bien le recrutement des participants contrôles. Ainsi, l'appariement de nos deux groupes n'est pas aussi précis que nous l'aurions voulu. Les participants ont bien été appariés en niveau scolaire et en latéralité. Toutefois, nous aurions souhaité avoir un appariement des scores de l'EVIP plus proches entre nos deux groupes.

Ensuite, la taille de notre échantillon ne permet pas d'avoir des données suffisamment solides pour émettre des conclusions générales. En effet, avec 18 participants dans chacun des groupes, il est probable que des variables inter-individuelles impactent nos résultats. D'autant que nous exposons dans la partie théorique que les dyscalculiques présentent justement des profils très variés. De plus, nous avons également rendu compte de l'hétérogénéité des difficultés au niveau visuo-spatiales ; les profils des participants dyscalculiques sont très éparpillés, chaque participant ne montre pas systématiquement plus de difficultés dans une tâche. En outre, notre échantillon est principalement composé de filles, alors que Devine et al. (2013) montraient l'absence d'un effet de sexe au sein de cette population. C'est pourquoi, la réalisation du même type de tâche avec un échantillon plus large est nécessaire afin d'obtenir des résultats plus robustes et représentatifs de la population atteinte de dyscalculie.

Cependant, notre étude permet l'exploration des compétences visuo-spatiales dans le sens large, avec des tâches variées au niveau spatial (visuo-perceptif, visuo-constructif et visuo-spatiale) et dans l'implication d'autres processus ; mnésique et attentionnel. De plus, elle confirme également l'hétérogénéité des profils des patients dyscalculiques au sein du domaine visuo-spatial, qui était jusqu'alors, peu examiné.

Une autre limite que l'on peut relever concerne la tâche attentionnelle. En effet, un problème informatique lors de la réalisation et l'encodage de cette tâche a restreint nos exploitations. En conséquence, nous n'avons pas de données pour 10 de nos participants dyscalculiques. Nous avons tout de même réalisé des analyses quantitatives et qualitatives sur les données obtenues, bien qu'il est clair qu'un nombre plus important de participants serait nécessaire afin de tirer des conclusions robustes/éloquentes.

Concernant l'évaluation des dyscalculiques, ils n'ont pas tous été testés avec le TTR, cela peut également impacter les résultats.

Conclusion et perspectives

Cette recherche s'inscrit dans un continuum des études actuelles, s'intéressant à la relation unissant le numérique au spatial. La plupart d'entre elles démontrent que des faiblesses visuo-spatiales entravent le développement numérique chez l'enfant. Cependant, rares sont les investigations chez les jeunes dyscalculiques explorant leurs performances dans le domaine visuo-spatiale. Alors que de nombreuses hypothèses étiologiques sont avancées pour expliquer l'origine de ce trouble, une seule d'entre-elles a évalué des compétences spatiales d'adolescents dyscalculiques. Alors que ce trouble des apprentissages représente une part non négligeable de la population (3 à 6%) et qu'il est nécessaire de mettre en place une rééducation le plus rapidement possible.

L'objectif initial de cette recherche était d'investiguer les habiletés visuo-spatiales chez des enfants dyscalculiques. Le but étant d'élargir les connaissances disponibles sur l'origine des difficultés numériques dans la dyscalculie en précisant le profil de ces patients. A cette fin, nous avons testé des enfants atteints de dyscalculie et des enfants contrôles, appariés en niveau scolaire, en latéralité et au niveau verbal (vocabulaire réceptif). L'évaluation porte sur diverses compétences numériques : fluences mathématiques, estimations numériques et sur les habiletés spatiales au sens large : visuo-spatiale, attention spatiale et mémoire spatiale. Ainsi, nous pouvons analyser si les dyscalculiques présentent systématiquement des difficultés visuo-spatiales, si oui, dans quel(s) domaine(s) (sachant que le domaine visuo-spatial se montre vaste).

Les données obtenues indiquent des performances similaires d'estimation numérique dans nos deux groupes. Ces résultats sont assez inattendus vu les études existantes à ce sujet. Effectivement, cette tâche est corrélée aux performances numériques et aux compétences spatiales. Or, nos participants dyscalculiques présentent des difficultés dans les tâches numériques (fluences) et dans plusieurs tâches visuo-spatiales. Nous expliquons alors ces résultats par l'âge déjà avancé de nos participants et par l'entraînement qu'ils ont reçu lors de rééducation logopédique.

Au niveau visuo-spatial, les résultats sont hétérogènes. En effet, dans les tâches visuo-perceptives, l'une permet aux dyscalculiques d'obtenir des performances similaires aux contrôles. Tandis que l'autre tâche, plus complexe, présente davantage de difficulté pour les dyscalculiques. Il est alors possible que notre groupe présente des difficultés perceptives. Quant aux tâches impliquant des compétences ou un raisonnement visuo-spatial, les enfants dyscalculiques se montrent davantage en difficulté que les contrôles.

Quant au domaine visuo-constructif, les performances sont similaires dans les deux groupes. Ces données indiquent une hétérogénéité visuo-spatiales chez les enfants dyscalculiques. Nous relevons tout de même qu'ils sont en difficulté lorsqu'il s'agit de situer les éléments les uns par rapport aux autres et/ou de les manipuler.

En revanche, concernant le domaine attentionnel, en accord avec la littérature, aucune différence n'est relevée dans le déplacement du foyer attentionnel. Toutefois, nous n'avons évalué que le déplacement du foyer attentionnel et non l'attention de type « alerte » dans laquelle les dyscalculiques montrent une atteinte. Par conséquent, une évaluation ciblée sur cette compétence attentionnelle révélerait probablement davantage une distinction entre nos groupes.

Enfin, au niveau de la mémoire à court terme visuo-spatiale, les enfants dyscalculiques manifestent des difficultés dans les tâches proposées : en séquentielle et en simultanée. Ils ont des difficultés dans le rappel d'information « ordre » et « items ». Ainsi, leurs difficultés ne se situeraient pas uniquement dans l'encodage d'informations sérielles mais ils auraient également des difficultés d'encodage visuel d'ordre plus générale.

De plus, nous constatons également que les dyscalculiques s'aident d'une présentation structurée dans l'encodage, par conséquent, ils peuvent faire appel à des informations visuo-spatiales encodées en mémoire à long terme.

Et concernant l'apprentissage visuo-spatial à long terme, les dyscalculiques peuvent effectuer un apprentissage de stimuli visuo-spatiaux indépendamment de l'ordre dans lequel ils sont apparus. Cependant, si l'ordre est comptabilisé, la tâche est plus difficile pour les dyscalculiques que pour les contrôles. De plus, même si un apprentissage est possible chez les dyscalculiques, cet apprentissage est beaucoup plus laborieux que les contrôles.

Certaines de ces explorations concordent avec la littérature et nos hypothèses, d'autres non. Nous expliquons ces divergences dans les sections discussions et limites. Toutefois, il apparaît évident que des études supplémentaires sont nécessaires pour compléter ces résultats et pour vérifier qu'ils se répliquent. En effet, les prochaines études devront veiller à évaluer un plus grand nombre de participants, afin d'avoir un échantillon représentatif de la population générale ; avec autant de garçons que de filles par exemple. De plus, il sera également nécessaire de veiller à réaliser un appariement plus précis entre le groupe expérimental et le groupe contrôle afin de limiter les différences inter-groupes.

Concernant l'évaluation, avec un échantillon plus étendu, l'évaluation de l'influence de la dyslexie sur la réalisation du questionnaire serait pertinente, afin de sélectionner les items les plus discriminants. Par ailleurs, au niveau attentionnel, une évaluation plus large de ces compétences, notamment au niveau de l'alerte devrait se révéler pertinente.

Bibliographie

- Alarcón, M., DeFries, J.C., Light, J.G., & Pennington, B.F. (1997). A twin study of mathematics disability. *Journal of Learning Disabilities*, 30(6), 617-623. doi:10.1177/002221949703000605
- American Psychiatric Association. (2013). *DSM-V : manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux* (5è éd.). Issy-les-Moulineaux: Elsevier Masson.
- Anobile, G., Stievano, P., & Burr, D.C. (2013). Visual sustained attention and numerosity sensitivity correlate with math achievement in children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 116(2), 380-391. doi: 10.1016/j.jecp.2013.06.006
- Ansari, D. (2008). Effets of development and enculturation on number representation in the brain. *Natural Reviews Neuroscience*, 9(4), 278-291. doi:10.1038/nrn2334
- Arsalidou, M., & Taylor, M.J. (2011). Meta-analyses of brain areas needed for numbers and calculations. *NeuroImage*, 54(3), 2382-2393. doi:10.1016/j.neuroimage.2010.10.009
- Askenazi, S., & Henik, A. (2010). Attentional networks in developmental dyscalculia. *Behavioral and Brain Functions*, 6(1). doi:10.1186/1744-9081-6-2
- Attout, L., & Majerus, S. (2015). Working memory deficits in developmental dyscalculia: The importance of serial order. *Child Neuropsychology*, 21, 432-450. doi:10.1080/09297049.2014.922170
- Attout, L., Noël, M.P., & Majerus, S. (2014). The relationship between working memory for serial order and numerical development: A longitudinal study. *Developmental psychology*, 50(6), 1667-1679. doi:10.1037/a0036496
- Attout, L., Noël, M.P., Vossius, L., Rousselle, L. (2017). Evidence of the impact of visuo-spatial processing on magnitude representation in 22q11 microdeletion syndrome. *Neuropsychologia*, 99, 296-305. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2017.03.023

- Bachot, J., Gevers, W., Fias, W., & Roeyers, H. (2005). Number sense in children with visuospatial disabilities: orientation of the mental number line. *Psychology Science, 47*(1), 172-183.
- Barisnikov, K., & Pizzo, R. (2007). L'examen des compétences visuo-spatiales. In M.P. Noël (Ed.), *Bilan neuropsychologique de l'enfant* (pp.139-170). Wavre: Mardaga.
- Barouillet, P., Fayol, M., & Lathulière, E. (1997). Selecting between competitors in multiplication tasks: an explanation of the errors produced by adolescents with learning difficulties. *International Journal of Behavioral Development, 21*(2), 253-275. doi:10.1080/016502597384857
- Beery, K.E., Buktenica., N.A., & Beery, N.A. (2010). *Beery-Buktenica Developmental Test of Visual-Motor integration* (6e ed.). San Antonio, TX: Pearson.
- Bellugi, U., Korenberg, J.R., & Klima, E.S. (2001). Williams syndrome : an exploration of neurocognitive and genetic features. *Clinical Neuroscience Research, 1*(3), 217-229. doi:10.1016/S1566-2772(01)00008-1
- Booth, J.L., & Siegler, R.S. (2006). Developmental and individual differences in pure numerical estimation. *Developmental Psychology, 41*(6), 189-201. doi:10.1037/0012-1649.41.6.189
- Cheng, D., Xiao, Q., Chen, Q., Cui, J., & Zhou, X. (2018). Dyslexia and dyscalculia are characterized by common visual perception deficit. *Developmental Neuropsychology, 43*(6), 497-507. doi:10.1080/87565641.2018.1481068
- Cheng, Y.L., & Mix, K.S. (2014). Spatial training improves children's mathematics ability. *Journal of Cognition and Development, 15*(1), 2-11. doi:10.1080/15248372.2012.725186.
- Cornu, V., Schiltz, C., Martin, R., & Hornung, C. (2018). Visuo-spatial abilities are key for young children's verbal number skills. *Journal of Experimental Child Psychology, 166*, 604-620. doi:10.1016/j.jecp.2017.09.006
- Couture, M., & Tremblay, S. (2006). Exploring the characteristics of the visuospatial Hebb repetition effect. *Memory and Cognition, 34*(8), 1720-1729.

- Crollen, V., Noël, M.P. (2015). Spatial and numerical processing in children with high and low visuospatial abilities. *Journal of Experimental Child Psychology*, 132, 84-98. doi:10.1016/j.jecp.2014.12.006
- Dehaene, S., Bossini, S., & Giraux, P. (1993). The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology*, 122(3), 371-396. doi:10.1037/0096-3445.122.3.371
- De Hevia, M.D., Veggiotti, L., Steri, A., & Bonn, C.D. (2017). At birth, humans associate « few » with left and « many » with right. *Current Biology*, 27(24), 3879-3884. doi:10.1016/j.cub.2017.11.024
- Delcour, C. (2018). *Exploration des habiletés visuo-spatiales chez les enfants dyscalculiques* (Master's thesis). Université de Liège, Liège.
- DeShon, R.P., Chan, D., & Weissbein, D.A. (1995). Verbal overshadowing effects on Raven's Advanced Progressive Matrices evidence for multidimensional performance determinants. *Intelligence*, 21(2), 135-155. doi:10.1016/0160-2896(95)90023-3
- De Smedt, B., Janssen, R., Bouwens, K., Verschaffel, L., Boets, B., & Ghesquière, P. (2009). Working memory and individual differences in mathematics achievement: A longitudinal study from first grade to second grade. *Journal of Experimental Child Psychology*, 103(2), 186-201. doi:10.1016/j.jecp.2009.01.004
- Devine, A., Soltész, F., Nobes, A., Goswami, U., & Szücs, D. (2013). Gender differences in dyscalculia depend on diagnostic criteria. *Learning and Instruction* 27, 31-39. doi:10.1016/j.learninstruc.2013.02.004
- De Visscher, A., & Noël, M.P. (2014). Arithmetic facts storage deficit: the hypersensitive-to-interference in memory hypothesis. *Developmental Science*, 17(3), 434-442. doi:10.1111/desc.12135

- De Visscher, A., Szmalec, A., Van der Linden, L., & Noël, M.P. (2015). Serial-order learning impairment and hypersensitivity-to-interference in dyscalculia. *Cognition*, *144*, 38-48. doi:10.1016/j.cognition.2015.07.007
- De Vos, T. (2004). *Tempo Test Reneken* (4e ed.). Amsterdam, Pays-Bas: Pearson Education.
- Dumontheil, I., & Klingberg, T. (2011). Brain activity during a visuospatial working memory task predicts arithmetical performance 2 years later. *Cerebral Cortex*, *22*(5), 1078-1085. doi:10.1093/cercor/bhr175
- Dunn, L.M., Thériault-Whalen, C.M., & Dunn, L.M. (1993). *Echelle de vocabulaire en images Peabody. Adaptation française du Peabody Picture Vocabulary test*. Toronto, Canada: Psycan.
- Eger, E., Sterzer, P., Russ, M. O., Giraud, A.L., & Kleinschmidt, A. (2003). A supramodal representation in human intraparietal cortex. *Neuron*, *37*(4), 719-726. doi:10.1016/S0896-6273(03)00036-9
- Fischer, M.H., Castel, A. D., Dodd, M. D., & Pratt, J. (2003). Perceiving numbers causes spatial shifts of attention. *Nature neuroscience*, *6*(6), 555-556. doi:10.1038/nm1066
- Geary, D.C. (1990). A componential analysis of an early learning deficit in mathematics. *Journal of Experimental Child Psychology*, *49*, 363-383.
- Gliksman, Y., & Henik, A. (2019). Enumeration and alertness in developmental dyscalculia. *Journal of cognition*, *2*(1), 1-13. doi:10.5334/joc.55
- Gracia-Bafalluy, M., & Noël, M.P. (2008). Does finger training increase young children's numerical performance? *Cortex*, *44*(4), 368-375. doi:10.1016/j.cortex.2007.08.020
- Hawes, Z., Moss, J., Caswell, B., & Poliszczuk, D. (2015). Effects of mental rotation training on children's spatial and mathematics performance: A randomized controlled study. *Trends in Neuroscience and Education*, *4*(3), 60-68. doi:10.1016/j.tine.2015.05.001

- Hitch, G.J. & McAuley, E. (1991). Working memory in children with specific arithmetical learning difficulties. *British Journal of Psychology*, 82(3), 375-386. doi:10.1111/j.2044-8295.1991.tb02406.x
- Höffler, T.N. (2010). Spatial ability: Its influence on learning with visualizations – a Meta-Analytic Review. *Educational Psychology Review*, 22(3), 245-269. doi:10.1007/s10648-010-9126-7
- Hong, D., Kent, J.S., & Kesler, S. (2009). Cognitive profile of Turner syndrome. *Developmental disabilities research reviews*, 15(4), 270-278. doi:10.1002/ddrr.79
- Imbo, I., Szmalec, A., & Vandierendonck, A. (2009). The role of structure in age-related increases in visuo-spatial working memory span. *Psychologica Belgica*, 49(4), 275-291. doi:10.5334/pb-49-4-275
- Inserm. (2007). *Dyslexie, dysorthographe, dyscalculie: bilan des données scientifiques*. Paris: Les éditions Inserm.
- Isaacs, E.B., Edmonds, C.J., Lucas, A., & Gadian, D.G. (2001). Calculation difficulties in children of a very low birthweight. *Brain*, 124(9), 1701-1707. doi:10.1093 / brain / 124.9.1701
- Korkman, M., Kirk, U., & Kemp, S. (2012). *Bilan neuropsychologique de l'enfant* (2e ed.). Adaptation française. France: Pearson.
- Kucian, K., Grond, U., Rotzer, S., Henzi, B., Schönmann, C., Plangger, F., Gälli, M., Martin, E., & Von Aster, M. (2011). Mental number line training in children with developmental dyscalculia. *NeuroImage*, 57(3), 782-795. doi:10.1016/j.neuroimage.2011.01.070
- Lafay, A. (2018). *Les troubles de la cognition mathématiques*. Retrieved from <https://docplayer.fr/76572479-Les-troubles-de-la-cognition-mathematique-anne-lafay-ph-d.html>
- Landerl, K., Bevan, A., & Butterworth, B. (2004). Developmental dyscalculia and basic numerical capacities: a study of 8-9-years-olds students. *Cognition*, 93(2), 99-125. doi:10.1016/j.cognition.2003.11.004

- Lauer, J.E., & Lourenco, S.F. (2016). Spatial processing in infancy predicts both spatial and mathematical aptitude in childhood. *Psychological Science*, 27(10), 1291-1298. doi:10.1177/0956797616655977
- Lowrie, T., Logan, T., & Ramful, A. (2017). Visuospatial training improves elementary students' mathematics performance. *British Journal of Educational Psychology*, 87(2), 170-186. doi:10.1111/bjep.12142
- Majerus, S. (2013). Language repetition and short-term memory : an integrative framework. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7(357), 1-16. doi:10.3389/fnhum.2013.00357.
- Majerus, S., & Attout, L. (2018). Working memory for serial order and numerical cognition: What kind of association ? In A. Henik, & W. Fias (Eds.), *Heterogeneity of function in numerical cognition* (pp.409-431). Cambridge, Massachusetts: Elsevier.
- Mammarella, I.C., Caviola, S., Giofè, D., & Szucs, D. (2018). The underlying structure of visuospatial working memory in children with mathematical learning disability. *The British Psychological Society*, 36(2), 220-235. doi:10.1111/bjdp.12202
- Mammarella, I.C., Cornoldi, C., Pazzaglia, F., Toso, C., Grimoldi, M., & Vio, C. (2006). Evidence for a double dissociation between spatial-simultaneous and spatial-sequential working memory in visuospatial (nonverbal) learning disabled children. *Brain and Cognition*, 62, 58-67. doi:10.1016/j.bandc.2006.03.007
- Mammarella, I.C., Pazzaglia, F., & Cornoldi, C. (2008). Evidence for different components in children's visuospatial working memory. *British Journal of Developmental Psychology*, 26(3), 337-355. doi:10.1348/026151007X236061
- Mazeau, M., & Pouhet, A. (2014). *Neuropsychologie et troubles des apprentissages chez l'enfant: du développement typique aux « dys- »* (2è éd.). Issy-les-Moulineaux: Elsevier Masson.

- McCaskey, U., von Aster, M., O'Gorman Tuura, R., & Kucian, K. (2017). Adolescents with developmental dyscalculia do not have a generalized magnitude deficit-processing of discrete and continuous magnitudes. *Frontiers in Human Neuroscience*, *11*, 1-19. doi : 10.3389/fnhum.2017.00102
- Noël, M.P. (2005). Finger gnosis: a predictor of numerical abilities in children? *Child Neuropsychology*, *11*(5), 413-430. doi:10.1080/09297040590951550
- Noël, M.P. (2009). La dyscalculie de l'enfant: une difficulté dans le calcul et le traitement du nombre. In M. Poncelet, S. Majerus, & M. Van der Linden (Eds.), *Traité de Neuropsychologie de l'Enfant* (pp.301-330). Bruxelles: De Boeck Solal.
- Noël, M.P., & Gregoire, J. (2015). *TEDI-MATH GRANDS – Test diagnostique des compétences de bases en mathématiques* [Manuel & protocole]. ECPA.
- Raven, J.C., Court, J.H., & Raven, J. (1998). *Progressive Matrices couleur*. ECPA
- Rodán, A., Gimeno, P., Elosúa, M.R., Montoro, P. R., & Contreras, M.J. (2019). Boys and girls gain in spatial, but not in mathematical ability after mental rotation training in primary education. *Learning and Individual Differences*, *70*, 1-11. doi:10.1016/j.lindif.2019.01.001
- Rousselle, L. (2011). Les difficultés d'apprentissage en mathématiques dans le cadre de syndromes génétiques. In, M. Habib, M. P. Noël, F. George, & V. Brun, (Eds.), *Calculs et dyscalculies : Des modèles à la rééducation*. (pp. 45-62). Masson. <http://hdl.handle.net/2268/174309>
- 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. doi:10.1016/j.cognition.2006.01.005
- Salvaggio, S., Masson, N., & Andres, M. (2019). Eye position reflects the spatial coding of numbers during magnitude comparison. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *45*(10), 1910-1921. <http://dx.doi.org/10.1037/xlm0000681>

- Schmetz, E., & Rousselle, L. (2016). Le point sur les processus visuo-perceptifs chez les enfants atteints de paralysie cérébrale. *Revue de neuropsychologie*, 8(2), 137-149. doi:10.1684/nrp.2016.0374
- Schmetz, E., Rousselle, L., Ballaz, C., Detraux, J.J., & Barisnikov, K. (2017). BEVPS: A new battery to assess visual perceptual and spatial processing abilities in 5-14 years-old in children. *Applied Neuropsychology: Child*, 7(4), 317-333. doi:10.1080/21622965.2017.1336710
- Schneider, M., Merz, S., Stricker, J., De Smedt, B., Torbeyns, J., Verschaffel, L., & Lewel, K. (2018). Associations of number line estimation with mathematical competence: A meta-analysis. *Child Development*, 89(5), 1467-1484.
- Schwenk, C., Sasanguie, D., Kuhn, J.T., Kempe, S., Doebler, P., Holling, H. (2017). (Non-)symbolic magnitude processing in children with mathematical difficulties: a meta-analysis. *Research in Developmental Disabilities*, 64, 152-157. doi:10.1016/j.ridd.2017.03.003
- Shalev, R.S., Auerbach, J., Manor, O., & Gross-Tsur, V. (2000). Developmental dyscalculia: prevalence and prognosis. *European Child & Adolescent Psychiatry*, 9(2), 58-64. doi:10.1007/s007870070009
- Shalev, R.S., Manor, O., Kerem, B., Ayali, M., Badichi, N., Friedlander, Y., & Gross-Tsur, V. (2001). Developmental dyscalculia is a familial learning disability. *Journal of learning disabilities*, 34(1), 59-65. doi:10.1177/002221940103400105
- Siegler, R.S., & Booth, J.L. (2004). Development of numerical estimation in young children. *Child Development*, 75(2), 428-444. doi:10.1111/j.1467-8624.2004.00684.x
- Siegler, R.S., & Opfer, J.E. (2003). The development of numerical estimation: evidence for multiple representations of numerical quantity. *Psychological Science*, 14(3), 237-243. doi:10.1111/1467-9280.02438

- Sobin, C., Kiley-Brabeck, K., Daniels, S., Khuri, J., Taylor, L., Blundell, M., Anyane-Yeboa, K., & Karayiorgu, M. (2005). Neuropsychological characteristics of children with the 22Q11 deletion syndrome: a descriptive analysis. *Child Neuropsychology*, *11*(1), 39-53. doi:10.1080/09297040590911167
- Szucs, D., Devine, A., Soltesz, F., Nobes, A., & Gabriel, F. (2013). Developmental dyscalculia is related to visuo-spatial memory and inhibition impairment. *Cortex*, *49*(10), 2674-2688. doi:10.1016/j.cortex.2013.06.007
- Szucs, D., & Goswanmi, U. (2013). Developmental dyscalculia: Fresh perspectives. *Trends in Neuroscience and Education*, *2*(2), 33-37. doi:10.1016/j.tine.2013.06.004
- Thompson, J.M., Nuerk, H.C., Moeller, K., & Kadosh, R.C. (2013). The link between mental rotation ability and basic numerical representations. *Acta Psychologica*, *144*(2), 324-331. doi:10.1016/j.actpsy.2013.05.009
- Uttal, D.H., Meadow, N.G., Tipton, E., Hand, L.L., Alden, A.R., Warren, C. (2013). The malleability of spatial skills: A Meta-Analysis of Training Studies. *Psychological Bulletin*, *139*(2), 352-402. doi:10.1037/a0028446
- Van Nieuwenhoven, C., Gregoire, J., & Noël, M.P. (2001). *TEDI-MATH – Test diagnostique des compétences de base en mathématiques* [Manuel & protocole]. ECPA.
- Van Hout, A., & Meljac, C. (2001). *Troubles du calcul et dyscalculies chez l'enfant*. Paris: Masson.
- Zhou, X., Wei, W., Zhang, Y., Cui, J., & Chen, C. (2015). Visual perception can account for the close relation between numerosity processing and computational fluency. *Frontiers in psychology*, *6*. doi:10.3389/fpsyg.2015.01364
- Zimmermann, M.G., & Fimm, B. (1994). *Batterie informatisée d'évaluation des capacités attentionnelles et exécutives (kiTap)*. Version française. Psytest.
- Zorzi, M., Priftis, K., & Umiltà, C. (2002). Brain damage: Neglect disrupts the mental number line. *Nature*, *417*, 138-139. doi:10.1038/417138a

Annexes

1 – Formulaire de recrutement

Lettre adressée aux logopèdes.



LIÈGE université
Psychologie, Logopédie & Sciences de l'Éducation

Psychologie & Neuroscience Cognitives
PsyNCog 
Psychology & Neuroscience of Cognition

Madame, Monsieur,

Je m'appelle Claire Doyere et suis actuellement en dernière année de logopédie à l'Université de Liège. Dans le cadre de mon mémoire, je mène une recherche supervisée par Lucie Attout, chercheuse en logopédie à l'Université de Liège. Celle-ci vise une meilleure compréhension des habiletés visuo-spatiales chez les enfants dyscalculiques.

Ainsi, je suis à la recherche d'enfants fréquentant la 3^{ème}, 4^{ème}, 5^{ème} et 6^{ème} primaire. J'évaluerai leurs performances au cours de diverses tâches visuo-spatiales, de calcul, et de mémoire sous forme de petits jeux. La durée de testing est estimée à environ deux fois une heure. Ce testing se déroulera dans un endroit calme et connu de l'enfant (école, université ou à domicile) à la meilleure convenance des parents. Un dédommagement à hauteur de 10 euros et présenté sous forme de bons cadeaux de type éducatif sera offert à l'enfant.

Les résultats à l'ensemble des exercices resteront entièrement confidentiels et l'anonymat sera strictement respecté lors du traitement des données. Enfin, les enfants pourront à tout moment décider de mettre fin à leur participation et ce sans justification de leur part.

Je me demande donc si en tant que professionnels de la santé, vous accepteriez de distribuer la lettre d'informations aux parents d'enfants susceptibles de rentrer dans les critères de l'étude. Le parent peut à son tour me faire parvenir le talon réponse si il souhaite participer.

Les différents critères requis pour que l'enfant puisse participer à cette étude sont :

- Être scolarisé en 3^{ème}, 4^{ème}, 5^{ème} ou 6^{ème} primaire.
- Ne pas avoir de diagnostic de haut potentiel ou de dyspraxie ou de trouble de l'attention.
- Être monolingue français (pas d'immersion ou de bilinguisme).
- Être ou avoir été suivi pour des difficultés en mathématiques.

Je reste bien entendu à votre entière disposition pour tout renseignement complémentaire. Je vous remercie du temps que vous avez passé à la lecture de cette lettre.

Doyere Claire
Claire.doyere@student.uliege.be
+33 627.79.12.20

Sart-Tilman, B33 (Parking P16)
4000 Liège (Belgique)
t +32-(0)4/366.39.91
email: lucie.attout@uliege.be – web : psyncog.uliege.be

Lettre adressé aux parents des participants dyscalculiques.

Madame, Monsieur,

Je m'appelle Claire Doyere et suis actuellement en dernière année de logopédie à l'Université de Liège. Dans le cadre de mon mémoire, je mène une recherche supervisée par Lucie Attout, chercheuse en logopédie à l'Université de Liège. Celle-ci vise une meilleure compréhension des habiletés visuo-spatiales chez les enfants dyscalculiques.

Ainsi, je suis à la recherche d'enfants fréquentant la 3^{ème}, 4^{ème}, 5^{ème} et 6^{ème} primaire. J'évaluerai leurs performances au cours de diverses tâches visuo-spatiales, de calcul, et de mémoire sous forme de petits jeux. La durée de testing est estimée à environ deux fois une heure. Ce testing se déroulera dans un endroit calme et connu de l'enfant (école, université ou à domicile) à votre meilleure convenance. Un dédommagement à hauteur de 10 euros et présenté sous forme de bons cadeaux de type éducatif sera offert à votre enfant.

Les résultats à l'ensemble des exercices resteront entièrement confidentiels et l'anonymat sera strictement respecté lors du traitement des données. Enfin, les enfants pourront à tout moment décider de mettre fin à leur participation et ce sans justification de leur part.

Je me demande donc si en tant que parents, vous permettez que votre enfant participe à ces tests. Cela me serait d'une grande aide dans la réalisation de ma recherche et permettrait l'avancée des recherches scientifiques. Je m'engage à respecter l'autonomie et la volonté de votre enfant, à lui demander son avis sur sa participation, à le mettre au courant de l'étude dans laquelle il s'engage et à lui permettre de refuser ou d'arrêter à tout moment même si vous avez donné votre accord.

Différents critères doivent être remplis pour que votre enfant puisse participer à cette étude :

- Être scolarisé en 3^{ème}, 4^{ème}, 5^{ème} ou 6^{ème} primaire.
- Ne pas avoir de diagnostic de haut potentiel ou de dyspraxie ou de trouble de l'attention.
- Être monolingue français (pas d'immersion ou de bilinguisme).
- Être ou avoir été suivi pour des difficultés en mathématiques.

Si vous désirez m'aider dans la réalisation de cette étude, je vous demande de bien vouloir compléter le talon ci-dessous et me transmettre votre accord par mail ou par téléphone (cf. ci-dessous).

Je reste bien entendu à votre entière disposition pour tout renseignement complémentaire. Je vous remercie du temps que vous avez passé à la lecture de cette lettre.

Doyere Claire
Claire.doyere@student.uliege.be
+33 6.27.79.12.20

Lettre adressée aux parents des participants contrôles.

Madame, Monsieur,

Je m'appelle Claire Doyere et suis actuellement en dernière année de logopédie à l'Université de Liège. Dans le cadre de mon mémoire, je mène une recherche supervisée par Lucie Attout, chercheuse en logopédie à l'Université de Liège. Celle-ci vise une meilleure compréhension des habiletés visuo-spatiales chez les enfants dyscalculiques. Pour ce faire, je cherche des enfants « contrôles », ne présentant pas de difficulté en mathématiques afin de les comparer à une population d'enfants présentant ce type de difficulté.

Ainsi, je suis à la recherche d'enfants fréquentant la 3^{ème}, 4^{ème}, 5^{ème} et 6^{ème} primaire. J'évaluerai leurs performances au cours de diverses tâches visuo-spatiales, de calcul, et de mémoire sous forme de petits jeux. La durée de testing est estimée à environ deux fois une heure. Ce testing se déroulera dans un endroit calme et connu de l'enfant (école, université ou à domicile) à votre meilleure convenance.

Les résultats à l'ensemble des exercices resteront entièrement confidentiels et l'anonymat sera strictement respecté lors du traitement des données. Enfin, les enfants pourront à tout moment décider de mettre fin à leur participation et ce sans justification de leur part.

Je me demande donc si en tant que parents, vous permettez que votre enfant participe à ces tests. Cela me serait d'une grande aide dans la réalisation de ma recherche et permettrait l'avancée des recherches scientifiques. Je m'engage à respecter l'autonomie et la volonté de votre enfant, à lui demander son avis sur sa participation, à le mettre au courant de l'étude dans laquelle il s'engage et à lui permettre de refuser ou d'arrêter à tout moment même si vous avez donné votre accord.

Différents critères doivent être remplis pour que votre enfant puisse participer à cette étude :

- Être scolarisé en 3^{ème}, 4^{ème}, 5^{ème} ou 6^{ème} primaire.
- Ne pas avoir de diagnostic de haut potentiel ou de dyspraxie ou de trouble de l'attention.
- Être monolingue français (pas d'immersion ou de bilinguisme).
- Pas de trouble de l'apprentissage (dyslexie, dyspraxie, dyscalculie,...)

Si vous désirez m'aider dans la réalisation de cette étude, je vous demande de bien vouloir compléter le talon ci-dessous et me transmettre votre accord par mail ou par téléphone (cf. ci-dessous).

Je reste bien entendu à votre entière disposition pour tout renseignement complémentaire.
Je vous remercie du temps que vous avez passé à la lecture de cette lettre.

Doyere Claire
Claire.doyere@student.uliege.be
+33 627.79.12.20

Sart-Tilman, B33 (Parking P16)
4000 Liège (Belgique)
t +32-(0)4/366.39.91
email: lucie.attout@uliege.be – web : psyncog.uliege.be



Faculté de Psychologie, Logopédie et des Sciences de l'Éducation

Comité d'éthique

PRESIDENTE : Fabienne COLLETTE

SECRETAIRE : Annick COMBLAIN

**CONSENTEMENT ECLAIRE
POUR DES RECHERCHES IMPLIQUANT DES PARTICIPANTS HUMAINS**

Titre de la recherche	Exploration des habiletés visuo-spatiales chez les enfants dyscalculiques
Chercheur responsable	Claire Doyere
Promoteur	Lucie Attout
Service et numéro de téléphone de contact	0494/067570 (Lucie Attout) +33 6.27.79.12.20

Je, soussigné(e),, en ma qualité de père, mère, tuteur ou tutrice de, déclare :

- avoir reçu, lu et compris une présentation écrite de la recherche dont le titre et le chercheur responsable figurent ci-dessus ;
- avoir pu poser des questions sur cette recherche et reçu toutes les informations que je souhaitais.
- avoir reçu une copie de l'information au participant et du consentement éclairé.

Je sais que, en ce qui concerne

- je peux à tout moment mettre un terme à sa participation à cette recherche sans devoir motiver ma décision et sans que quiconque subisse aucun préjudice ;
- son avis sera sollicité et il pourra également mettre un terme à sa participation à cette recherche sans devoir motiver sa décision et sans que quiconque subisse aucun préjudice ;
- je peux demander à recevoir les résultats globaux de la recherche mais je n'aurais aucun retour concernant ses performances individuelles.
- La présente étude ne représente pas une évaluation diagnostique.
- je peux contacter le chercheur pour toute question ou insatisfaction relative à sa participation à la recherche ;
- des données le concernant seront récoltées pendant sa participation à cette étude et que le chercheur responsable et le promoteur de l'étude se portent garant de la confidentialité de ces données. Je dispose d'une série de droits (accès, rectification, suppression, opposition) concernant ses données personnelles que je peux exercer en prenant contact avec le Délégué à la Protection des Données de l'institution dont les coordonnées se trouvent sur la feuille d'information qui m'a été remise. Je peux également lui adresser toute doléance concernant le traitement de ses données à caractère personnel.
- Les données à caractère personnel ne seront conservées que le temps utile à la réalisation de l'étude visée, c'est-à-dire pour un maximum de trois années.

Une copie du présent document est remise à la personne qui l'a signé.

CE-Cons_écl-3

Je consens à ce que, en ce qui concerne :

- les données anonymes recueillies dans le cadre de cette étude soient également utilisées dans le cadre d'autres études futures similaires, y compris éventuellement dans d'autres pays que la Belgique.
- les données anonymes recueillies soient, le cas échéant, transmises à des collègues d'autres institutions pour des analyses similaires à celle du présent projet ou qu'elles soient mises en dépôt sur des répertoires scientifiques accessibles à la communauté scientifique uniquement.
- ses données personnelles soient traitées selon les modalités décrites dans la rubrique traitant de garanties de confidentialité du formulaire d'information.

En conséquence, je donne mon consentement libre et éclairé pour que soit participant à cette recherche.

Lu et approuvé,

Date et signature :

Chercheur responsable

- Je soussigné, Claire Doyere, chercheur responsable, confirme avoir fourni oralement les informations nécessaires sur l'étude et avoir fourni un exemplaire du document d'information et de consentement au représentant légal du participant. J'ai également fourni les informations oralement et recueilli le consentement du participant dans des termes adaptés à son âge et/ou sa condition
- Je confirme qu'aucune pression n'a été exercée pour que le participant ou son représentant légal accepte de participer à l'étude et que je suis prêt à répondre à toutes les questions supplémentaires, le cas échéant.
- Je confirme travailler en accord avec les principes éthiques énoncés dans la dernière version de la « Déclaration d'Helsinki », des « Bonnes pratiques Cliniques » et de la loi belge du 7 mai 2004, relative aux expérimentations sur la personne humaine, ainsi que dans le respect des pratiques éthiques et déontologiques de ma profession.

Nom, prénom du chercheur responsable

Date et signature

2 – Tâche de mémoire à long terme

Version A :

5×4																																																																																					
	<table border="1" style="width: 100%; height: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td></td><td>8</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td>5</td></tr> <tr><td>4</td><td></td><td>6</td><td>2</td></tr> <tr><td></td><td>1</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>3</td><td>7</td></tr> </table>		8						5	4		6	2		1					3	7	<table border="1" style="width: 100%; height: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>2</td><td>3</td><td></td><td>4</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>5</td><td></td></tr> <tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>8</td><td>7</td></tr> <tr><td></td><td>6</td><td></td><td></td></tr> </table>	2	3		4			5		1						8	7		6			<table border="1" style="width: 100%; height: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>6</td><td>4</td><td></td><td>7</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>1</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>5</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>2</td><td>8</td><td>3</td></tr> </table>					6	4		7			1			5				2	8	3	<table border="1" style="width: 100%; height: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>2</td><td>3</td><td></td><td>4</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>5</td><td></td></tr> <tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>8</td><td>7</td></tr> <tr><td></td><td>6</td><td></td><td></td></tr> </table>	2	3		4			5		1						8	7		6			
	8																																																																																				
			5																																																																																		
4		6	2																																																																																		
	1																																																																																				
		3	7																																																																																		
2	3		4																																																																																		
		5																																																																																			
1																																																																																					
		8	7																																																																																		
	6																																																																																				
6	4		7																																																																																		
		1																																																																																			
	5																																																																																				
	2	8	3																																																																																		
2	3		4																																																																																		
		5																																																																																			
1																																																																																					
		8	7																																																																																		
	6																																																																																				
					.../4																																																																																
	<table border="1" style="width: 100%; height: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td></td><td></td><td>2</td><td>8</td></tr> <tr><td>4</td><td></td><td></td><td>1</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>7</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>3</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>6</td><td></td><td></td><td>5</td></tr> </table>			2	8	4			1			7			3			6			5	<table border="1" style="width: 100%; height: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>2</td><td>3</td><td></td><td>4</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>5</td><td></td></tr> <tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>8</td><td>7</td></tr> <tr><td></td><td>6</td><td></td><td></td></tr> </table>	2	3		4			5		1						8	7		6			<table border="1" style="width: 100%; height: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>6</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>8</td><td>3</td></tr> <tr><td></td><td>4</td><td></td><td>7</td></tr> <tr><td></td><td>2</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>5</td><td>1</td></tr> </table>	6						8	3		4		7		2					5	1	<table border="1" style="width: 100%; height: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>2</td><td>3</td><td></td><td>4</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>5</td><td></td></tr> <tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>8</td><td>7</td></tr> <tr><td></td><td>6</td><td></td><td></td></tr> </table>	2	3		4			5		1						8	7		6			.../4
		2	8																																																																																		
4			1																																																																																		
		7																																																																																			
	3																																																																																				
6			5																																																																																		
2	3		4																																																																																		
		5																																																																																			
1																																																																																					
		8	7																																																																																		
	6																																																																																				
6																																																																																					
		8	3																																																																																		
	4		7																																																																																		
	2																																																																																				
		5	1																																																																																		
2	3		4																																																																																		
		5																																																																																			
1																																																																																					
		8	7																																																																																		
	6																																																																																				
					.../4																																																																																
	<table border="1" style="width: 100%; height: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>2</td><td></td><td></td><td>6</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>8</td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>7</td><td></td><td>4</td></tr> <tr><td></td><td>5</td><td>1</td><td></td></tr> </table>	2			6							8		3	7		4		5	1		<table border="1" style="width: 100%; height: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>2</td><td>3</td><td></td><td>4</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>5</td><td></td></tr> <tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>8</td><td>7</td></tr> <tr><td></td><td>6</td><td></td><td></td></tr> </table>	2	3		4			5		1						8	7		6			<table border="1" style="width: 100%; height: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td></td><td></td><td>4</td><td>1</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>7</td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>8</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>6</td><td>3</td><td></td></tr> </table>			4	1			7		5				8					6	3		<table border="1" style="width: 100%; height: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>2</td><td>3</td><td></td><td>4</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>5</td><td></td></tr> <tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>8</td><td>7</td></tr> <tr><td></td><td>6</td><td></td><td></td></tr> </table>	2	3		4			5		1						8	7		6			.../4
2			6																																																																																		
		8																																																																																			
3	7		4																																																																																		
	5	1																																																																																			
2	3		4																																																																																		
		5																																																																																			
1																																																																																					
		8	7																																																																																		
	6																																																																																				
		4	1																																																																																		
		7																																																																																			
5																																																																																					
8																																																																																					
	6	3																																																																																			
2	3		4																																																																																		
		5																																																																																			
1																																																																																					
		8	7																																																																																		
	6																																																																																				

Version B:

5x4				
	8			
			5	
4		6	2	
	1			
		3	7	
			5	
8	7			
	3		6	
2		4		
1				
6	4		7	
		1		
	5			
	2	8	3	
			5	
8	7			
	3		6	
2		4		
1				
				.../4
		2	8	
4			1	
		7		
	3			
6			5	
			5	
8	7			
	3		6	
2		4		
1				
				.../4
2			6	
		8		
3	7		4	
	5	1		
			5	
8	7			
	3		6	
2		4		
1				
			4	1
		7		
5				
8				
	6	3		

3 - Résultats au test de normalité de Shapiro-Wilk

Tableau A1 : Test de normalité de Shapiro-Wilk, en fonction du groupe.

<i>Variables</i>	Groupe expérimentale		Groupe contrôle	
	Shapiro-Wilk	p	Shapiro-Wilk	p
<i>EVIP brut</i>	0.962	.647	0.938	.270
<i>TTR</i>	0.966	.844	0.882	.110
<i>Additions correctes</i>	0.917	.115	0.974	.865
<i>Soustractions correctes</i>	0.895	.047*	0.944	.333
<i>Multiplications correctes</i>	0.889	.037*	0.905	.071
<i>EN : 0-100 (mm) total</i>	0.854	.010*	0.0821	.003**
<i>EN : 0-100 surestimation</i>	0.825	.003**	0.938	.273
<i>EN : 0-100 sous-estimation</i>	0.863	.014*	0.914	.100
<i>EN : 0-1000 (mm) total</i>	0.900	.058	0.846	.007**
<i>EN : 0-1000 surestimation</i>	0.764	<.001**	0.677	<.001**
<i>EN : 0-1000 sous-estimation</i>	0.764	<.001**	0.693	<.001**
<i>Questionnaire total</i>	0.950	.429	0.918	.121
<i>Enchevêtrement</i>	0.890	.038*	0.935	.241
<i>VMI total</i>	0.767	<.001**	0.969	.781
<i>Localisation total</i>	0.966	.720	0.921	.136
<i>Localisation temps</i>	0.959	.581	0.928	.176
<i>Rotation total</i>	0.969	.778	0.871	.019*
<i>Rotation temps</i>	0.837	.005**	0.962	.643
<i>Cubes</i>	0.966	.711	0.927	.171
<i>RAVEN</i>	0.972	.828	0.943	.326
<i>Attention correct total</i>	0.798	.027*	0.795	.001**
<i>Attention temps total</i>	0.866	.139	0.862	.013*
<i>Attention correct congruent</i>	0.641	<.001**	0.378	<.001**
<i>Attention temps congruent</i>	0.860	.119	0.867	.016*
<i>Attention correct incongruent</i>	0.732	.005**	0.481	<.001**
<i>Attention temps incongruent</i>	0.912	.365	0.863	.014*
<i>MCTVS séquentielle ordre structuré</i>	0.972	.830	0.915	.107
<i>MCTVS séquentielle ordre non-structuré</i>	0.959	.583	0.929	.189
<i>MCTVS séquentielle ordre total</i>	0.955	.516	0.944	.344
<i>MCTVS simultanée item structurés</i>	0.892	.041*	0.856	.011*
<i>MCTVS simultanée item non-structurés</i>	0.971	.815	0.941	.298
<i>MCTVS simultanée item total</i>	0.947	.378	0.950	.421
<i>Hebb total</i>	0.253	<.001**	0.776	<.001**
<i>Hebb ordre</i>	0.926	.167	0.920	.129
<i>Hebb item</i>	0.960	.609	0.898	.054
<i>MCT ordre</i>	0.788	.001**	0.915	.105
<i>MCT item</i>	0.963	.653	0.771	<.001**

Les résultats significatifs suggèrent une déviation de la normalité. EN = Estimation Numérique, MCTVS = mémoire à court terme visuo-spatiale, VMI = Test of Visual Perception, p = probabilité de dépassement (seuil d'incertitude à 5%). *p<.05, **p<.01.

4 – Résultats au test d'égalité de la variance de Levene

Tableau A2 : Test d'égalité des variances de Levene

Variables	Test d'égalité des variances de Levene		
	F	ddl	p
<i>EVIP brut</i>	0.783	1	.383
<i>TTR</i>	1.755	1	.200
<i>Additions correctes</i>	1.392	1	.246
<i>Soustractions correctes</i>	0.875	1	.356
<i>Multiplications correctes</i>	8.410	1	.006**
<i>EN : 0-100 (mm) total</i>	4.476	1	.042*
<i>EN : 0-100 surestimation</i>	0.149	1	.702
<i>EN : 0-100 sous-estimation</i>	0.009	1	.926
<i>EN : 0-1000 (mm) total</i>	1.194	1	.282
<i>EN : 0-1000 surestimation</i>	0.001	1	.971
<i>EN : 0-1000 sous-estimation</i>	0.086	1	.771
<i>Questionnaire total</i>	4.851	1	.035*
<i>Enchevêtrement</i>	6.858	1	.013*
<i>VMI total</i>	3.282	1	.0079
<i>Localisation total</i>	11.054	1	.002**
<i>Localisation temps</i>	1.397	1	.245
<i>Rotation total</i>	0.186	1	.669
<i>Rotation temps</i>	4.813	1	.035*
<i>Cubes</i>	3.648	1	.065
<i>RAVEN</i>	0.017	1	.898
<i>Attention correct total</i>	0.038	1	.848
<i>Attention temps total</i>	11.374	1	.003**
<i>Attention correct congruent</i>	1.060	1	.313
<i>Attention temps congruent</i>	10.597	1	.003**
<i>Attention correct incongruent</i>	2.172	1	.154
<i>Attention temps incongruent</i>	9.994	1	.004**
<i>MCTVS séquentielle ordre structuré</i>	5.364	1	.027*
<i>MCTVS séquentielle ordre non-structuré</i>	4.247	1	.047*
<i>MCTVS séquentielle ordre total</i>	4.443	1	.042*
<i>MCTVS simultanée item structurés</i>	5.705	1	.023*
<i>MCTVS simultanée item non-structurés</i>	0.105	1	.748
<i>MCTVS simultanée item total</i>	2.083	1	.158
<i>Hebb total</i>	57.795	1	<.001**
<i>Hebb ordre</i>	2.714	1	.109
<i>Hebb item</i>	10.176	1	.003**
<i>MCT ordre</i>	0.155	1	.697
<i>MCT item</i>	0.172	1	.681

Les résultats significatifs suggèrent une inégalité des variances. EN = Estimation Numérique, MCTVS= mémoire à court terme visuo-spatiale, VMI= Test of Visual Perception. F= test de Levene, ddl = degré de liberté, seuil d'incertitude à 5%. *p<.05, **p<.01.

5 – Résultats au test non paramétrique de Welch

Tableau A3 : Test non-paramétrique de Welch appliqué aux variables ne suivant pas la loi normale (test de Shapiro-Wilk) ou aux variables hétérogènes (au test de Levene).

Variables	Test non-paramétrique de Welch		
	w	p	d
Multiplications correctes	2.899	.007**	0.966
EN : 0-100 (mm) total	-1.786	.084	-0.595
EN : 0-1000 (mm) total	-1.818	.078	-0.606
EN : 0-1000 sur estimation	-1.075	.290	-0.358
EN : 0 -1000 sous-estimation	0.967	.341	0.322
Questionnaire total	-3.192	.004**	-1.064
Enchevêtrement	1.054	.301	0.351
VMI total	2.118	.045*	0.706
VMI erreurs perceptives	-1.784	.088	-0.595
Localisation total	3.962	<.001**	1.321
Rotation total	2.891	.007**	0.964
Rotation temps	1.324	.196	0.441
MCTVS séquentielle ordre structuré	3.992	<.001**	1.331
MCTVS séquentielle ordre non-structuré	4.393	<.001**	1.464
MCTVS séquentielle ordre total	4.404	<.001**	1.468
MCTVS simultanée item structurés	3.197	.004**	1.066
Hebb total	3.405	.003**	1.135
Hebb item	1.595	.122	0.532
MCT ordre	4.683	<.001**	1.561
MCT item	1.774	.085	0.591
Attention correct total	1.242	.229	0.489
Attention temps total	1.483	.151	0.551
Attention correct congruent	-0.260	.797	-0.089
Attention temps congruent	1.515	.143	0.565
Attention correct incongruent	1.084	.291	0.373
Attention temps incongruent	1.673	.107	0.616

EN = Estimation Numérique, MCTVS= mémoire à court terme visuo-spatiale, VMI= Developmental Test of Visual Perception.

w= statistique de Welch, d = taille de l'effet, p=probabilité de dépassement (seuil d'incertitude à 5%). *p<.05, **p<.01.

Résumé

La dyscalculie fait partie des troubles des apprentissages, tout comme la dyslexie, mais reste encore peu connue. Pourtant, ce trouble touche 3 à 6 % des enfants et se traduit par une difficulté dans les habiletés numériques. Cette atteinte révèle un profil multi-varié de ces enfants, et de fait, l'existence de nombreuses hypothèses étiologiques traduit cette hétérogénéité comportementale et cognitive. En effet, la littérature actuelle explique la présence d'une dyscalculie via l'existence de facteurs biologiques, neurologiques et/ou cognitifs. Ce dernier facteur démontre notamment des troubles cognitifs spécifiques tels qu'un déficit d'accès aux symboles numériques. Ou bien des troubles cognitifs généraux, tels que lesgnosies, l'inhibition et la sensibilité à l'interférence, la mémoire de travail, l'attention ou encore les capacités visuo-spatiales.

De plus en plus de recherches mettent en lumière l'impact des compétences visuo-spatiales sur le développement arithmétique. Dans cette étude, nous examinons le paradigme inverse ; nous voulons savoir si les dyscalculiques présentent systématiquement une atteinte des habiletés visuo-spatiales. Cette approche de la dyscalculie est encore peu examinée à ce jour, en effet, nous n'avons recensé qu'une seule étude dans ce domaine. Ainsi, notre but est d'enrichir les connaissances sur le profil de ces enfants afin d'affiner leur rééducation.

Pour réaliser notre étude, nous avons testés 18 enfants dyscalculiques et 18 enfants contrôles, appariés en niveau scolaire, en latéralité et aux scores du niveau verbal réceptif. Ces enfants sont évalués avec des tâches investiguant le domaine numérique via des tests de fluence mathématique et d'estimation numérique. Ils sont surtout évalués dans le domaine spatial : habiletés visuo-perceptives, visuo-spatiales et visuo-constructives, mais aussi dans le domaine mnésique et attentionnel avec la mémoire de travail et la mémoire de long terme visuo-spatiale et l'attention spatiale.

Les résultats de cette investigation révèlent que les enfants dyscalculiques présentent davantage de difficulté dans la réalisation de tâches mathématiques (fluence). Toutefois, ils affichent des performances similaires aux contrôles dans les tâches d'estimation numérique. Au niveau spatial, des difficultés dans les habiletés visuo-perceptives et visuo-spatiales sont relevées chez les dyscalculiques. Tandis qu'ils n'en manifestent pas dans la tâches visuo-constructive et attentionnelle. Au niveau mnésique, les participants dyscalculiques présentent de moins bonnes compétences d'encodage que les enfants contrôles, que ce soit dans une tâche séquentielle ou simultanée. De plus, la présentation structurée des items permet un meilleur encodage pour les deux groupes. Concernant la mémorisation à long terme, les participants dyscalculiques sont capables d'apprendre un pattern visuo-spatial mais pas un pattern visuo-spatial séquentiel.

Ce bilan permet d'apporter des informations supplémentaires concernant le profil de ces enfants, et notamment le fait que les dyscalculiques présentent des profils variés dans l'atteinte de leurs compétences visuo-spatiales.