

**Faculté de psychologie et des sciences
de l'éducation**

Les connaissances géométriques de base chez l'enfant aveugle : comparaison d'enfants tout-venant et d'enfants aveugles

Auteur : Pierret Elisa

Promoteur : Crollen Virginie

Lecteurs : Marlair Cathy et Noël Marie-Pascale

Année académique 2019-2020

Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de Master en logopédie

Université Catholique de Louvain



Faculté de Psychologie et des Sciences
de l'Éducation : Ecole de Logopédie

Les connaissances géométriques de base chez l'enfant aveugle : comparaison d'enfants tout-venant et d'enfants aveugles

Promoteur : Crollen Virginie

Mémoire présenté en vue de
l'obtention du grade de Master
en logopédie par Elisa Pierret

Louvain-la-Neuve
Juin 2020

Remerciements

Ce mémoire représente le point final de cinq années d'études, de découvertes, de partages, de dépassement de soi, de rencontres... De nombreuses personnes ont contribué à l'aboutissement de cette formation universitaire et à la réalisation de ce travail. C'est pourquoi j'aimerais commencer par remercier ces personnes qui m'ont permis d'en arriver où j'en suis aujourd'hui et sans qui ce mémoire n'aurait pu avoir lieu.

En premier lieu, je tiens à remercier ma promotrice, Mme Virginie Crollen, pour son soutien, ses conseils, sa disponibilité et sa gentillesse tout au long de la réalisation de cette étude et de la rédaction de ce mémoire. Je souhaite également lui dire merci pour son aide précieuse dans la recherche de participants non-voyants.

Ensuite, je souhaite adresser mes remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidée dans la recherche des participants, qui m'ont accueillie chaleureusement et qui m'ont accordé un moment de leur temps précieux. Il s'agit de Mme Édith Bocquillon, orthophoniste à l'École Régionale pour Déficients Visuels de Loos (France) et de Mme Catherine Wibaut, logopède au Centre Provincial d'Enseignement Spécialisé de Mons. Je souhaite également citer Mme Pascale Roblain, Mme Annick Demarche, Mme Marylène Renoy, Mme Murielle Cope, Mme Laure Caps et Mme Johanna Feron qui ont été d'une aide incroyable dans la recherche d'enfants tout-venant ainsi que leurs directions qui ont accepté que je réalise les expériences au sein de leurs établissements. Enfin, il me semble important d'exprimer ma gratitude aux parents qui ont accepté que leurs enfants participent à cette étude. De plus, je suis également reconnaissante de l'enthousiasme des enfants lors de la passation des différents exercices.

Mes parents pour m'avoir laissé réaliser les études de mon choix et pour avoir participé à la relecture de mon mémoire. Ma famille en général pour leur soutien tout au long de ce cursus universitaire.

Ma cousine, Valentine Pinson, sans qui l'impression 3D et la réalisation de la tâche de géométrie, élément central de cette étude, n'auraient pu se faire. Et, mon papa pour la réalisation des supports en bois et Plexiglas également utilisés dans cette épreuve.

Enfin, Johanna et Annick pour la relecture de ce travail et leurs conseils pour améliorer la qualité de cet écrit.

Table des matières

Remerciements	1
Introduction générale	5
Introduction théorique	7
Chapitre 1 : Développement numérique chez l'enfant voyant	7
1. Compétences numériques préverbales	7
1.1. La discrimination de numérosités	8
1.2. Les capacités arithmétiques.....	9
1.3. Les processus de quantification	10
2. Comptage.....	11
2.1. Phase d'acquisition.....	12
2.2. Phase d'élaboration	12
2.3. Le dénombrement.....	13
3. Nombres et espace	14
4. Arithmétique.....	16
4.1. Modèles développementaux.....	16
4.2. Additions	16
4.3. Soustractions	17
4.4. Multiplications et divisions	18
5. Géométrie	19
5.1. Connaissances géométriques.....	19
5.2. Connaissances spatiales	22
Chapitre 2 : Développement numérique chez l'enfant non-voyant.....	25
1. Compétences numériques précoces	25
2. Comptage.....	26
3. Nombres et espace	28
4. Arithmétique.....	29
5. Géométrie	31

Partie pratique	33
Question de recherches et hypothèses	33
Méthodologie.....	35
1. Participants	35
2. Tâches.....	36
2.1. Tâche évaluant l'intelligence verbale	36
2.2. Tâche évaluant la compréhension des concepts géométriques de base	36
3. Procédure.....	38
Résultats	39
Discussion	45
1. Résumé des résultats obtenus	45
2. Mise en lien des données récoltées avec la recherche actuelle	48
2.1. Lien avec l'expérience de Dehaene et al. (2006)	48
2.2. Lien avec l'étude d'Izard & Spelke (2009).....	48
2.3. Lien avec les autres domaines de la cognition numérique investigués chez l'aveugle.....	50
2.4. Lien avec le développement des connaissances spatiales	51
3. Limites de l'étude.....	54
3.1. Limites méthodologiques.....	54
3.2. Limites liées à la construction de la tâche.....	55
4. Apports de l'étude	56
5. Nouvelles perspectives	56
Conclusion	59
Bibliographie.....	61

Introduction générale

Nous vivons dans un monde où nous sommes constamment entourés de nombres, de quantités et des mathématiques en général, que ce soit pour lire le numéro d'une maison, évaluer le nombre de personnes dans une file au magasin ou la quantité d'objets dans un caddie, compter notre argent, calculer le prix d'un article en solde, se repérer avec une carte... Sans nous en rendre compte la majeure partie du temps, nous utilisons donc les nombres quotidiennement. Étant donné leurs présences dans notre vie quotidienne, il est important de s'intéresser à l'impact que peut avoir une déficience sensorielle telle que la cécité sur l'utilisation de ces processus numériques, arithmétiques.

Le développement de l'enfant aveugle en comparaison à l'enfant voyant est un domaine de recherches qui se développe petit à petit depuis ces dernières années. L'étude de la cognition numérique¹ révèle que celle-ci n'est pas aussi dépendante de la vision comme certains pourraient le penser. Actuellement, les recherches comparatives entre les personnes voyantes et non-voyantes ont permis de découvrir que le développement du comptage, des processus de quantification, de la relation entre les nombres et l'espace et des opérations arithmétiques ne sont pas impactés d'un point de vue quantitatif par l'absence de vision. Toutefois, certaines différences qualitatives ont pu être observées entre les deux populations ; celles-ci seront détaillées dans la partie théorique de ce travail. De plus, certains domaines « numériques » n'ont à ce jour pas été investigués. C'est le cas de la géométrie de base où aucune étude ne permet de savoir si son développement chez l'enfant aveugle est similaire à celui de l'enfant tout-venant. Il est donc intéressant d'étudier cette question afin d'en savoir davantage sur les impacts de la cécité et d'aider les professionnels à mieux comprendre les particularités développementales liées à l'absence d'expérience visuelle.

Par conséquent, l'objectif de ce mémoire est d'étudier les connaissances géométriques de base chez l'enfant non-voyant en comparaison à celui de l'enfant voyant. Pour cela, nous avons rencontré 43 enfants âgés de 4 à 14 ans dans les deux populations afin de leur administrer une épreuve à choix multiple évaluant la compréhension des concepts géométriques de base. Deux modalités ont été employées : la modalité tactile

¹ La cognition numérique concerne l'ensemble des mécanismes impliqués dans le traitement des nombres et le calcul.

pour les enfants aveugles et une moitié des enfants voyants ; la modalité visuelle pour l'autre moitié des enfants voyants. Afin de construire cette épreuve, nous nous sommes inspirées de la tâche utilisée par Dehaene et al. (2006) examinant les connaissances géométriques dans une population non scolarisée, les indigènes d'Amazonie (Mundurukù). Nous avons adapté leur tâche à la modalité haptique en demandant aux enfants d'identifier quelle forme parmi les quatre violait le concept géométrique cible.

Nous émettons plusieurs hypothèses concernant les résultats que nous allons récolter. Premièrement, étant donné que plusieurs études montrent que la géométrie est fortement dépendante de la vision, nous pensons que les enfants aveugles pourraient démontrer des scores déficitaires en comparaison aux enfants voyants. Si cette hypothèse se confirme, nous pensons alors que l'expérience visuelle antérieure ne sera pas suffisante pour présenter une performance identique aux enfants voyants, la vision est nécessaire au moment de la passation de la tâche. Au contraire, étant donné que d'autres études ont montré que plusieurs domaines de la cognition numérique se développent sans difficulté en cas de cécité, les enfants aveugles pourraient également montrer de bonnes performances en géométrie. Enfin, nous supposons que l'âge influence le développement des compétences géométriques chez l'enfant aveugle et l'enfant voyant.

Concernant l'organisation de ce mémoire, il est divisé en deux parties. La première partie, l'introduction théorique, comprendra deux chapitres. Le premier chapitre abordera le développement numérique chez l'enfant voyant à propos des compétences numériques précoces, du comptage, de l'arithmétique, de la relation entre les nombres et l'espace et enfin de la géométrie. Ensuite, le deuxième chapitre fera le parallèle avec le développement chez l'enfant aveugle afin de cerner les particularités développementales liées à la cécité. La deuxième partie de ce travail, la partie pratique, est divisée en quatre sous-points : la question de recherche et les hypothèses qui en découlent, la démarche méthodologique utilisée pour récolter les données, la présentation des résultats et pour finir, une discussion à propos des résultats obtenus, des limites et apports de cette étude.

Introduction théorique

Chapitre 1 : Développement numérique chez l'enfant voyant

Selon le constructivisme piagétien, ce n'est qu'à partir de l'âge de 6-7 ans que l'enfant peut construire une représentation mentale du concept du nombre, une fois qu'il acquiert le principe de conservation². Avant cela, toute utilisation du nombre ne serait qu'une manifestation verbale et n'aurait aucun lien avec la construction du concept du nombre. Pour Piaget, l'enfant vient au monde sans aucune compétence numérique innée, les différentes acquisitions se font grâce aux interactions avec l'environnement. Ce n'est qu'à partir des années 80 que les chercheurs commencent à s'intéresser aux compétences numériques non verbales chez le bébé et le jeune enfant. (Vauclair, 2000 ; Camos, 2011)

Dans ce chapitre, le développement numérique de l'enfant voyant dans différents domaines sera abordé, à savoir : les compétences numériques préverbaux, le comptage, l'arithmétique, les nombres et l'espace ainsi que la géométrie. Les différentes recherches exposées remettront en question les théories piagésiennes selon lesquelles l'existence de compétences numériques n'apparaît pas avant l'âge de 7 ans. En effet, contrairement aux idées de Piaget, il semblerait que l'enfant ait des connaissances numériques innées. Celles-ci seront par la suite le socle d'apprentissages numériques plus précis et plus abstraits.

1. Compétences numériques préverbaux

Afin d'évaluer les compétences numériques du très jeune enfant, la plupart des chercheurs ont eu recours au paradigme d'habituation. Ce paradigme permet de mesurer l'intérêt de l'enfant pour la nouveauté via le temps de fixation ou le réflexe de succion. Pour cela, dans un premier temps, l'enfant est habitué à un stimulus en le lui présentant de manière répétitive, entraînant une diminution de son intérêt. Dans un deuxième temps, un nouveau stimulus est présenté à l'enfant, l'observation d'un regain d'intérêt démontre la présence chez l'enfant d'une capacité de discrimination des deux stimuli présentés

² Capacité à comprendre que deux quantités égales restent égales malgré une transformation visible.

(Rousselle, 2005 ; Camos, 2011). Deux secteurs ont été particulièrement investigués : la discrimination de numérosités et les capacités arithmétiques.

1.1. La discrimination de numérosités

Les premiers à avoir étudié la discrimination de numérosités chez le bébé sont Starkey et Cooper (1980). En utilisant le paradigme d'habituation, ils ont pu mettre en évidence que des bébés âgés de 4 à 7 mois étaient capables de faire la différence entre des collections linéaires de 2 ou 3 points. Toutefois, ils ne parvenaient pas à détecter un changement entre une collection de 4 et de 6 points. Ces observations ont ensuite été répliquées par Antel et Keating (1983, as cited in Vauclair 2000 ; Rousselle, 2005) avec des bébés de 2 jours et par Strauss et Curtiss (1981 as cited in Vauclair, 2000) avec des enfants entre 10 et 12 mois. Les bébés sont également capables de discriminer des collections hétérogènes (Strauss & Curtis 1981 ; Starkley et al., 1990), des stimuli en mouvement (2 vs 3, 3 vs 4 rectangles en mouvement ; van Loosbroek & Smitsman, 1990) et des stimuli séquentiels (sauts de poupée ; Wynn, 1996).

Ces différentes études semblent montrer que le bébé est capable de discriminer uniquement des petites numérosités (jusqu'à 3-4). En réalité, il a été démontré (Xu, 2003 ; Xu & Spelke, 2000 ; Xu et al., 2005 ; Wood & Spelker, 2005a) que des bébés de 6 mois parvenaient à faire la différence entre de plus grandes numérosités à condition que le rapport entre les collections soit de $\frac{1}{2}$ (e. g., 8 vs 16). Il en est de même pour des stimuli en mouvement (Wood & Spelke, 2005b) et des stimuli auditifs (Lipton & Spelke, 2003, 2004). La limite de discrimination n'est donc pas liée à la taille des numérosités mais au rapport entre les numérosités à discriminer (Vauclair, 2000).

Puisque le bébé est capable de discriminer la numérosité de stimuli visuels et auditifs, il est intéressant de savoir si les représentations sont amodales ou spécifiques à chaque modalité. Pour examiner cela, une planche représentant deux ou trois objets hétérogènes était présentée à des bébés entre 6 et 8 mois en même temps que deux ou trois coups de tambour (Starkey et al., 1983, 1990). Les résultats montrent que le bébé regardait en direction de la planche contenant le même nombre d'objets que de coups entendus. Par conséquent, le bébé peut, très tôt, mettre en lien des représentations numériques de modalités différentes et en déterminer l'équivalence. Néanmoins, le fait que les représentations numériques chez l'enfant soient abstraites est remis en question dans d'autres études où les résultats obtenus divergent (Bideaud et al., 2004).

En résumé, le bébé est capable de discriminer des petites numérosités et de plus grandes numérosités lorsque le rapport de $\frac{1}{2}$ est respecté entre les deux collections. Les différentes expériences ont également pu mettre en évidence la capacité du jeune enfant à discriminer des numérosités identiques, hétérogènes, visuelles et auditives. De plus, les représentations numériques pourraient être amodales et abstraites. Enfin, les recherches indiquent que les compétences numériques précoces des bébés ne se limitent pas à la discrimination de numérosités. Ils présentent également des capacités arithmétiques précoces.

1.2. *Les capacités arithmétiques*

Grâce au paradigme de violation des attentes³, la présence de capacités arithmétiques précoces a pu être mise en évidence chez le bébé. La première à s'y être intéressée est la chercheuse Wynn (1992). Dans son étude, un ou deux Mickey(s) (peluches) étaient présentés aux enfants sur une petite scène. Ensuite, un écran était relevé de manière à cacher le ou les Mickey(s). Ensuite, un Mickey était ajouté ou retiré afin de réaliser une addition ($1+1$) ou une soustraction ($2-1$). Dans les deux conditions, deux résultats étaient présentés aux enfants en abaissant l'écran : un résultat possible ($1+1 = 2$ ou $2-1 = 1$) ou impossible ($1+1 = 1$ ou $2-1 = 2$). Les bébés âgés de 5 mois fixaient significativement plus longtemps le résultat impossible que le résultat possible, et ce, dans les deux conditions. Néanmoins, le fait que la situation du résultat impossible corresponde à la situation de départ ne permet pas de savoir si l'enfant anticipe le résultat. En effet, il pourrait simplement attendre un résultat différent de la situation initiale. Pour répondre à cette interrogation, Wynn (1992) a réalisé une seconde expérience. Cette fois, le résultat impossible était numériquement différent de la situation de départ ($1+1 = 3$). Les résultats ont montré que l'enfant anticipe le résultat final puisqu'il regarde plus longtemps le résultat impossible. Par la suite, d'autres expériences similaires ont également été réalisées afin de s'assurer que la réponse de l'enfant n'était pas liée à une violation des attentes par rapport à la localisation des objets (utilisation d'une plaque tournante ; Dehaene & Melher, 1997 as cited in Rousselle, 2005). Les résultats ont aussi été répliqués avec des personnages ayant des identités physiques différentes. En conclusion, pour Wynn (1992), les bébés sont capables de réaliser des petites opérations arithmétiques additives et soustractives en calculant le résultat précis. En revanche, cette

³ Paradigme selon lequel les bébés ont tendance à fixer plus longtemps des événements inattendus ou physiquement impossibles.

conclusion n'est pas partagée par tous (Rousselle, 2005 ; Camos, 2011). En effet, pour certains chercheurs, les résultats ne sont pas dus aux capacités arithmétiques du bébé, mais à ses capacités mnésiques, au nombre de mises à jour des représentations mentales du bébé. Pour d'autres, cela est expliqué par la préférence des bébés pour la familiarité (ex : $1+1 = 1$ vs $1+1 = 2$) ou pour la complexité (ex : $1+1 = 3$ vs $1+1 = 2$).

1.3. *Les processus de quantification*

Les différents résultats obtenus précédemment suggèrent l'existence de deux systèmes de quantification préverbaux distincts et innés. Un premier système numérique précis, le subitizing, permettrait aux bébés de discriminer précisément de petites numérosités (inférieures à quatre). Un deuxième mécanisme, le système numérique approximatif (« Approximate Number System » - ANS), permettrait quant à lui de discriminer deux collections de plus de 3-4 items pour autant qu'il y ait un rapport d'un demi entre les deux collections.

Le subitizing qui peut être défini comme « *l'appréhension quasi immédiate des petites numérosités (jusqu'à 3, 4) par opposition au processus sériel de comptage nécessaire pour l'appréhension exacte de numérosités supérieures* » (Palmer & Noël, 2004, p.235). Ce processus de quantification est un mécanisme inné qui ne peut se mettre en place que lors de présentations simultanées de stimuli et qui va permettre de distinguer précisément et rapidement de petites collections (3-4 items). Il correspond au système d'individuation parallèle ou système de suivi de l'objet. Un marqueur d'individuation spatiale est créé simultanément et en parallèle pour chaque item sur base de leurs caractéristiques spatio-temporelles afin d'obtenir une représentation mentale de la collection et de la quantifier immédiatement. De plus, le subitizing semble dépendre de la mémoire de travail visuelle et faire appel aux traitements pré-attentionnels puisqu'il est limité à de petites numérosités (Hyde, 2011 ; Lafay et al., 2013). Néanmoins, il ne s'agit pas réellement d'un processus numérique mais davantage d'une capacité perceptive globale (Noël & Palmer, 2003 ; Palmer & Noël, 2004 ; Rousselle, 2005, Camos, 2011). Enfin, il semblerait que ce système joue un rôle important dans l'acquisition du dénombrement, du comptage (Habib, 2018). Les associations entre les petites quantités et les mots-nombres apprises initialement vont se généraliser petit à petit aux plus grandes quantités. L'enfant découvre ainsi le principe de cardinalité.

Ensuite, le deuxième système, le système numérique approximatif ou ANS représente les grandes quantités de manière imprécise et est également hérité de l'évolution, inné. Il va permettre de percevoir et d'estimer approximativement les quantités, et ce, rapidement. Il est donc fonctionnel pour discriminer de grandes collections à condition que le ratio entre celles-ci soit suffisant. De plus, son imprécision augmente avec la taille des numérosités. En effet, il obéit à la loi de Weber, à savoir une compression logarithmique des représentations numériques au fur et à mesure que la numérosité augmente. Cette compression se traduit par deux effets, à savoir l'effet de taille : comparaison plus rapide de petites quantités et l'effet de distance : comparaison plus rapide de quantités éloignées (Hyde, 2011 ; Lafay et al., 2013). Pour rendre compte de ce système, deux modèles ont été développés : le modèle de l'accumulateur de Meck et Church et le modèle neuronal de Dehaene et Changeux (Palmer & Noël, 2004 ; Rousselle, 2005). Ils ne seront pas détaillés, car ils ne font pas l'objet de ce mémoire.

Enfin, un troisième processus de quantification existe. Il s'agit du système numérique exact qui représente les quantités de manière précise et dépend du langage (Kanjlia et al., 2018). Il correspond au dénombrement qui sera abordé dans le point suivant et permet d'atteindre un niveau de représentation beaucoup plus précis. Néanmoins, contrairement aux deux autres systèmes, il s'agit d'un système symbolique qui nécessite un apprentissage et dépend de l'éducation.

2. Comptage

D'après Fuson et al. (1982), le développement du comptage et de la chaîne numérique verbale se fait en deux grandes étapes : la phase d'acquisition et la phase d'élaboration. Par ailleurs, l'apparition progressive du comptage va permettre à l'enfant d'augmenter ses capacités de discrimination. En effet, au fur et à mesure du développement du comptage, l'acuité numérique augmente et l'ANS devient plus précis (Halberda & Feigenson, 2008). De plus, il a été montré que des enfants de 3 ans et demi qui ne maîtrisent pas le comptage verbal ont des capacités discriminatives équivalentes aux bébés. À l'inverse, ceux qui maîtrisent le comptage verbal peuvent discriminer des numérosités allant jusqu'à quatre lorsque la différence n'est que de un. (Lecointre et al., 2005)

2.1. Phase d'acquisition

Dans cette phase, l'enfant va, tout d'abord, mémoriser la séquence verbale et ensuite, découvrir la structure linguistique. Durant le temps de la mémorisation, il va apprendre par cœur la suite de mots-nombres jusqu'à 20, et stocker ceux-ci en mémoire à long terme. Ces mots doivent également être mémorisés et rappelés dans le bon ordre. Il s'agit par conséquent d'un apprentissage lent et difficile ayant lieu entre l'âge de deux et six ans (Barrouillet et al., 2007). L'analyse des productions des enfants dans l'étude de Fuson et al. (1982) met en évidence trois étapes dans la litanie de la chaîne verbale :

- **La portion stable conventionnelle** correspond à la suite correcte de mots-nombres que l'enfant répète à chaque fois et qui augmente avec l'âge, surtout à partir de 4 ans.
- **La portion stable non conventionnelle** correspond à une suite de quelques nombres que l'enfant répète systématiquement mais qui n'est pas correcte.
- **La partie non stable et non conventionnelle** apparaît lorsque l'enfant veut aller le plus loin possible dans son comptage, au-delà de ses connaissances, entraînant une suite de nombres incorrecte et instable d'une fois à l'autre.

Dans un deuxième temps, l'enfant découvre la structure linguistique des mots-nombres et s'aide alors de la syntaxe dans son apprentissage. En effet, à partir du nombre 17, la structure linguistique des mots-nombres devient régulière. Et, il découvre les deux types de règles syntaxiques combinatoires pour former les mots-nombres : additives (e.g., $26 = 20 + 6$) et multiplicatives (e.g., $300 = 3 \times 100$).

2.2. Phase d'élaboration

Au départ, pour l'enfant, la chaîne numérique verbale est un tout indissociable et petit à petit, il va décomposer cette chaîne en éléments. Fuson et al. (1982) distinguent 5 niveaux d'élaboration entre 4 et 7/8 ans :

- **Niveau chapelet** : les numéraux verbaux font partie d'une suite, d'un tout indissociable. Les mots-nombres ne sont pas encore individualisés, isolables. À ce stade, l'enfant récite une suite numérique sans signification pour lui, sans coupure entre les mots.
- **Niveau de la chaîne insécable** : les mots-nombres s'individualisent, ils sont perçus comme étant des éléments distincts. L'individualisation des mots-nombres permet à l'enfant de commencer à réaliser des correspondances termes à termes. Néanmoins, à

ce stade, l'enfant doit compter à partir de un, la litanie doit être récitée dans son entièreté.

- **Niveau de la chaîne sécable** : les liaisons entre les différents mots de la chaîne numérique verbale deviennent plus claires pour l'enfant, il peut alors commencer à compter n'importe où dans la suite. Il peut donc compter à partir d'une borne inférieure⁴ et également entre une borne inférieure et supérieure⁵. L'enfant va aussi pouvoir commencer compter à rebours.
- **Niveau de la chaîne dénombrable/numérable** : l'enfant fusionne les notions de comptage et de cardinalité, les mots deviennent des nombres. Il peut alors compter à l'endroit et à l'envers, x éléments à partir d'une borne, déterminer le nombre de pas de comptage entre deux bornes. Néanmoins, les épreuves nécessitant un comptage à rebours restent difficiles, car elles exigent une charge cognitive importante.
- **Niveau de la chaîne bidirectionnelle** : le comptage à rebours ne requiert plus une charge mentale en mémoire à court terme importante. Désormais, les relations entre les nombres dans le comptage à rebours sont maîtrisées par l'enfant.

2.3. Le dénombrement

Le dénombrement est un processus de quantification, une « *opération complexe qui implique le langage et la mise en correspondance terme à terme de chaque item présenté avec un nom de nombre de la chaîne numérique verbale* » (Piazza, 2004, p.115). Il « *permet une quantification précise quelle que soit la taille des collections, mais il nécessite d'autant plus de temps que la quantité augmente* » (Lecoindre, Lépine & Camos, 2005, p.41). Ce processus a été largement étudié depuis de nombreuses années et en particulier par Gelman & Gallistel (1978). Ils mettent en avant l'existence de 5 principes permettant de dénombrer les collections :

- **Le principe d'ordre stable** : les mots-nombres sont énoncés dans le même ordre, selon une même séquence pour chaque collection dénombrée.
- **Le principe de correspondance terme-à-terme** : à chaque élément de la collection ne correspond qu'un seul mot-nombre.
- **Le principe cardinal** : le mot-nombre associé au dernier élément de la collection correspond à la quantité d'éléments dans la collection, au nombre total d'items.

⁴ Nombre à partir duquel l'enfant commence son comptage.

⁵ Nombre à partir duquel l'enfant arrête son comptage.

- **Le principe d'abstraction** : toutes sortes d'items peuvent être comptés, le dénombrement peut avoir lieu avec des collections hétérogènes.
- **Le principe de non-pertinence de l'ordre** : l'ordre dans lequel a lieu le dénombrement n'a pas d'importance, ne modifie pas le résultat final. Il peut se faire de gauche à droite, de bas en haut ou inversement.

Selon ces auteurs, ces principes sont innés, il s'agit de la théorie « principes-first ». Ceux-ci vont alors permettre les apprentissages numériques. Les erreurs qui peuvent être présentes chez le jeune enfant sont la conséquence, d'après Gelman & Gallistel (1978), d'une mauvaise coordination des cinq principes, d'un coût de gestion et non pas d'une mauvaise compréhension des principes. À l'inverse, selon la théorie « experience first » (Briars & Siegler, 1984 ; Fuson, 1988 ; Fuson & Hall, 1983 as cited in Lecointre et al., 2005), les principes de dénombrement sont appris suite à une série d'apprentissages numériques, par répétition, imitation du dénombrement. Malgré cette divergence entre les deux théories sur le mode d'acquisition des principes de dénombrement, elles s'accordent sur le fait que l'enfant possède des capacités de quantification précoces et, que ses compétences en dénombrement augmentent au cours du développement.

3. Nombres et espace

Avec la scolarisation et le développement du langage, de la chaîne numérique verbale et du dénombrement, les représentations numériques non-symboliques (ANS et Subitizing) se combinent pour former le système numérique analogique également utilisé chez l'adulte et basé sur une représentation ordinale des quantités (Camos, 2011 ; Habib, 2018). Cette représentation ordinale peut être modélisée sous la forme d'une ligne numérique mentale orientée de gauche à droite, des petits nombres vers les plus grands nombres (Dehaene, 1997). En outre, la ligne numérique mentale est compressible, un espace plus important est accordé aux petites numérosités alors que les grandes numérosités sont compressées dans un espace plus réduit. Par conséquent, elle obéit à la loi de Weber ; les effets de taille et de distance apparaissent également (Dehaene, 1997). Par contre, avec la scolarisation, entre l'âge de 7 et 11 ans, cette représentation logarithmique des nombres tend petit à petit vers une représentation linéaire (le même espace est accordé entre les nombres), identique à celle de l'adulte (Siegler & Booth,

2004 ; Habib, 2018). Enfin, plusieurs éléments ont permis de conclure que cette ligne numérique mentale possède plusieurs composantes visuo-spatiales.

Tout d'abord, l'orientation spatiale des nombres de la gauche vers la droite a pu être observée grâce à l'effet SNARC (Spatial Numerical Association of Response Codes) : lien systématique entre le côté de la réponse, l'espace et la magnitude du nombre. Ainsi, les temps de réaction sont plus courts dans une tâche de comparaison de numérosités lorsque la réponse est associée à l'espace gauche pour les petites numérosités et à l'espace droit pour les plus grandes numérosités. Cet effet est également présent lorsque les mains sont croisées pour répondre. Les nombres sont donc liés à l'espace extracorporel, les petits nombres sont représentés dans l'espace gauche et les grands nombres dans l'espace droit. De plus, l'effet SNARC se retrouve à la fois chez les personnes droitières et gauchères. Selon Dehaene (1997), l'orientation de la gauche vers la droite est influencée par le sens de lecture, d'écriture. Elle dépend donc de la culture.

Ensuite, l'effet de « pseudo-négligence » est un biais vers la gauche présent en cas de bissection de lignes (estimer le milieu d'une ligne) et d'intervalles de nombres (estimer le milieu d'une paire de nombres). Les participants ont tendance à décaler le milieu de l'intervalle ou de la ligne vers la gauche. Ce biais apparaît en raison de l'espace plus important attribué aux petites numérosités et reflète une dominance hémisphérique asymétrique. (Göbel et al., 2006 ; Loftus et al., 2009 ; Longo & Lourenco, 2007 ; Oliveri et al., 2004 as cited in Cattaneo et al., 2011).

Enfin, lors de la présentation d'additions et de soustractions, un déplacement visuo-attentionnel sur la ligne numérique mentale est observé. Le temps de réaction est alors plus court pour détecter une cible dans le champ visuel droit après la présentation d'une addition et pour détecter une cible dans le champ visuel gauche après une soustraction (Masson & Pesenti, 2014). De plus, McCrink et al. (2007) remarquent un déplacement de l'attention vers la droite pour les additions et vers la gauche pour les soustractions. Par conséquent, les participants ont tendance à surestimer le résultat des additions et à sous-estimer le résultat des soustractions. En revanche, ce biais attentionnel n'est pas observé pour les divisions et les multiplications (Katz & Knops, 2014 ; Katz et al., 2017 ; Li et al., 2018 ; Mathieu et al., 2016 as cited in Crollen et al., 2019). En outre, l'apparition d'un distracteur dans l'espace gauche perturbe la résolution de soustractions et l'apparition d'un distracteur dans le champ visuel droit perturbe la résolution d'additions. Les temps de résolution sont alors plus longs (Masson & Pesenti, 2016).

4. Arithmétique

Comme nous avons pu le voir précédemment, il semble que, dès le plus jeune âge, les enfants sont capables de réaliser de petites opérations arithmétiques. Néanmoins, tous les chercheurs ne s'accordent pas sur cette capacité arithmétique précoce. Par contre, un point sur lequel tous s'accordent, c'est qu'à partir de 5 ans, un enfant est capable de réaliser des opérations arithmétiques sans avoir reçu aucun enseignement formel, explicite en recourant au comptage (Barrouillet et al., 2007).

4.1. *Modèles développementaux*

Deux grands modèles ont vu le jour, celui de Groen et Parkman (1972 as cited in Barrouillet et al., 2007) et celui de Siegler (1996 as cited in Barrouillet et al., 2007) afin de rendre compte du développement arithmétique chez l'enfant. Le premier modèle (Min model, Groen et Parkman, 1972) postule l'existence d'un développement par stades où chaque stade serait caractérisé par l'utilisation d'une stratégie⁶ particulière pour résoudre une opération arithmétique. Cette conception a été abandonnée au profit de la théorie de « Chevauchement de vagues » de Siegler (1996). Selon cette théorie, les enfants disposent de plusieurs stratégies à tout âge et, en grandissant, la fréquence d'utilisation de ces stratégies évolue. La fréquence d'utilisation d'une stratégie va avoir un impact sur la vitesse et la précision d'exécution des opérations arithmétiques (Gandini & Lemaire, 2005). Par conséquent, il semblerait que le choix de la stratégie dépende du coût d'utilisation et de son efficacité pour résoudre un problème (Barrouillet et al., 2007).

4.2. *Additions*

Afin de réaliser une opération arithmétique de type addition, plusieurs stratégies sont potentiellement utilisées par l'enfant. En effet, selon Siegler (1987 as cited in Barrouillet et al., 2007), il existe cinq grandes catégories : l'utilisation des objets, le comptage sur les doigts, le comptage verbal, la décomposition et la récupération en mémoire à long terme. Dès l'âge de 3 ans, l'enfant peut recourir à l'utilisation des objets (Fuson, 1982 as cited in Barrouillet et al., 2007). Pour ce qui est des deux stratégies de comptage (sur les doigts ou verbal), elles peuvent être séparées en trois sous-catégories (Brissiaud, 2003 as cited in Bideaud et al., 2004) : le counting all, le counting on et le

⁶ « L'ensemble des processus qu'un individu met en œuvre pour accomplir une tâche cognitive » (Gandini & Lemaire, 2005, p.140).

counting min. Le counting all correspond à recompter tous les éléments en partant de 1 (e.g., $2 + 3 : 1, 2, 3, 4, 5$). Il s'agit de la stratégie la plus précoce. Ensuite, l'enfant développe le counting on qui consiste à compter les éléments à partir du premier opérant (e.g., $2 + 3 : 2, 3, 4, 5$). Enfin, lors du counting min, l'enfant va commencer à compter à partir du plus grand opérant (e.g., $2 + 3 : 3, 4, 5$). Elle apparaît plus tardivement, vers l'âge de 5 ans. À 5 ans également, la décomposition (diviser un problème en deux problèmes plus simples) et la récupération en mémoire à long terme (récupération du résultat sans compter ou utiliser les doigts) commencent à être utilisées par l'enfant (Bideaud et al., 2004). Lors d'une étude avec des enfants de 4 et 5 ans, Siegler et Robinson (1982 as cited in Bideaud et al., 2004 ; Gandini & Lemaire, 2005) ont également pu observer un autre type de stratégie en les filmant : la stratégie des doigts (l'enfant lève les doigts correspondant aux deux opérants et répond sans comptage visible). Enfin, la sélection de la stratégie dépend fortement du type de problème additif posé à l'enfant et également du coût d'utilisation et de l'efficacité de celle-ci (Barrouillet et al., 2007).

4.3. Soustractions

Dès l'âge de 4-5 ans, un enfant parvient à résoudre des problèmes soustractifs simples en manipulant du matériel. Carpenter & Moser (1984 as cited in Barrouillet et al., 2007) décrivent trois types de stratégies observées chez l'enfant. La première stratégie, « séparer de », consiste à enlever un nombre d'objets (= deuxième opérant) d'un ensemble d'objets (= premier opérant), par exemple : enlever 5 objets d'un ensemble de 8 objets pour calculer $8 - 5$. La deuxième stratégie, « ajouter à », consiste à placer un nombre d'objets correspondant au deuxième opérant puis, à ajouter des objets pour atteindre le premier opérant. Le nombre d'objets ajoutés correspond à la réponse au calcul. Enfin, la dernière stratégie, « apparié », l'enfant met en correspondance terme à terme deux ensembles correspondant aux deux opérants. Les objets qui ne pourront pas être appariés seront dénombrés afin d'obtenir la réponse au problème. Enfin, il existe une autre stratégie, le comptage sur les doigts, où l'enfant va lever le nombre de doigts correspondant au premier opérant pour ensuite baisser le nombre de doigts correspondant au second opérant (Lemaire et al., 2002).

Tout comme pour les additions simples, Siegler (1989 as cited in Gandini & Lemaire, 2005) a étudié les stratégies utilisées par les enfants, entre la deuxième et la quatrième primaire, lorsqu'ils sont confrontés à une soustraction. Cette étude a mis en

évidence l'existence de deux types de stratégies : le retrait et l'ajout. Le retrait est utilisé lorsque l'enfant compte à rebours à partir du premier opérant avec un nombre de pas correspondant au deuxième opérant (e.g., $8 - 3 : 8, 7, 6, 5$). La stratégie d'ajout correspond au comptage en partant du deuxième opérant jusqu'au premier opérant (e.g., $8 - 3 : 3, 4, 5, 6, 7, 8$), la réponse correspond au nombre de pas entre les deux opérants. En plus de ces stratégies, comme pour l'addition, les enfants ont recours à la récupération en mémoire à long terme. Néanmoins, cela est moins fréquent que lors de problèmes additifs (Barrouillet et al., 2007). Il existe également la référence à un problème additif, l'enfant a compris le principe de commutativité et utilise l'opération inverse pour résoudre son problème soustractif (e.g., pour résoudre $8 - 3$, il se rappelle que $5 + 3 = 8$ et par conséquent, la réponse au problème initial est 5 ; Baroody, 1984 as cited in Barrouillet et al., 2007).

4.4. Multiplications et divisions

Il semblerait qu'il n'existe pas un développement spontané de stratégies de comptage chez le jeune enfant dans la résolution de multiplications et divisions comme pour l'addition et la soustraction (Barrouillet et al., 2007). Ainsi, Siegler (1988, as cited in Gandini & Lemaire, 2005) a observé les stratégies mises en place par des enfants de deuxième et troisième primaire pour résoudre une multiplication. En plus de la récupération en mémoire à long terme des faits arithmétiques⁷, trois autres stratégies ont été utilisées : l'addition répétée, le comptage d'ensemble d'objets et l'écriture du problème. L'addition répétée consiste à additionner un des opérants un nombre de fois correspondant à l'autre opérant (e.g., $3 \times 5 : 5 + 5 + 5$). Lorsque l'enfant dessine des groupes d'objets sur une feuille de papier et compte ensuite le nombre d'objets qu'il a dessiné, il recourt au comptage d'ensemble d'objets (e.g., 3×5 : il dessine trois ensembles avec 5 objets). Enfin, pour l'écriture du problème, l'enfant l'écrit sur une feuille et donne directement la réponse au calcul.

Concernant les divisions, les méthodes utilisées par l'enfant ont été très peu étudiées. Néanmoins, il semblerait qu'il recourt à la récupération de faits arithmétiques multiplicatifs associés (e.g. $15 : 3$, l'enfant se souvient que $3 \times 5 = 15$, la réponse est donc 5 ; Campbell, 1997 as cited in Barrouillet et al., 2007) et aussi à l'addition répétée du

⁷ Résultats d'additions ou de multiplications simples stockés en mémoire à long terme.

diviseur pour atteindre le dividende (e.g. $5+5+5 = 15$), la réponse étant le nombre de fois dont le diviseur a été additionné (Barrouillet et al., 2007).

Enfin, ces 4 opérations arithmétiques ne reposent pas sur les mêmes processus cognitifs. En effet, il semblerait que les problèmes additifs et soustractifs reposent majoritairement sur des stratégies visuo-spatiales. En revanche, les problèmes multiplicatifs sollicitent principalement des stratégies verbales et mnésiques. Ainsi, il existe deux réseaux distincts (Dehaene & Cohen, 1997). Le réseau subcortical gauche serait dédié au stockage et au retrait des faits arithmétiques reposant sur des représentations verbales et principalement utilisé dans les multiplications ou les additions simples, avec des nombres à un seul chiffre (ex. : $2+3$). Quant au réseau pariétal inférieur bilatéral, il semble consacré à la manipulation de quantités numériques et est employé pour résoudre des divisions, soustractions et additions complexes.

5. Géométrie

Par définition, la géométrie concerne le domaine d'étude des formes et de l'espace (espace physique et espace abstrait). D'après Marchand (2009), l'enseignement de la géométrie au primaire va permettre petit à petit de passer de l'espace physique à l'espace abstrait, basé sur les propriétés physiques des objets. Cela demande l'utilisation de connaissances géométriques et spatiales. En outre, tout comme la ligne numérique mentale, les compétences visuo-spatiales semblent jouer un rôle dans le développement des connaissances géométriques.

5.1. Connaissances géométriques

Le développement des connaissances géométriques a été modélisé par van Hiele en 1959 (as cited in Marchand, 2009 ; Braconne-Michoux, 2014). L'enfant passe par 5 niveaux hiérarchisés de pensée géométrique. Au niveau 1, stade de la *visualisation*, l'enfant a une pensée géométrique qui va lui permettre d'identifier, reconnaître une figure ou un solide en tenant compte de leurs aspects visuels et non des autres propriétés géométriques. Ensuite, au niveau 2, appelé *analyse*, l'enfant dépasse le stade des figures et solides isolés pour identifier les différentes catégories/classes de formes géométriques et les propriétés qui sont liées. Au stade de l'*abstraction*, l'enfant fait des liens entre les propriétés des différentes classes de formes géométriques, il perçoit les différentes

relations et organise les propriétés. Ce niveau continue à se développer durant le secondaire. Au quatrième stade, celui de la *déduction*, l'élève va pouvoir faire la différence entre les définitions et les axiomes, déterminer les conditions suffisantes et nécessaires. Enfin, au dernier niveau, *rigueur*, l'élève se préoccupe de la nature du système axiomatique et est capable d'imaginer d'autres systèmes axiomatiques. Cependant, van Hiele (1958 as cited in Braconnne-Michoux, 2014) n'est pas certain que ce niveau de pensée existe bel et bien.

En outre, toujours d'un point de vue développemental, l'étude de Pinet et Gentaz (2007) nous apprend qu'il est plus facile pour les enfants de 5 ans de reconnaître des figures prototypiques que des figures géométriques non-prototypiques. Une figure prototypique étant définie comme un élément très représentatif d'une classe de figures avec de nombreux attributs caractéristiques de la catégorie/classe. Ce prototype tient donc compte du rapport entre les longueurs des côtés et de l'orientation spatiale des côtés par rapport au sujet. Les résultats de cette étude indiquent également que le cercle est la figure la mieux reconnue ensuite, arrive le carré puis, le rectangle et enfin, le triangle. Une autre recherche (Satlow & Newcobe, 1998) s'est intéressée au développement des connaissances sur les formes géométriques. Les résultats indiquent que lorsqu'il faut réaliser une tâche de jugement de tri de formes géométriques, les enfants plus jeunes se basent davantage sur la similarité, les caractéristiques perceptuelles alors que les plus vieux se baseront principalement sur les définitions. De plus, cette étude met en évidence que ce changement de critères pour prendre une décision (des caractéristiques visuelles vers la définition) a lieu à des moments différents en fonction de la forme. Il a lieu vers l'âge de 4 ans pour les cercles, à 5 ans pour les rectangles, entre 5 et 7 ans pour les triangles et vers 7 ans pour les pentagones. Ce n'est qu'à partir de ce changement que les enfants peuvent identifier des formes atypiques. Ce changement pourrait être expliqué par l'instruction formelle durant l'école maternelle et également par la variabilité de l'aspect caractéristique de chaque forme géométrique. En revanche, la capacité à reconnaître et rejeter une forme non-valide apparaît rapidement et précocement.

Ensuite, une étude a pu mettre en évidence le caractère « inné » du développement des compétences géométriques (Dehaene et al., 2006). Dans cette expérience, les participants (enfants et adultes d'Amazonie ou américains) doivent trouver l'intrus parmi 6 figures. Plusieurs catégories sont représentées : la topologie, la géométrie euclidienne, les figures géométriques, les figures symétriques, les propriétés métriques et les

transformations géométriques. Les résultats montrent que les indigènes, enfants et adultes, ont une bonne compréhension des concepts de base de la topologie, de la géométrie euclidienne et des figures géométriques. Avec plus de difficultés, ils réussissent également à détecter les symétries et les propriétés métriques. Concernant les transformations géométriques, elles sont peu maîtrisées. Lorsque l'on compare les résultats du groupe indigène au groupe américain, les performances des enfants et adultes d'Amazonie sont équivalentes aux performances des enfants américains et inférieures à celles des adultes américains. En résumé, ces résultats suggèrent que les connaissances géométriques de base se développent en l'absence d'instruction, indépendamment de la culture, de manière intuitive. Les auteurs ont également pu conclure que ces connaissances se développent en l'absence d'une expérience avec des cartes, appareils de mesure ou d'un langage géométrique. Il semblerait donc que ces connaissances soient intuitives, innées.

Enfin, la sensibilité précoce à la géométrie a été étudiée. Il semblerait que très tôt, l'enfant soit capable de faire une différence entre des lignes de différentes longueurs (Slater et al., 1990 as cited in Izard & Spelke, 2009) ou entre des angles de différentes amplitudes (Slater et al., 1991 as cited in Izard & Spelke, 2009). Il s'avère donc que la sensibilité aux longueurs et aux angles soient robustes à travers l'enfance. De plus, selon Izard et Spelke (2009) qui ont repris la tâche utilisée par Dehaene et al. (2006), les enfants, dès l'âge de 4 ans, sont également sensibles aux propriétés euclidiennes et topologiques. En revanche, ils ne détectent pas les propriétés de symétrie et le sens. En outre, les enfants sont davantage sensibles aux angles qu'aux longueurs et présentent un profil analogue aux adultes qui ont une plus grande sensibilité aux angles et aux longueurs qu'au sens, à l'orientation. Lors d'une seconde expérience, les auteurs ont observé que la sensibilité aux propriétés géométriques s'améliore avec l'âge, pour atteindre un pic à l'âge de 12 ans. De plus, à tout âge, la sensibilité à la distance/aux longueurs est plus élevée que la sensibilité au sens/à l'orientation. Ensuite, dans une troisième expérience, les auteurs ont pu conclure que la sensibilité à la longueur s'acquiert plus tôt que la sensibilité aux angles. En effet, grâce à ces différentes expériences, les auteurs (Izard & Spelke, 2009) découvrent que la sensibilité aux longueurs est mature vers l'âge de 8 ans alors que la sensibilité aux angles n'est mature qu'à l'âge de 10 ans. Concernant le sens, il semblerait que cela ne se développe qu'à partir de l'adolescence. Enfin, les auteurs suggèrent que nous sommes tous dotés d'un système universel de connaissances géométriques à la naissance, « inné », ne dépendant pas de la culture ou du langage.

5.2. Connaissances spatiales

Nous savons que la géométrie ne s'arrête pas aux connaissances sur les formes et les solides. Etymologiquement, le terme géométrie signifie « Mesure de la Terre », la géométrie fut d'abord utilisée pour « *mesure et tracer la longueur, la superficie et la forme des surfaces terrestres* » (Dehaene et al., 2006, p.383). Par conséquent, des expériences ont également été menées dans ce domaine-là grâce à des tâches de navigation.

Tout d'abord, en s'inspirant de la perspective développée par van Hiele, pour rendre compte du développement des connaissances géométriques, Marchand (2009) a imaginé un modèle sur le développement des connaissances spatiales. Ainsi, trois niveaux hiérarchiques ont été définis. Le niveau 0 correspond aux objets et positions dans l'espace visible ou accessible, les figures ou solides sont constamment accessibles à l'enfant et les actions sont réalisées de manière concrète. Ensuite, le niveau 1 correspond à l'intériorisation de ces formes et actions grâce aux différentes manipulations réalisées au niveau 0. Enfin, au niveau 2, une fois que les connaissances spatiales sont intériorisées, les enfants vont pouvoir réaliser des manipulations mentales sur ces figures et solides, réaliser mentalement les actions.

Ensuite, afin d'évaluer les connaissances spatiales intuitives, une étude a comparé les performances d'un groupe d'indigènes (enfants et adultes) et celles d'un groupe d'Américains (enfants et adultes) (Dehaene et al., 2006). Les participants devaient retrouver la boîte dans laquelle se trouvait l'objet caché, après avoir reçu une carte indiquant l'emplacement de l'objet. Les résultats suggèrent qu'il n'y a pas de différence entre les enfants et les adultes indigènes, qui ont des performances semblables aux enfants américains. Tout comme pour la géométrie plane, il semble y avoir des connaissances géométriques/spatiales de bases partagées par les deux groupes et indépendantes du niveau d'instruction. Pour ce qui est du développement, jusqu'à l'âge de 4 ans, les enfants ne parviennent pas à se réorienter dans une pièce en forme de losange pour trouver l'objet caché, car ils ne parviennent pas à utiliser les informations à propos des angles (Hupbach & Nadel, 2005 as cited in Izard & Spelke, 2009). À l'inverse, dans la revue de la littérature de Cheng & Newcombe (2005 as cited in Izard & Spelke, 2009), les différentes études montrent que les participants (adultes et enfants) parviennent à se réorienter dans une pièce rectangulaire en tenant compte des longueurs et du sens. Ces différents résultats sont donc en opposition avec les études sur les formes planes,

puisque'ici, les enfants sont davantage sensibles aux longueurs et aux sens et n'utilisent pas les angles. Afin d'expliquer cette différence, plusieurs auteurs (Izard & Spelke, 2009 ; Spelke et al., 2010) avancent l'existence de deux systèmes de connaissances de base complémentaires pour la géométrie (voir figure 1). Le premier semble être dédié aux petites formes planes en deux dimensions permettant la reconnaissance et la catégorisation des objets par leurs formes et principalement basé sur l'analyse des angles et des longueurs relatives. Le deuxième système serait dédié aux grands espaces en trois dimensions, guidant la navigation et, majoritairement basé sur l'analyse des distances et du sens/de la direction. Néanmoins, séparément, ces deux systèmes présentent des limites ; ils ne rendent pas compte de l'entière de la géométrie euclidienne. Le système dédié à la navigation ne permet pas de rendre compte des angles et des surfaces en deux dimensions. En revanche, le système pour les formes/objets ne permet pas de distinguer des formes en miroir (sens) et ne s'applique pas dans des situations de navigation. En grandissant, les enfants dépassent ces limites en combinant les deux systèmes afin de construire un système de représentations géométriques plus complet et permettant la compréhension des symboles spatiaux (Spelke et al., 2010 ; Dillon & Spelke, 2015). L'intégration des deux systèmes n'est terminée que vers l'âge de 12 ans (Izard et al., 2011).

Core systems of Geometry

	Length / Distance	Angle	Sense / Direction
Navigating 3D spatial layout	✓	--	✓
Analyzing 2D visual forms	✓	✓	--

Figure 1 - Propriétés euclidiennes des deux systèmes de base de la géométrie. Repris de Spelke et al. (2010)

D'un point de vue cérébral, il a été démontré à travers plusieurs études que l'hippocampe joue un rôle crucial au niveau des représentations géométriques, et ce, chez plusieurs espèces : mammifères, oiseaux, amphibiens et poissons (McGregor et al., 2004 ; Mayer et al., 2016 ; Sotelo et al., 2016 ; Vargas et al., 2006 as cited in Vallortigara, 2017). Il semble donc qu'il y ait un mécanisme commun, partagé et homologue au niveau de l'hippocampe chez les vertébrés leur permettant de se réorienter spatialement (Vallortigara, 2017). Enfin, d'autres études chez l'animal ont montré une prédisposition cérébrale à utiliser les informations géométriques en l'absence d'expérience spécifique

(Langston et al., 2010 ; Wills et al., 2010 ; Chiandetti & Vallortigara, 2008 ; Vallortigara et al., 2009 as cited in Vallortigara, 2017). Ce mécanisme semble donc inné.

En outre, certaines régions cérébrales interviennent pour la navigation et d'autres pour l'analyse des formes. Ainsi, trois régions sont sélectives aux scènes : l'occipital place area (OPA), le retrosplénial complex (RSC) et la parahippocampal place area (PPA) (Dillon et al., 2017). La PPA est sensible aux changements d'angles et de longueurs relatives dans le contexte de scènes uniquement (pas d'activation en cas de contexte d'objets) et ne montre aucune sensibilité aux sens ou aux distances égocentriques. Il semblerait que cette zone intervienne surtout pour catégoriser le type de scène. À l'inverse, le RSC semble davantage lié aux relations de sens/direction et aux distances égocentriques. Il sous-tendrait la navigation sur base de la mémoire en suivant la position de la personne et en replaçant l'environnement dans un contexte plus large. Enfin, l'OPA est sensible à toutes ces informations : angles, longueurs relatives, distances égocentriques, sens. Elle aurait un rôle de « guide » au cours de la navigation en représentant les obstacles et les éléments spatiaux de la scène grâce à l'intégration des différentes informations. Ces résultats semblent indiquer que les informations principalement dédiées à la reconnaissance et la catégorisation des objets (longueurs et angles) sont également utilisées dans le cadre de l'analyse de scènes pour la navigation. Concernant les régions sélectives aux objets, deux régions y sont sensibles : le sulcus occipital latéral et le sulcus fusiforme postérieur. Les résultats ont montré que ces deux régions sont sensibles aux longueurs relatives et aux angles dans le contexte d'objets et également dans le contexte de scènes. Par conséquent, il semblerait que le cortex occipital fournisse un support secondaire pour l'analyse des scènes. (Dillon et al., 2017)

En résumé, ces deux systèmes de base sont communs à un grand nombre d'espèces animales et se développent dès le plus jeune âge, en l'absence d'éducation et d'expérience avec des cartes (Izard & Spelke, 2009 ; Spelke et al., 2010 ; Spelke, 2011). Néanmoins, il semblerait que l'utilisation des principes de la géométrie euclidienne se développe petit à petit avec l'âge pour devenir plus performante. Ainsi, les enfants vont combiner leurs deux systèmes de base. Spelke (2011) suggère que cette mise en relation des deux systèmes de représentations géométriques se fait grâce au développement du langage spatial. Il semble également que l'utilisation d'images, de dessins de toutes sortes où les enfants mobilisent différentes représentations géométriques, permet de mettre en relation les deux systèmes (Dillon & Spelke, 2015).

Chapitre 2 : Développement numérique chez l'enfant non-voyant

Le développement numérique chez l'enfant voyant a largement été documenté et investigué depuis plusieurs années. Nous allons désormais étudier ce qu'il en est chez l'enfant non-voyant dans les différents domaines qui ont été abordés précédemment. À première vue, nous pouvons penser que tous ces domaines sont liés à des aspects visuo-spatiaux, à la vision. Nous allons donc découvrir à quel point l'expérience visuelle influence ou pas le développement numérique de l'enfant, si elle est indispensable au développement des nombres ou non. Malheureusement, peu d'études ont été réalisées avec des enfants aveugles, par conséquent, les résultats des études présentées, ci-après, concernent principalement des adultes.

1. Compétences numériques précoces

Après avoir parcouru la littérature existante, il n'y a, à ma connaissance, aucune étude investiguant les compétences numériques précoces (discrimination et arithmétique) chez les bébés non-voyants. Cela est sans doute expliqué par le fait que les paradigmes utilisés pour rendre compte du développement de ce domaine sont principalement basés sur la vision. Néanmoins, pour ce qui est des processus de quantification, quelques études chez l'aveugle ont été réalisées. Malheureusement, actuellement, très peu ont investigué ces processus de quantification préverbaux chez l'enfant aveugle. Les résultats présentés ci-après concernent donc principalement des adultes aveugles.

Premièrement, concernant le subitizing, des chercheurs se sont intéressés à ce mécanisme chez l'adulte aveugle (Ferrand et al., 2010). Pour rappel, ce processus permet l'énumération rapide de petites quantités et est limité, chez le voyant, à des numérosités jusqu'à 3-4. Tout d'abord, lorsque les participants aveugles doivent réaliser une tâche d'énumération tactile avec des petites numérosités (1 à 3), le subitizing est également retrouvé. En outre, il a été observé en modalité auditive (Camos & Tillmann, 2008 as cited in Ferrand et al., 2010). Il semble donc que le subitizing soit un mécanisme perceptuel général, non lié à une modalité. Ensuite, les résultats montrent que les personnes aveugles ont des performances en subitizing identiques aux voyants. Ils ne comptent dès lors pas sur leurs plus grandes capacités attentionnelles. Par conséquent, il

semblerait que le subitizing soit un processus pré-attentionnel de bas niveau (Ferrand et al., 2010).

Deuxièmement, concernant le système numérique approximatif (ANS) et les capacités d'estimation, les résultats divergent d'une étude à l'autre en fonction du type de tâche d'estimation utilisée : réelle production ou non de la part du participant, petites ou grandes numérosités en jeu, utilisation du comptage possible ou pas (Castronovo & Seron, 2017a). Par conséquent, selon certaines études, aucune différence significative n'est retrouvée entre les voyants et les aveugles pour estimer le nombre de doigts stimulés (Ferrand et al., 2010). Toutefois, dans l'étude de Ferrand et al. (2010), une différence entre les deux populations est observée lorsque les voyants ont les yeux bandés : ils sont alors moins bons que les aveugles. Donc, les auteurs pensent que si la personne ne peut pas accéder à la numérosité par sa modalité dominante, elle sera impactée négativement dans ses capacités d'estimation. À l'inverse, d'autres études ont conclu que les personnes aveugles avaient de meilleures capacités d'estimation numérique. C'est le cas lorsqu'ils doivent produire un nombre de pas tout en produisant le son « da » ou répéter le non-mot « bam » et atteindre approximativement un nombre cible (Castronovo & Develvenne, 2013). Cette supériorité est aussi présente lorsqu'ils doivent appuyer sur une touche à plusieurs reprises rapidement pour atteindre approximativement le nombre cible ou estimer le nombre de sons entendus (Castronovo & Seron, 2007a). Les auteurs de ces études pensent que la privation visuelle a entraîné une amélioration des capacités d'estimation. Cette amélioration pourrait être expliquée par une meilleure mise en relation des numéraux verbaux (symboliques) et de la magnitude (Castronovo & Seron, 2007a ; Castronovo & Delvenne, 2013) ainsi que par une meilleure mémoire de travail (Dormal et al., 2016).

2. Comptage

Plusieurs études se sont penchées sur le comptage et le recours aux doigts chez l'enfant non-voyant. En effet, nous avons vu que l'utilisation des doigts lors du comptage est une pratique fréquente chez l'enfant voyant. Cela leur fournit un support pendant qu'ils réalisent une tâche de comptage et les aide à comprendre le principe de correspondance terme à terme, de l'ordre stable et de cardinalité (Weise, 2007 as cited in Crollen et al., 2011). De plus, les doigts permettent de représenter les nombres de manière iconique (Fayol & Seron, 2005 as cited in Crollen et al., 2011) et participent à la

compréhension du système en base 10 (Crollen et al., 2011). Ainsi, qu'en est-il de l'utilisation des doigts lors du comptage chez l'enfant aveugle ? Est-ce nécessaire pour le développement du comptage ? Il semblerait que l'utilisation des doigts ne soit pas indispensable au bon développement du comptage (Crollen et al., 2011). En effet, bien que les enfants aveugles utilisent très peu leurs doigts dans différents exercices de comptage, ils ne montrent pas de différence significative par rapport aux enfants voyants en ce qui concerne la précision de la performance. Il se peut que les enfants aveugles sollicitent davantage leur mémoire de travail auditive comme stratégie alternative aux doigts. Toutefois, ils sont moins performants dans une épreuve de comptage de deux cibles sonores, sans doute en raison de la non-utilisation des doigts ; la mémoire de travail est alors surchargée (Crollen et al., in press). De plus, lorsqu'ils ont recours à leurs doigts, ils le font d'une manière atypique ; ils ont tendance à recourir à la stimulation tactile sur leurs jambes et à utiliser un ordre de comptage atypique et instable. À l'inverse, pour le « montring »⁸, les enfants aveugles utilisent autant leurs doigts que les enfants voyants. En revanche, que ce soit pour le comptage ou le « montring », leurs configurations sont moins canoniques. En conclusion, la vision n'est pas nécessaire au développement du comptage. Néanmoins, elle joue un rôle crucial dans l'élaboration des interactions nombres-doigts. Ces interactions semblent donc dépendre de l'expérience visuelle et ne sont pas le résultat d'un mécanisme inné. (Crollen et al., 2011)

Une deuxième étude, cette fois-ci avec des adultes non-voyants, confirme également l'hypothèse que l'utilisation des doigts n'est pas obligatoire pour obtenir des performances optimales dans les activités de comptage (Crollen et al., 2014). Celle-ci a également permis de rejeter l'hypothèse que l'utilisation des doigts se développe plus tard chez la personne aveugle puisque très peu de participants aveugles ont recours à leurs doigts lors de différentes tâches de comptage. Par conséquent, dans les tâches avec interférence au niveau des mains (presser une balle avec chaque main en même temps que la réalisation des tâches de comptage), les aveugles précoces ne sont pas impactés puisqu'ils n'utilisent pas habituellement leurs doigts. Au contraire, les adultes voyants et aveugles tardifs, qui eux recourent spontanément à l'utilisation des doigts, sont impactés par cette interférence. Les auteurs suggèrent donc que la vision joue un rôle important dans le lien entre les nombres et les doigts, sans doute parce que les doigts permettent de soulager la mémoire de travail.

⁸ Montrer un nombre, une quantité avec ses doigts.

En conclusion, ces résultats mis en lien avec les autres résultats sur les compétences numériques précoces permettent d'appuyer l'idée que l'absence de vision et le manque d'expériences visuelles n'affectent pas le développement des différents processus de quantification : subitizing, estimation et comptage.

3. Nombres et espace

Le passage d'une représentation cardinale à une représentation ordinale des quantités apparaît également chez l'aveugle. Le développement de la ligne numérique mentale ne semble donc pas dépendre de la vision. Elle se développe de la même façon, avec des caractéristiques identiques. En effet, concernant l'effet de distance, mis en évidence chez l'adulte aveugle au moyen de tâches de comparaison de nombres ou de jugement de parité, il n'y a pas de différence avec l'adulte voyant (Szucs & Csépe, 2005 ; Castronovo & Seron, 2007b). En ce qui concerne l'effet de taille, les aveugles, comme les voyants, montrent une augmentation de la variabilité de leurs capacités d'estimation avec l'augmentation de la taille des numérosités. Ils sont de plus en plus approximatifs et imprécis. Néanmoins, les aveugles montrent un niveau de variabilité moins élevé et par conséquent, de meilleures capacités d'estimation que les voyants (Castronovo & Seron 2007a). Enfin, les différentes composantes visuo-spatiales de la ligne numérique mentale sont-elles également présentes chez l'aveugle ou sont-elles impactées par la cécité ? Nous allons étudier ce qu'il en est au niveau de l'effet SNARC et de l'effet de « pseudo-négligence ». Le déplacement visuo-attentionnel sur la ligne numérique mentale lors de la résolution d'opérations arithmétiques n'a, en revanche, pas encore été étudié.

Tout d'abord, concernant l'effet SNARC, évalué au moyen de tâches de comparaison et de jugement de parité en modalité auditive, il est aussi retrouvé chez les personnes non-voyantes, que ce soit pour des petites ou des grandes numérosités. Par conséquent, l'orientation de la ligne numérique mentale de la gauche vers la droite, des petites vers les grandes numérosités, est aussi présente chez les personnes non-voyantes. L'organisation de la représentation ordinale du nombre n'est pas impactée par l'absence d'expérience visuelle (Szucs & Csépe, 2005 ; Castrono & Seron, 2007a). En revanche, dans ces deux études, cet effet n'est testé qu'en condition « mains parallèles ». Or, une étude menée sur l'effet SNARC en condition « mains croisées » chez la personne aveugle (Crollen et al., 2013) nuance la conclusion que le développement de la ligne numérique mentale n'est pas dépendant de la vision, que la cécité n'empêche pas l'interaction entre

les nombres et l'espace. De fait, lors d'une tâche de comparaison de numérosités, les personnes voyantes et aveugles tardives montrent un effet SNARC en condition « mains parallèles » et « mains croisées ». En revanche, en condition mains croisées, les aveugles précoces montrent un effet SNARC inversé : ils sont plus rapides lorsqu'il faut répondre avec la main gauche pour de petites numérosités et avec la main droite pour de grandes numérosités. Ces résultats suggèrent que chez la personne aveugle précoce les numérosités sont liées à l'espace corporel et non à l'espace extracorporel comme c'est le cas chez les voyants et les aveugles tardifs. La cécité empêche donc l'utilisation d'un cadre spatial de référence externe au corps, elle affecte la nature de ce cadre de référence.

Ensuite, pour ce qui est de l'effet de « pseudo-négligence », il est également présent lors de bissection d'intervalles numériques (Cattaneo et al., 2011) ou de bissection de lignes en modalité tactile (Cattaneo et al., 2010 as cited in Cattaneo et al., 2011) chez la personne non-voyante. Ce biais semble même plus important chez cette dernière (Cattaneo et al., 2017). Ces résultats suggèrent donc que cette « pseudo-négligence » n'est pas liée à la modalité visuelle. La surestimation de la partie gauche de la ligne numérique mentale entraînant le biais vers la gauche semble refléter une asymétrie hémisphérique du traitement spatial, une dominance de l'hémisphère droit (Kinsbourne, 1970 as cited in Cattaneo et al., 2011). Et, selon les auteurs de l'étude (Cattaneo et al., 2017), le fait que ce biais soit plus important chez l'aveugle est dû à la privation visuelle. Celle-ci favorise un entraînement spatial plus important et par conséquent, une augmentation de l'asymétrie hémisphérique.

En résumé, la cécité n'empêche pas l'interaction entre les nombres et l'espace, le développement de la ligne numérique mentale orientée de la gauche vers la droite. En revanche, la façon dont l'espace est utilisé pour représenter les nombres se fait différemment en cas de privation visuelle. Le cadre de référence est, dans ce cas, lié à l'espace corporel, aux mains et non à l'espace extracorporel.

4. Arithmétique

Plusieurs études ont été menées afin d'étudier les compétences arithmétiques chez la personne non-voyante. Dormal et al. (2016) ont remarqué que pour des opérations soustractives et additives complexes (passage à la dizaine supérieure avec report), les aveugles précoces sont meilleurs que les voyants et les aveugles tardifs. Ils sont également

supérieurs lors de multiplications simples, ce qui n'est pas le cas lors d'additions simples : leurs résultats sont équivalents aux deux autres groupes. Ces résultats suggèrent donc que la vision n'est pas nécessaire pour atteindre un bon niveau de compétences arithmétiques. Au contraire, la cécité précoce permettrait d'augmenter les performances arithmétiques simples et complexes. Ces observations ne se retrouvent pas chez l'aveugle tardif. Les auteurs estiment donc qu'une privation visuelle pendant la période développementale entraîne une amélioration cognitive et sensitive des modalités non visuelles. En revanche, ces résultats ne sont pas toujours répliqués. Dans certaines études, les aveugles obtiennent des résultats équivalents aux voyants lors de la résolution de divisions (Rinaldi et al., 2018) et de soustractions (Kanjlia et al., 2016 ; Rinaldi et al., 2018 ; Crollen et al., 2019). Même si toutes les recherches ne pointent pas les mêmes résultats, il est certain que la vision n'impacte pas négativement le développement des capacités arithmétiques.

L'idée que la vision n'est pas indispensable au développement mathématique est également renforcée par d'autres recherches au niveau cérébral. Les résultats suggèrent que la VNFA⁹ (Visual Number Form Area, aire visuelle de la forme des nombres) encode les informations numériques de façon abstraite puisque l'activation cérébrale dans le sillon intrapariétal et les régions temporales inférieures est également présente chez l'aveugle (Abboud et al., 2015 ; Almaric et al., 2018). Elle n'est donc pas dépendante de la modalité visuelle ou de l'expérience visuelle. De plus, cela confirme l'hypothèse que les représentations mentales numériques sont amodales et accessibles à partir d'inputs auditifs, visuels ou tactiles (Piazza et al., 2006 ; Riggs et al., 2006 ; Tokita et al., 2013 as cited in Almaric et al., 2018). Par conséquent, les représentations cérébrales des concepts mathématiques se développent de la même façon en l'absence de vision (Abboud et al., 2015 ; Almaric et al., 2018). Toujours dans ce sens, Kanjlia et al. (2016) ont démontré que le réseau fronto-pariétal dédié aux nombres est également retrouvé chez les personnes aveugles. En effet, celui-ci s'active lorsqu'ils doivent résoudre des soustractions, ce qui n'est pas le cas lors d'une tâche de langage. Tout comme chez le voyant, l'activation du sillon intrapariétal et du cortex préfrontal dorsolatéral augmente avec la difficulté de la tâche. De plus, les résultats indiquent une activation du cortex visuel, uniquement chez la personne aveugle, lors de la résolution de soustractions. Ces observations sont retrouvées dans l'étude de Crollen et al. (2019). Une activation des régions occipitales dorsales, en

⁹ Aire cérébrale s'activant lors du déchiffrement des nombres symboliques écrits (nombres arabes et nombres romains) dans le but d'accéder à la quantité représentée par ceux-ci grâce aux connexions avec le sillon intrapariétal (Abboud et al., 2015).

plus de l'activation des régions fronto-pariétales, est observée uniquement chez les non-voyants. Or, ces régions occipitales dorsales sont connues pour être liées au traitement spatial chez l'aveugle (Dormal et al., 2012 as cited in Crollen et al., 2019). Les soustractions reposant principalement sur des stratégies visuo-spatiales, ces résultats suggèrent que, pour combler l'absence de ces stratégies en raison de la cécité, l'aveugle sollicite le cortex occipital. En revanche, l'étude de Crollen et al. (2019) indique qu'il n'y a pas de différence entre les voyants et les aveugles au niveau de l'activation cérébrale lors de la résolution d'opérations arithmétiques multiplicatives, les régions temporo-pariétales sont sollicitées par les deux populations. Les multiplications engageant principalement des stratégies verbales et mnésiques, cela explique certainement pourquoi le cortex occipital n'est pas recruté (Crollen et al., 2019). Pour conclure, ces différentes observations suggèrent donc une plasticité du cortex visuel : le réseau numérique colonise une partie du cortex occipital en l'absence de vision et un développement de la représentation des nombres non dépendant de la vision.

Qu'en est-il chez l'enfant ? Une seule étude s'est penchée sur le développement des compétences arithmétiques chez l'enfant aveugle (Crollen et al., in press). Lors de la résolution d'opérations arithmétiques (additions, soustractions et multiplications), les enfants aveugles sont supérieurs aux enfants voyants, ils réalisent moins d'erreurs et sont plus rapides. En outre, ils utilisent moins leurs doigts que les enfants voyants pour résoudre ces opérations.

5. Géométrie

À ma connaissance, il n'y a, à l'heure actuelle, pas encore eu d'étude sur le développement des connaissances géométriques de base chez la personne non-voyante. Par conséquent, deux grandes hypothèses peuvent être envisagées.

Premièrement, étant donné que le développement de la géométrie se fait sur base de certains éléments visuels chez la personne voyante, les connaissances géométriques des enfants non-voyants pourraient être déficitaires. En effet, nous avons, par exemple, pu voir dans le modèle de van Hiele (1959 as cited in Marchand, 2009 ; Braconné-Michoux, 2014) que l'enfant passe par cinq niveaux hiérarchisés de pensée géométrique. Or, le niveau 1, stade de la *visualisation*, est caractérisé par la reconnaissance d'une figure/solide par l'enfant en tenant compte de ses aspects visuels et non des autres

propriétés géométriques. Si cette hypothèse se vérifie, nous pensons alors que la vision sera nécessaire au moment de la passation de la tâche pour appréhender les concepts géométriques.

Deuxièmement, à l'inverse, nous avons vu précédemment que les personnes aveugles développent de bonnes compétences numériques dans plusieurs domaines tels que le comptage, les opérations arithmétiques, les capacités d'estimation. En outre, la relation entre les nombres et l'espace repose également sur des composantes visuo-spatiales et se développe de façon comparable chez la personne aveugle. Par conséquent, cela pourrait également être le cas du développement de la géométrie, qui repose aussi sur des caractéristiques visuo-spatiales.

Ce mémoire va permettre d'examiner ces hypothèses au moyen d'un test à choix multiple évaluant la compréhension des concepts géométriques de base en modalité tactile. Ce test consiste en la présentation de plusieurs planches sur lesquelles se trouvent 4 figures en trois dimensions. L'enfant doit alors déterminer quelle forme viole le concept géométrique cible. Pour ce qui est de l'échantillon de participants, nous avons testé des enfants non-voyants et des enfants voyants âgés entre 4 et 14 ans. Les enfants non-voyants présentent tous une cécité totale congénitale avec au maximum une perception de la lumière et peu de troubles associés. Quant aux enfants voyants, ils sont répartis en deux sous-groupes en fonction de la modalité utilisée pour réaliser la tâche : la modalité visuelle ou la modalité tactile.

Partie pratique

Question de recherches et hypothèses

Cette étude s'inspire d'une recherche de Dehaene et al. (2006) citée précédemment. Elle avait pour objectif d'évaluer le caractère inné des principaux concepts géométriques de base chez l'humain en comparant les performances d'adultes et enfants américains aux indigènes d'Amazonie (Mundurukù). Les résultats de cette étude semblent indiquer que la connaissance des concepts géométriques de base (points, lignes, parallélisme, topologie, figures, congruence, symétrie) est innée et indépendante de toute instruction, expérience avec des cartes, des appareils de mesure ou de l'utilisation d'un langage géométrique élaboré. Afin d'adapter ce test aux enfants aveugles, nous avons décidé d'utiliser la modalité tactile et de réduire le nombre d'items présentés simultanément à quatre.

La question ayant guidé cette recherche est la suivante : « **Le développement de la compréhension des concepts géométriques de base (parallélisme, figures, symétrie, congruence...) est-il influencé par l'expérience visuelle ?** ». L'objectif de cette étude est donc d'évaluer l'impact de la cécité, de l'absence de vision sur le développement des connaissances géométriques de base. Pour cela, trois populations seront comparées ; des enfants voyants réalisant la tâche les yeux ouverts, des enfants voyants réalisant la tâche les yeux bandés et des enfants non-voyants. En comparant ces trois populations, nous pourrions également examiner les trois sous-questions suivantes :

Premièrement, **existe-t-il une différence de performances entre les enfants voyants et les enfants aveugles ?** Etant donné le caractère visuel des connaissances géométriques, le manque d'expériences visuelles pourrait empêcher la bonne représentation mentale des concepts géométriques élémentaires, il s'agit de notre première hypothèse. Nous prédisons donc que les enfants aveugles devraient présenter de moins bonnes performances, en termes de temps de réaction et score de précision, par rapport aux enfants voyants. Au contraire, selon notre seconde hypothèse, la vision pourrait ne pas impacter le développement des connaissances géométriques de base comme cela est déjà le cas pour d'autres domaines numériques. Par conséquent, les enfants aveugles pourraient présenter des performances semblables aux enfants voyants.

Deuxièmement, **existe-t-il une différence de performances entre les enfants voyants réalisant la tâche les yeux ouverts et les yeux bandés ?** En répondant à cette question, nous pourrions confirmer ou infirmer notre troisième hypothèse selon laquelle l'expérience visuelle précoce n'est pas suffisante pour présenter de bonnes performances. Cela nous permettrait donc de savoir si la vision est nécessaire lors de la réalisation de la tâche ou si les représentations mentales géométriques déjà construites antérieurement sont suffisantes. Selon nous, les performances des enfants voyants avec les yeux bandés devraient être comparables à celles des enfants non-voyants et inférieures à celles des enfants voyants avec les yeux ouverts.

Troisièmement, **est-ce que l'âge influence les performances de réussite ?** Nous pourrions répondre à cette question grâce à la présence d'enfants de plusieurs niveaux scolaires allant de la deuxième maternelle à la troisième secondaire. Nous supposons que les enfants plus âgés seront plus performants que les enfants plus jeunes en raison du nombre d'années de scolarité plus élevé et du temps consacré à l'enseignement des concepts géométriques durant le cursus scolaire. Cette idée constitue notre quatrième hypothèse.

Méthodologie

1. Participants

Un échantillon de 43 enfants a été testé, avec 13 enfants aveugles et 30 enfants voyants. Les enfants ont tous entre 4 ans et 14 ans et sont de nationalité belge ou française. Le recrutement des enfants s'est fait au moyen d'une lettre à destination des parents (annexe 1) distribuée dans les écoles et au moyen d'une base de données recensant les participants d'études antérieures. La récolte des données a eu lieu entre mi-décembre 2019 et début mars 2020. En outre, nous avons apparié les enfants des trois populations au niveau de l'âge, du sexe et du QI verbal. L'analyse statistique ANCOVA montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les groupes au niveau de l'âge ($F(2,42) = 0.023$, $p > 0.9$, $\eta^2_p = 0.001$), du QI verbal évalué par la tâche de similitudes ($F(2,42) = 0.726$, $p > 0.4$, $\eta^2_p = 0.035$) et du sexe ($F(2,42) = 0.072$, $p > 0.9$, $\eta^2_p = 0.004$). Les enfants des trois groupes ont donc bien été appariés au niveau de ces trois variables.

Le groupe des enfants voyants tout-venant (groupe contrôle) est composé de 14 garçons et 16 filles. La moyenne d'âge est de 10 ans. Ces enfants ne présentent pas de trouble sensoriel (auditif et visuel), langagier, intellectuel, développemental, physique ou neurologique. Leur langue maternelle est le français et ils fréquentent tous l'enseignement ordinaire. En outre, aucun des enfants n'a doublé. Les enfants voyants étaient aléatoirement répartis en deux sous-groupes : voyant visuel (14 enfants) ou voyant tactile (16 enfants) selon la modalité utilisée pour résoudre la tâche.

Dans le groupe des enfants aveugles, nous retrouvons 7 filles et 6 garçons. L'âge moyen est également de 10 ans. La cause de la cécité est variable selon les enfants : aplasie des nerfs optiques, rétinopathie, syndrome de Norrie, syndrome de Morsier, dysplasie de la rétine, hypoplasie papillaire bilatérale ou albinisme oculo-cutané. Pour deux enfants, la cause de la cécité est inconnue. Au niveau de l'âge d'apparition de la cécité, elle est présente depuis la naissance pour 12 enfants et un enfant a perdu la vue à l'âge de 2,5 ans. La cécité est totale pour six enfants, avec une perception de la lumière pour cinq autres enfants et un enfant présente une malvoyance avec une vision à trois dixièmes. Au niveau de la scolarisation, la plupart suivent l'enseignement spécialisé de type 6 et certains sont en intégration dans l'enseignement ordinaire. Enfin, la plupart sont en train d'apprendre ou savent lire le Braille. Pour rappel, nous avons réalisé une analyse statistique afin de nous assurer que l'âge moyen dans les différents groupes était similaire.

D'après les résultats de l'ANCOVA, il n'y a pas de différence significative entre les groupes en termes d'âge, $F(2,42) = 0.023$, $p > 0.9$, $\eta^2_p = 0.001$.

Pour tous les groupes, les expériences ont eu lieu sous l'accord parental écrit et sous l'accord verbal ou écrit des enfants. Toutes les procédures ont été approuvées par le Comité d'Ethique Hospitalo-Facultaire des Cliniques Universitaires Saint-Luc – UCLouvain.

2. Tâches

2.1. *Tâche évaluant l'intelligence verbale*

La tâche de similitude de la batterie WISC-V a été administrée afin d'évaluer l'intelligence verbale (voir annexe II). Cette tâche a été présentée individuellement aux enfants en présence de l'expérimentateur dans une pièce calme. Dans cet exercice, deux mots sont présentés oralement à l'enfant et celui-ci doit expliquer en quoi ils se ressemblent, en quoi ils sont pareils. Un item d'exemple est prévu afin de s'assurer de la bonne compréhension de la tâche par l'enfant. Après trois notes zéro consécutives, la tâche est arrêtée. La durée de cette première partie est d'environ dix minutes. Les scores bruts obtenus par les enfants étaient transformés en note standard afin d'obtenir le niveau de l'enfant en comparaison à la norme des enfants du même âge. Cette tâche va ainsi permettre d'apparier les enfants selon leur niveau intellectuel verbal. Une ANOVA réalisée sur ces scores a pu démontrer qu'il n'y avait pas de différence significative entre les groupes au niveau du QI verbal, $F(2,42) = 0.726$, $p > 0.4$, $\eta^2_p = 0.035$.

2.2. *Tâche évaluant la compréhension des concepts géométriques de base*

Afin d'évaluer la compréhension des concepts géométriques de base, la tâche de Dehaene et al. (2006) a été adaptée pour qu'elle puisse être réalisée en modalité tactile. Cette tâche consistait en la présentation de planches composées de quatre items (formes imprimées au moyen d'une imprimante 3D), dont un violant le concept géométrique cible. L'enfant devait déterminer la forme qui lui semblait différente des autres. Les items étaient composés de plastique PLA d'une épaisseur de 5mm. Quatre concepts géométriques étaient testés : la géométrie euclidienne, les figures géométriques, les propriétés métriques et les figures symétriques. Ces concepts ont été choisis en tenant

compte du taux de réussite obtenu par Dehaene et al. (2006). Ayant un taux de réussite trop faible dans l'étude de Dehaene et al. (2006), les figures chirales (56%) et les transformations géométriques (35%) n'ont pas été évaluées. La topologie (taux de réussite de 76%) a également été retirée dans un souci de faisabilité en impression 3D. En outre, la tâche contenait un entraînement initial pour que l'enfant puisse comprendre ce qui lui était demandé.

L'expérience se déroulait de la manière suivante : face à l'enfant, l'expérimentateur positionnait une planche en bois de 21,5 cm sur 28 cm. Sur cette planche en bois, une vitre en Plexiglas avec 4 fenêtres était posée afin de délimiter l'emplacement des quatre formes. L'enfant pouvait alors explorer la planche et se représenter la situation. Une fois que cela était fait, l'expérimentateur glissait entre la planche et la vitre en plexiglass une feuille cartonnée A4 sur laquelle les pièces en 3D étaient collées. L'enfant devait, en explorant les quatre cases délimitées, trouver l'item-intrus (voir figure 2). Au total, il y avait 22 feuilles réparties en cinq catégories (voir figure 5). La première catégorie, l'entraînement initial, contenait deux feuilles : l'orientation et l'épaisseur. L'enfant recevait un feedback sur la bonne réponse attendue et ses réponses n'étaient pas prises en compte dans le calcul du score total. Aucun feedback n'était donné pour les catégories suivantes. La deuxième catégorie, la géométrie euclidienne, contenait six items : la ligne droite, la courbe, l'alignement de points en ligne, les lignes parallèles, les lignes sécantes, l'angle droit. Ensuite, les formes géométriques étaient composées de huit stimuli : le quadrilatère, le trapèze, le parallélogramme, le rectangle, le carré, le triangle équilatéral, le triangle rectangle et le cercle. La quatrième catégorie, les propriétés métriques, reprenait trois items : la distance, le centre d'un cercle et la proportion fixe. Enfin, la dernière catégorie était composée de trois feuilles évaluant les figures symétriques : l'axe vertical, l'axe horizontal et l'axe oblique.

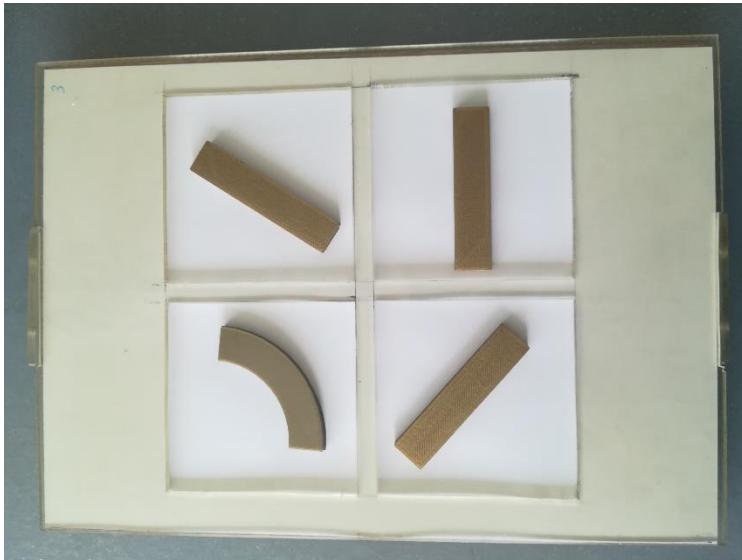


Figure 2 - Exemple du matériel utilisé

3. Procédure

Les enfants étaient vus soit à domicile soit à l'école, dans une pièce calme et en l'absence d'autre personne, chaque participant étant testé individuellement. La séance durait approximativement 45 minutes. Une pause était proposée en milieu de séance, mais il était également expliqué à l'enfant qu'il pouvait demander une pause à tout moment.

Dans le groupe des enfants aveugles, un seul enfant a dû réaliser la tâche les yeux bandés, car il ne présentait pas une cécité complète (i.e. vision à trois dixièmes). Afin d'obtenir des informations sur la vitesse de résolution de la tâche, le temps mis par l'enfant pour trouver l'intrus était chronométré. Le temps total pour réaliser la tâche était ensuite calculé. Le chronomètre était enclenché dès que l'enfant posait ses mains sur la planche et arrêté, une fois qu'il donnait une réponse. En revanche, il n'a pas été mesuré pour les deux items d'entraînement. Tous les temps de réaction étaient calculés de la même manière que dans le groupe des enfants aveugles.

Le groupe des enfants voyants était divisé en deux sous-groupes. Dans le groupe tactile, les enfants portaient un bandeau sur les yeux et devaient réaliser la tâche en explorant les formes avec leurs mains. Dans le groupe visuel, les enfants ne portaient pas de bandeau et devaient trouver l'intrus en regardant les différentes formes. Afin de chronométrer correctement le temps que l'enfant mettait pour donner une réponse, les enfants devaient fermer les yeux entre les changements de planches et les ouvrir une fois qu'ils recevaient un signal.

Résultats

Toutes les données récoltées ont été analysées au moyen du logiciel SPSS version 26.0 (IBM SPSS Statistics 26).

Nous avons tout d'abord réalisé une ANCOVA sur le nombre de réponses correctes (sur 20), avec le groupe (voyants visuel, voyants tactile, aveugles) comme facteur inter-sujet et les variables : âge, sexe et QI verbal comme covariables. Les résultats de cette analyse montrent qu'il y a une différence significative entre les groupes, $F(2, 42) = 9.71, p < 0.01, \eta^2_p = 0.344$. Les tests-t a posteriori (Bonferroni) nous informent que les enfants aveugles ($M \pm SE = 11.54 \pm 1$) ont de moins bonnes performances que les enfants voyants réalisant la tâche en modalité visuelle ($M \pm SE = 16.21 \pm 1.3$), $p < 0.05$. Il en est de même pour les enfants voyants ayant les yeux bandés durant la passation de la tâche ($M \pm SE = 12 \pm 0.9$) en comparaison aux enfants voyants ayant les yeux ouverts ($M \pm SE = 16.21 \pm 1.3$), $p < 0.05$. Enfin, il n'y a pas de différence significative entre les enfants aveugles et les enfants voyants en modalité tactile, $p > 0.9$. Les enfants voyants visuels ont donc de meilleures performances que les enfants voyants tactiles et les enfants aveugles (voir figure 3A).

Ensuite, bien que ces analyses montrent un effet du groupe et par conséquent, du statut visuel de l'enfant au niveau des scores de précision, nous n'avons pas tenu compte de l'âge, du sexe et du QI verbal des enfants. Or, nous pouvons présumer que ceux-ci influencent les résultats obtenus au niveau du score de précision dans les différents groupes. Les résultats indiquent un effet significatif de l'âge, $F(1, 42) = 32.8, p < 0.01, \eta^2_p = 0.47$ (voir figure 4). Et, une fois l'effet de l'âge contrôlé, il reste toujours un effet significatif du groupe, $F(2, 42) = 9.7, p > 0.01, \eta^2_p = 0.34$. Donc, l'appartenance à l'un des groupes a un effet significatif sur les scores de précision, et ce, même en contrôlant l'âge des sujets. Par contre, il n'y a pas d'effet significatif du QI verbal [$F(1, 42) = 1.77, p > 0.05, \eta^2_p = 0.05$] ni du sexe [$F(1, 42) = 0.49, p > 0.05, \eta^2_p = 0.01$] sur les scores de précision.

Les temps de réaction des enfants ont ensuite été normalisés en leur appliquant une transformation logarithmique. Une ANCOVA a été réalisée sur ces données, avec le groupe (voyants visuel, voyants tactile, aveugles) comme facteur inter-sujet et les variables âge, sexe et QI verbal comme covariables. Les résultats de cette analyse indiquent une différence statistiquement significative entre les groupes au niveau de la

durée de complétion de la tâche, $F(2, 42) = 70.08, p < 0.01, \eta^2_p = 0.8$. Tout comme pour les scores de précision, nous avons ensuite réalisé des tests-t a posteriori (Bonferroni). Ils nous informent que les enfants aveugles ($M \pm SE = 505.88\text{sec} \pm 65.5$) ont des durées de complétion plus longues que les enfants voyants avec les yeux ouverts ($M \pm SE = 79.55\text{sec} \pm 15$), $p < 0.01$. Les enfants voyants tactiles ($M \pm SE = 387.68 \pm 41.4$) sont également plus lents que les enfants voyants visuels ($M \pm SE = 79.55 \pm 15$), $p < 0.01$. En revanche, il n'y a pas de différence statistiquement significative entre les enfants voyants ayant les yeux bandés et les enfants aveugles, $p > 0.3$. Donc, les enfants voyants visuels sont plus rapides que les deux autres groupes qui ne diffèrent pas entre eux (voir figure 3B).

Enfin, bien que les résultats indiquent un effet du groupe sur les temps de réaction, ils ne tiennent pas compte de l'âge, du sexe et du QI verbal. Or, il est probable qu'ils influencent les temps observés dans les différents groupes. Les résultats de l'ANCOVA indiquent que l'âge n'a pas d'effet statistiquement significatif, $F(1, 42) = 3.36, p > 0.05, \eta^2_p = 0.085$. En outre, il en est de même pour la variable QI verbal [$F(1, 42) = 0.118, p > 0.05, \eta^2_p = 0.003$] et pour la variable sexe [$F(1, 42) = 0.88, p > 0.05, \eta^2_p = 0.02$] : il n'y a pas d'effet statistiquement significatif sur la durée de complétion de la tâche. En résumé, il n'y a donc pas d'influence du QI verbal, de l'âge et du sexe sur la durée de complétion de l'épreuve.

Lors de la récolte des données, en comparaison au nombre d'enfants non-voyants, quatre enfants voyants (trois en modalité tactile et un en modalité visuelle) supplémentaires ont été testés. Ils ne sont donc appariés à aucun enfant aveugle. Les résultats obtenus précédemment restent inchangés lorsque nous enlevons les données de ces 4 enfants. Il en est de même lorsque nous supprimons les résultats de l'enfant aveugle qui n'est pas allé jusqu'au bout de la tâche en raison de la difficulté de celle-ci. Par conséquent, nous avons décidé de garder ces enfants dans nos analyses afin d'avoir un échantillon d'enfants plus important et d'augmenter la puissance de nos données. Ces résultats suggèrent que la vision a une influence sur la réalisation de la tâche de géométrie.

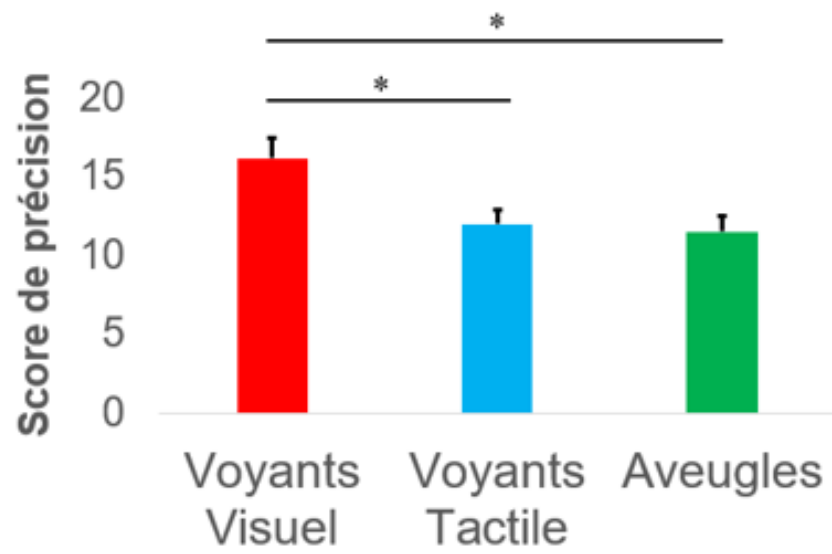
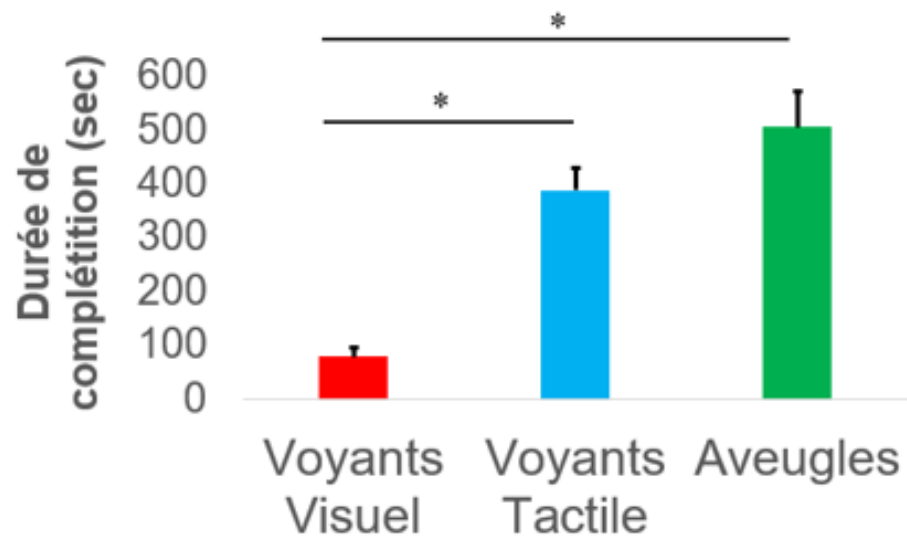
A**B**

Figure 3 A. Score de précision sur 20 des différents groupes (voyants en modalité visuelle en rouge ; voyants en modalité tactile en bleu ; aveugles en vert) à la tâche de géométrie. B. Durée de complétion en secondes des différents groupes à la tâche de géométrie. Les barres représentent les erreurs standards.

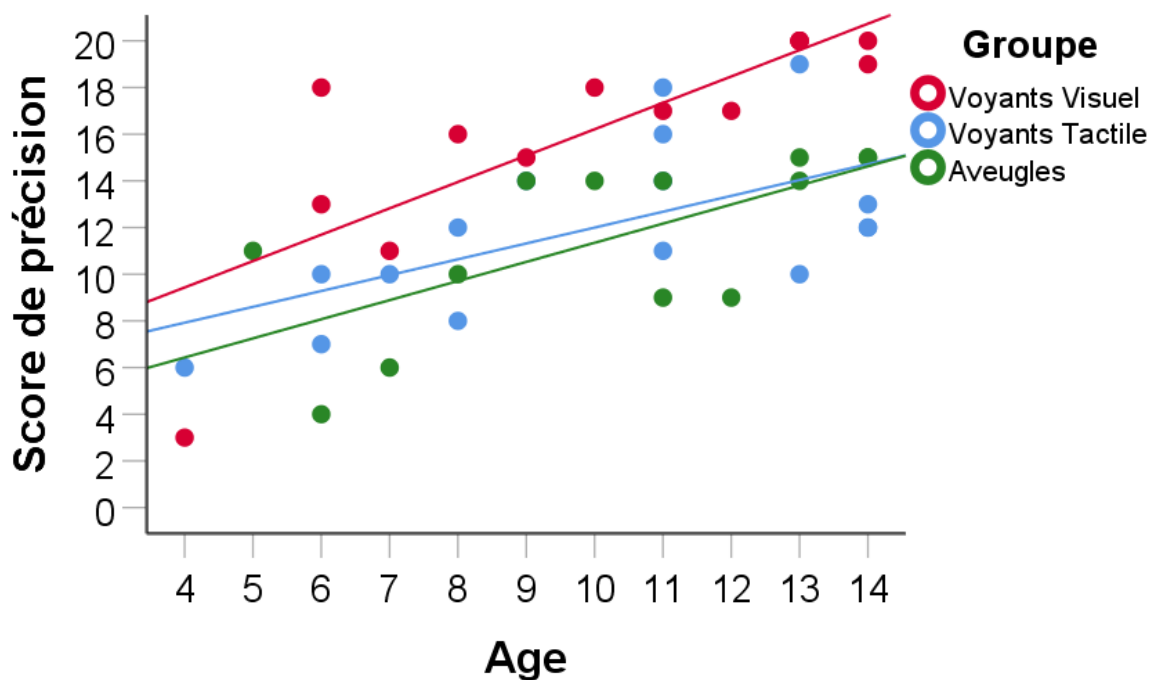


Figure 4 - Score de précision sur 20 à la tâche de géométrie en fonction de l'âge pour les différents groupes (voyants en modalité visuelle en rouge ; voyants en modalité tactile en bleu ; aveugles en vert).

Nous allons maintenant présenter les différents taux de réussite et temps de réponse moyens pour chaque groupe et chaque item utilisés dans l'épreuve de géométrie (voir figure 5). Tout d'abord, la géométrie euclidienne est une catégorie bien réussie par les différents groupes avec un taux de réussite moyen dépassant les 65%. Néanmoins, nous pouvons voir que les items droites sécantes et angle droit sont deux items qui ne sont majoritairement pas réussis par les enfants aveugles (taux inférieurs à 50%). Mais, les temps de réponse moyens ne reflètent pas la difficulté éprouvée par les enfants aveugles. En effet, ils ne sont pas plus lents pour ces items. Cela confirme également les résultats de l'analyse statistique puisque les enfants voyants visuels ont un taux de réussite moyen plus élevé que les deux autres groupes et ils sont également plus rapides.

Les figures géométriques sont également bien réussies par les trois groupes. Toutefois, nous pouvons souligner le fait que le parallélogramme est difficilement réussi par les enfants voyants tactiles et par les enfants aveugles, tout comme le trapèze pour les enfants voyants tactiles. Les taux de réussite sont inférieurs à 50%. Cela est également visible au niveau des temps de réaction, ils sont plus longs pour ces deux concepts.

Nous remarquons que les propriétés métriques représentent une catégorie très difficilement réussie par les groupes des voyants tactiles et des aveugles, les taux de

réussite sont inférieurs à 50%. Seul l'item « centre du cercle » a un taux de réussite supérieur à 50%. Bien que leurs pourcentages de réussite soient faibles, nous ne constatons pas des temps de réponse beaucoup plus longs en comparaison aux autres catégories mieux réussies.

Pour la dernière catégorie, les figures symétriques, tout comme la catégorie précédente, les taux de réussite moyens chez les enfants voyants tactiles et chez les aveugles sont inférieurs à 50%. Il semblerait que l'axe de symétrie horizontal soit l'axe de symétrie le plus facilement perçu chez tous les participants, suivi de l'axe oblique et enfin, de l'axe vertical. En outre, les temps pour ces concepts sont plus longs, en comparaison aux autres concepts, chez les enfants voyants en modalité tactile et les enfants aveugles.

Enfin, les taux de réussite moyens des différentes catégories pour les trois groupes sont à chaque fois supérieurs à 25% (le niveau de chance). En outre, la géométrie euclidienne et les figures géométriques représentent les deux catégories les mieux réussies par les différents groupes. Pour ce qui est de la catégorie la moins bien réussie, elle varie en fonction des groupes. Chez les voyants visuels, il s'agit des propriétés métriques. Pour les voyants tactiles, deux catégories sont aussi difficilement réussies l'une que l'autre : les propriétés métriques et les figures symétriques. Enfin, pour les aveugles, il s'agit de la catégorie des figures symétriques. Nous avons également constaté que, pour toutes les catégories, les temps de réponse des enfants aveugles et voyants tactiles sont beaucoup plus longs : minimum trois fois le temps mis par les enfants voyants visuels.

Au vu des différences parfois présentes entre les enfants voyants ayant les yeux bandés et les enfants aveugles à certains items, nous avons décidé de réaliser des tests Chi-carrés pour chaque item. Ces analyses statistiques nous permettent de comparer la proportion de bonnes réponses dans les deux groupes et ainsi, de savoir où se situent les difficultés des enfants aveugles. Les résultats de ces analyses indiquent des distributions significativement différentes pour deux items. Les enfants aveugles sont moins bons que les enfants ayant les yeux bandés pour les items : angle droit [$\chi^2 = 10.51, p < 0.01$] et triangle équilatéral [$\chi^2 = 13.46, p < 0.01$]. En revanche, il n'y a pas de différence significative entre les enfants en modalité tactile et les enfants aveugles pour les autres items.

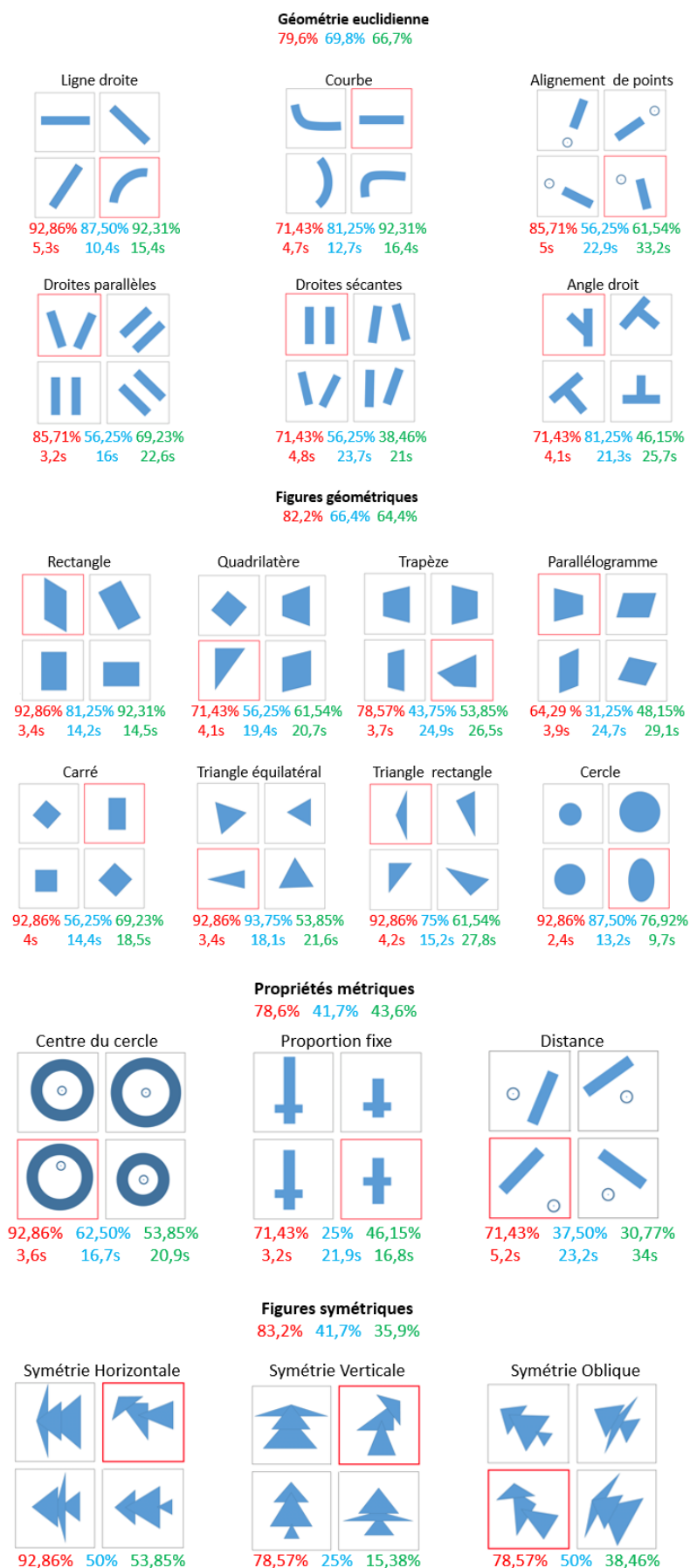


Figure 5 - Pourcentages de réussite et temps de réponse moyens (en secondes) aux différents items des différents groupes (voyants en modalité visuelle en rouge ; voyants en modalité tactile en bleu ; aveugles en vert).

Discussion

L'objectif de cette étude était de comparer les connaissances géométriques d'enfants voyants et non-voyants afin d'évaluer l'influence de l'expérience visuelle sur le développement de la géométrie de base. Pour cela, nous avons développé un test à choix multiple en modalité tactile et visuelle qui a été administré à 30 enfants voyants et 13 enfants non-voyants en Belgique et en France. Les enfants ont été appariés en âge, sexe et QI verbal. Dans cette partie, nous commencerons par un résumé des données obtenues que nous confronterons avec nos hypothèses initialement formulées. Ensuite, nous mettrons en relation ces résultats avec les éléments théoriques existants. Après cela, nous aborderons les limites et les apports de cette étude. Enfin, nous terminerons par la présentation des perspectives futures.

1. Résumé des résultats obtenus

Concrètement, pour réaliser la tâche, les enfants ont dû répondre à la question « laquelle de ces formes est différente des autres ? ». Nous avons ensuite analysé leurs réponses en termes de précision (nombre de réponses correctes sur 20) et temps de réaction (durée totale de complétion de la tâche en secondes) afin d'infirmer ou de confirmer nos hypothèses et prédictions définies précédemment.

Au niveau de la précision des réponses, les données indiquent une supériorité des enfants voyants visuels. En revanche, aucune différence significative n'est observée entre les enfants voyants avec les yeux bandés et les enfants aveugles. Les voyants en modalité visuelle sont donc plus précis. Ces résultats permettent donc de confirmer notre première hypothèse : influence négative de la cécité sur le développement des connaissances géométriques de base, et la prédiction liée à de meilleurs résultats en précision chez les enfants voyants. En effet, nous supposons que la cécité empêche une bonne compréhension et représentation des différents concepts géométriques en raison des traitements visuels impliqués dans la géométrie. Grâce à ces résultats, nous pouvons également répondre à notre première sous-question qui était : « **existe-t-il une différence de performances entre les enfants voyants et les enfants aveugles ?** ». Cette différence est bien présente et suggère une influence positive de la vision sur le développement de la géométrie élémentaire. De plus, le fait que les enfants voyants tactiles et voyants visuels

présentent des scores différents permet de répondre à notre deuxième sous-question : « **existe-t-il une différence de compréhension des concepts géométriques entre les enfants voyants et les enfants voyants ayant les yeux bandés ?** ». Les résultats suggèrent donc que la vision est nécessaire au moment de la réalisation de l'épreuve, une expérience visuelle antérieure ne suffit pas pour atteindre un bon niveau de compréhension.

Ensuite, nous avons pu observer un effet statistiquement significatif de l'âge sur les scores de précision dans les trois groupes (figure 4). De fait, les scores augmentent avec l'âge des enfants. En outre, nous remarquons un accroissement avec l'âge de l'écart des scores de précision entre le groupe des enfants voyants visuels et les deux autres groupes. Nous pouvons ainsi répondre à notre troisième sous-question : « **est-ce que l'âge influence les performances de réussite ?** » et valider notre quatrième hypothèse en disant qu'il y a un effet de l'âge sur le développement des connaissances géométriques. De plus, le fait que les enfants voyants en modalité visuelle améliorent davantage leurs scores avec l'âge en comparaison aux deux groupes semble souligner l'importance de la vision en géométrie. En effet, la seule différence entre les deux groupes d'enfants voyants (visuels et tactiles) est le statut visuel puisqu'ils ont bénéficié des mêmes enseignements de la géométrie étant donné qu'ils proviennent des mêmes écoles. Par conséquent, nous pouvons penser que la vision a de plus en plus d'importance dans le développement, la complexification des compétences géométriques.

Après, au niveau de la vitesse d'exécution de la tâche, nous obtenons comme résultats, suite à l'analyse statistique, que les enfants voyants avec les yeux ouverts sont plus rapides que les enfants des deux autres groupes. Il n'y a, en revanche, pas de différence significative entre les voyants tactiles et les aveugles. Ces résultats vont donc dans le même sens que les données concernant les scores de précision. De plus, cela confirme également notre prédiction selon laquelle les enfants aveugles seront moins rapides que les enfants voyants en raison du caractère séquentiel de la modalité haptique. Contrairement à la vision, l'appréhension immédiate et simultanée n'est pas possible. Davantage de temps est donc nécessaire pour appréhender l'ensemble des éléments en modalité tactile en comparaison à la modalité visuelle.

Pour ce qui est des différentes catégories d'items, pour les trois groupes, les propriétés métriques et les figures symétriques sont les catégories les plus difficilement réussies. Par contre, uniquement chez les enfants voyants en modalité tactile et les

aveugles, les pourcentages de réussite moyens chutent fortement, en comparaison aux deux autres catégories. Par conséquent, nous pouvons penser qu'il s'agit de deux catégories plus complexes et nécessitant davantage la vision. En revanche, la géométrie euclidienne et les figures géométriques sont deux catégories où les pourcentages de réussite moyens des enfants voyants tactiles et des aveugles sont assez proches de ceux des enfants voyants visuels. Donc, il semblerait qu'il s'agisse des deux catégories nécessitant moins la vision, plus simples.

Enfin, nous l'avons vu ; il existe une différence significative entre les enfants voyants en modalité tactile et les enfants aveugles pour deux items : angle droit et triangle équilatéral. Les enfants aveugles présentent des scores inférieurs. Il semblerait donc que l'expérience visuelle antérieure soit une aide pour ces deux items uniquement. Nous pouvons aussi présumer que la maîtrise des angles est compliquée pour eux. Mais, l'item triangle rectangle et l'item rectangle ne sont pas moins bien réussis en comparaison aux enfants ayant les yeux bandés. Pourtant, le critère permettant d'identifier l'intrus repose également sur les angles droits. Les intrus étant respectivement un triangle obtus et un parallélogramme. Une hypothèse permettant d'expliquer la différence des résultats entre l'item triangle équilatéral et les deux autres items (triangle rectangle et rectangle) est la suivante : pour identifier le triangle isocèle parmi les triangles équilatéraux, les enfants aveugles ont utilisé la longueur des côtés et non pas les angles comme critère, et ce, de manière incorrecte. Ensuite, pourquoi réussissent-ils moins bien l'item angle droit en comparaison aux enfants ayant les yeux bandés mais pas l'item triangle rectangle et l'item rectangle ? Nous pouvons penser que la maîtrise des angles de manière isolée est quelque chose de compliqué pour les enfants aveugles. Il est peut-être plus facile pour les enfants aveugles de solliciter les angles lorsqu'ils sont présentés sous une forme géométrique classique.

En résumé, les différents résultats obtenus vont dans le sens de la première hypothèse qui était, pour rappel, que l'absence de vision va impacter négativement le développement des connaissances géométriques de base chez l'enfant aveugle. Les prédictions que nous avons faites semblent également se vérifier étant donné qu'ils présentent des scores de précision et des temps de réaction moins bons que les voyants en modalité visuelle. De plus, au vu des résultats obtenus par les enfants voyants tactiles, il semblerait que cela soit l'absence de vision au moment de la passation de la tâche qui impacte les résultats. L'expérience visuelle antérieure n'aide pas à la réussite de

l'épreuve, la vision est nécessaire pour comprendre les différents concepts géométriques. Nous confirmons ainsi notre troisième hypothèse, la vision est nécessaire dans le développement et l'accès aux concepts géométriques de base. Enfin, nous avons également pu valider notre dernière hypothèse ; il y a bien une amélioration des scores de précision avec l'âge.

2. Mise en lien des données récoltées avec la recherche actuelle

2.1. *Lien avec l'expérience de Dehaene et al. (2006)*

Pour rappel, les résultats de l'étude de Dehaene et al. (2006) suggéraient l'existence de connaissances géométriques de base innées, se développant en l'absence de toute éducation, expérience avec des cartes ou appareils de mesure, de toute utilisation d'un langage géométrique précis. Cette conclusion semble être nuancée par les résultats de notre étude. En effet, il semblerait que la vision ait une influence non négligeable sur le développement de ces connaissances. Elles semblent malgré tout dépendantes de l'expérience visuelle bien que le développement soit inné, présent dès le plus jeune âge. Cette étude de Dehaene et al. (2006) met également en évidence que la géométrie euclidienne est le concept le mieux réussi par les participants (enfants et adultes américains et indigènes d'Amazonie) suivie par les figures géométriques, les figures symétriques et enfin les propriétés métriques. Cette hiérarchie se retrouve également chez les enfants voyants visuels testés dans notre étude, si ce n'est une inversion entre les deux premières catégories. En effet, ils réussissent à un niveau plus élevé les figures géométriques, s'ensuit la géométrie euclidienne. Le classement obtenu par Dehaene et al. (2006) se retrouve aussi chez les voyants tactiles et chez les aveugles avec, en revanche, une inversion des deux dernières catégories. Donc, de manière générale, la géométrie euclidienne et les figures géométriques sont des domaines de la géométrie plus facilement réussis, que ce soit dans notre étude ou dans celle de Dehaene et al. (2006).

2.2. *Lien avec l'étude d'Izard & Spelke (2009)*

Nous l'avons vu, dans cette étude, qui se base également sur la tâche utilisée par Dehaene et al. (2006), les performances des enfants voyants s'améliorent avec l'âge pour atteindre un pic asymptotique à l'âge de 12 ans. Les performances sont alors similaires à celles des adultes. Cette amélioration des performances avec l'âge se retrouve également

dans nos analyses, néanmoins nous n'avons pas retrouvé de pic à l'âge de 12 ans. Il se peut que cela soit dû au fait que notre échantillon soit assez restreint. Par contre, il semblerait que l'amélioration des performances ne soit pas liée à l'enseignement formel de la géométrie comme nous le pensions en formulant nos hypothèses initiales. En effet, selon Izard et Spelke (2009), cela est dû à l'instruction informelle, à des changements cognitifs généraux apparaissant avec l'âge et se caractérisant, entre autres, par de meilleures capacités de résolution de problèmes puisque cette amélioration apparaît avant le début de l'enseignement de la géométrie formelle, des axiomes, en secondaire. Néanmoins, les auteurs admettent que certains aspects de l'éducation ou des expériences propres à une culture peuvent avoir une influence sur ce développement, car l'amélioration des performances avec l'âge ne se retrouve pas chez les Mundurucu (Dehaene et al., 2006). Dans cette population non-instruite, les adultes et les enfants présentent un niveau de performance identique. Nos données semblent également aller dans ce sens. Bien que les scores de précision augmentent avec l'âge et paraissent, en partie, liés à l'enseignement de la géométrie durant le cursus primaire, l'écart entre les enfants voyants en modalité visuelle et les deux autres groupes se creuse. Par conséquent, l'augmentation plus importante de la précision chez les enfants avec les yeux ouverts ne semble pas liée à l'enseignement des connaissances. De fait, elle ne se retrouve pas chez les voyants en modalité tactile alors qu'ils ont suivi les mêmes apprentissages que ceux en modalité visuelle. Les enfants voyants sont issus de même classe. Une explication possible serait la suivante : l'absence de vision a de plus en plus d'impact avec l'âge, avec la complexification des connaissances géométriques. La vision est donc nécessaire pour solliciter ces connaissances. Enfin, les enfants aveugles ne semblent pas rattraper le retard à propos des connaissances géométriques avec l'âge. L'enseignement de cette matière durant le cursus primaire ne les aide pas à appréhender ces concepts géométriques et à atteindre un niveau similaire aux enfants voyants. Une fois encore, la vision semble importante dans la construction des concepts géométriques.

En outre, cette étude confirme la conclusion de l'étude de Dehaene et al. (2006) selon laquelle le développement de la géométrie de base est inné et non dépendant de l'instruction. Tout comme pour l'étude précédente, notre étude semble apporter des nuances à cette conclusion. Bien que le développement de la géométrie soit inné, celui-ci semble en partie dépendant de la vision. En effet, nous remarquons que les enfants aveugles parviennent à détecter la propriété géométrique invariante de différentes formes

tactiles présentées et à déduire la forme qui viole cette propriété, mais dans une moindre mesure en comparaison aux enfants voyants visuels.

2.3. Lien avec les autres domaines de la cognition numérique investigués chez l'aveugle

Au cours de notre revue de la littérature, nous avons pu découvrir que, concernant les autres domaines numériques, les enfants aveugles ne sont pas moins bons que les enfants voyants. En effet, pour ce qui est du comptage, bien qu'ils utilisent moins leurs doigts et recourent davantage à la mémoire de travail auditive, ils ne sont pas moins bons que les enfants tout-venant (Crollen et al., 2011). Au niveau des opérations arithmétiques, il semblerait même que les enfants aveugles soient supérieurs aux enfants voyants en termes de performance (Crollen et al., in press). En ce qui concerne la relation entre les nombres et l'espace, elle est également préservée chez les personnes non-voyantes. La ligne numérique mentale possède les mêmes caractéristiques : effet de taille et de distance (Szucs & Csépe, 2005 ; Castronovo & Seron, 2007a, 2007b), effet de « pseudo-négligence » (Cattaneo et al., 2011). Néanmoins, une différence qualitative est retrouvée au niveau de l'effet SNARC suggérant un cadre de référence égocentrique, lié au corps chez les personnes aveugles (Crollen et al., 2013) alors que celui-ci est allocentrique, extracorporel chez la personne voyante. Enfin, les processus de quantification préverbaux, analogiques (le subitizing et le système numérique approximatif) sont également présents chez l'adulte aveugle. Il n'y a pas de différence au niveau du subitizing, que ce soit en modalité auditive (Camos & Tilma, 2008 as cited in Ferrand et al., 2010) ou en modalité haptique (Ferrand et al., 2010). Au niveau de l'ANS, les capacités d'estimation de l'adulte aveugle sont équivalentes (Ferrand et al., 2010 ; Rinaldi, 2018) ou supérieures (Castronovo & Serron, 2007 ; Castronovo & Delvenne, 2013) en fonction des études. En résumé, tous ces résultats indiquent un développement de la cognition numérique préservé malgré la cécité. Concernant nos résultats, indiquant une infériorité des enfants aveugles en géométrie en comparaison aux enfants voyants, ils ne vont donc pas dans le même sens que les résultats obtenus dans les autres domaines numériques déjà étudiés chez l'aveugle.

Par conséquent, il semblerait que la géométrie soit l'un des seuls domaines numériques impactés par l'absence de vision. Toutefois, cette conclusion n'est pas si surprenante puisqu'il s'agit d'un domaine fortement influencé par le traitement visuel. En

effet, selon les stades de développement de la géométrie de Van Hiel (1959 as cited in Marchand, 2009 ; Braconne-Michoux, 2014), lors de la première étape du développement des connaissances géométriques, le stade de la *Visualisation*, l'enfant utilise les aspects visuels et non les propriétés géométriques pour identifier et reconnaître une figure ou un solide. En outre, selon l'étude de Pinet et Gentaz (2007), il est plus facile pour les enfants de 5 ans de reconnaître des figures prototypiques que des figures géométriques non-prototypiques. Or, la distinction entre une figure prototypique ou non-prototypique se fait sur base de caractéristiques perceptuelles visuelles. Ensuite, une autre recherche (Satlow & Newcobe, 1998), s'intéressant au développement des connaissances sur les formes géométriques, indique que, dans une tâche de jugement de tri de formes géométriques, les enfants plus jeunes se basent davantage sur la similarité, les caractéristiques perceptuelles, visuelles alors que les plus vieux se baseront davantage sur les définitions. Par conséquent, ces deux études indiquent une influence des traitements visuels, de la vision dans le développement initial de la géométrie. Et, ces observations sont en accord avec les résultats obtenus dans notre étude. L'absence de vision rend les performances des enfants aveugles et des enfants voyants tactiles inférieures aux résultats des enfants voyants visuels.

2.4. Lien avec le développement des connaissances spatiales

Nous l'avons vu, la géométrie ne se limite pas aux connaissances géométriques, elle inclut également les connaissances spatiales. Bien que ces connaissances aient été relativement peu étudiées chez l'enfant aveugle et l'aveugle de manière générale, certaines études vont pouvoir nous aider à mieux comprendre les résultats obtenus dans notre expérience.

Un des moyens de compensation pour construire une représentation géométrique spatiale en l'absence de la vision est l'audition. Ainsi, une étude (Gori et al., 2017) s'est penchée sur l'utilisation d'indices auditifs dans la reconnaissance d'une forme géométrique (cercle, carré et triangle) pour ensuite, la reproduire en marchant dans la pénombre. Les résultats montrent que les aveugles précoces éprouvent beaucoup de difficultés à reconnaître ces formes par rapport aux voyants et aux aveugles tardifs. De plus, ils montrent un décalage entre la reconnaissance et la reproduction de la forme, ce qui n'est pas le cas pour les deux autres groupes. Seuls les aveugles précoces montrent une incapacité à reproduire la forme désirée et une tendance à compresser la forme

reproduite. Il semble donc que la cécité précoce empêche l'interprétation de signaux géométriques auditifs lors de la navigation et le développement de représentations spatiales auditives. Selon les chercheurs (Gori et al., 2017), ces difficultés pourraient être expliquées par un manque de représentation de la géométrie euclidienne et par l'utilisation d'un cadre de référence égocentrique, lié au corps. Nous pouvons donc supposer que la vision est nécessaire au développement précoce des connaissances géométriques de base. De plus, contrairement à notre étude, l'expérience visuelle antérieure semble être une aide à l'identification des formes géométriques au moyen de l'audition puisque les personnes voyantes ou aveugles tardives ont de meilleurs résultats. Toutefois, la comparaison est difficile à faire puisque, dans l'étude de Gori et al. (2017), les participants sont des adultes. Ainsi, il est très probable que leurs représentations mentales géométriques soient plus développées que chez l'enfant et, qu'en l'absence de vision, les adultes peuvent plus facilement y recourir pour réaliser la tâche demandée. Néanmoins, la vision semble nécessaire pour le développement précoce de ces représentations mentales ; elle est importante durant la période développementale puisque les aveugles précoces éprouvent des difficultés.

En outre, le développement des connaissances spatiales en cas de navigation a été investigué lors d'une étude de cas (Landau et al., 1981) avec une fillette de 2 ans et demi, aveugle depuis sa naissance. Cette étude nous permet d'apprendre qu'en explorant l'environnement, la petite fille est capable de tenir compte des propriétés métriques et euclidiennes pour se déplacer entre deux objets. Dans cette expérience, il lui est demandé de se déplacer à plusieurs reprises de l'objet A à l'objet B et de l'objet A à l'objet C. Elle doit ensuite, sans n'avoir jamais effectué le trajet précédemment, se déplacer de l'objet B vers l'objet C. Elle réussit avec succès la tâche, indiquant qu'elle a pu extraire les informations à propos de la longueur et de l'angle des trajets effectués précédemment pour en déduire le nouveau trajet à effectuer. Elle réussit également lorsque la position absolue des objets est modifiée tout en préservant la relation spatiale entre ceux-ci. Ces performances sont également similaires à celles d'enfants voyants ayant les yeux bandés. Par conséquent, la vision n'est pas nécessaire au développement précoce des connaissances sur les propriétés métriques et euclidiennes (Landau et al., 1981). Lorsque nous regardons nos résultats exclusivement dans ces deux domaines, nous observons une nette différence des taux de réussite entre les voyants (modalité visuelle) et les aveugles pour les propriétés métriques. Les taux de réussite des enfants aveugles étant inférieurs à 50%. Concernant la géométrie euclidienne, la différence entre les groupes n'est pas

grande. Il se peut donc que la vision soit nécessaire dans une moindre mesure au développement précoce des propriétés métriques dans le cadre de la navigation spatiale (Landau et al., 1981), mais qu'elle le soit davantage pour l'identification de formes en relief. Or, nous l'avons vu, il s'agit de deux systèmes de base différents en géométrie. Donc, il se peut que le développement des propriétés métriques soit différent en fonction du système géométrique. En revanche, le développement de la géométrie euclidienne semble moins dépendant de la vision, que ce soit pour la navigation ou l'identification de formes.

Deux études ont également montré la présence d'un déficit spatial en modalité haptique. Ainsi, les enfants aveugles ont des difficultés à effectuer des rotations mentales de lignes surélevées (Millar, 1976 as cited in Vercillo et al., 2016) et ils montrent également un manque de compréhension des relations tout-parties (Pupsitawati et al., 2014 as cited in Vercillo et al., 2016). Lorsqu'il est demandé à des enfants aveugles d'explorer une figure composée de petites formes en modalité tactile, ils ont majoritairement recours à des stratégies analytiques/locales plutôt que des stratégies holistiques/globales comme le font les enfants voyants. Par conséquent, ils échouent à reconnaître la figure.

Enfin, la vision semble avoir une influence sur le développement des représentations spatiales auditives. Ainsi, il est plus difficile pour les enfants aveugles, en comparaison aux enfants voyants, de réaliser une tâche de bisection auditive spatiale : trois sons sont émis successivement ; l'enfant doit alors localiser et préciser si le deuxième son est plus proche du premier ou du troisième son entendu (Vercillo et al., 2016). Il en est de même chez l'adulte aveugle (Gori et al., 2014). Ces difficultés semblent être liées à l'exigence de la tâche qui demande un recours à un cadre de référence allocentrique (Vercillo et al., 2016). Bien que les aveugles soient moins bons pour déterminer la relation spatiale entre des sources auditives multiples, ils sont aussi bons, voire meilleurs que les voyants, pour localiser des sources sonores uniques (Collignon et al., 2006 as cited in Cappagli & Gori, 2016 ; Gori et al., 2014). Toutefois, cela ne semble pas être le cas chez les enfants aveugles. En effet, ils sont moins performants que les enfants voyants pour localiser une source sonore (Cappagli & Gori, 2016). En conclusion, l'absence de vision impacte le développement des capacités de localisation spatiale auditive simple en le retardant (Cappagli & Gori, 2016 ; Vercillo et al., 2016). Il se pourrait donc que cela soit également le cas pour le développement des connaissances

géométriques ; elles pourraient être retardées en raison de la cécité. À l'âge adulte, les performances des voyants et des aveugles pourraient être identiques. Néanmoins, en regardant la trajectoire de l'évolution des performances avec l'âge dans notre étude, cela ne semble pas vraiment le cas. Pour s'en assurer, une étude avec des participants adultes aveugles est nécessaire.

En résumé, toutes ces expériences permettent de renforcer nos résultats et de conclure que le domaine de la géométrie est un domaine « numérique » fortement dépendant de la vision, à l'instar des connaissances spatiales et à contrario des autres domaines déjà étudiés (comptage, arithmétique, processus de quantification...). Une des explications les plus probables de cette dépendance est la composante visuo-spatiale majeure de la géométrie. En outre, il se pourrait également que le développement de ce domaine soit retardé dans l'enfance pour atteindre un niveau équivalent à l'âge adulte comme c'est le cas pour la localisation d'une source sonore dans l'espace.

3. Limites de l'étude

Bien que nous ayons essayé au maximum de rendre cette étude irréprochable d'un point de vue fiabilité et validité, elle comporte néanmoins quelques limites : méthodologiques et liées à la construction de la tâche sur les concepts géométriques.

3.1. *Limites méthodologiques*

Premièrement, notre échantillon étant assez réduit, nous n'avons aucune certitude que nos données sont puissantes. Il aurait donc été intéressant de trouver davantage de participants non-voyants afin d'augmenter la puissance et la fiabilité de notre étude. De plus, au sein des participants non-voyants, nous n'avons malheureusement pas pris en compte uniquement des enfants avec une cécité totale congénitale. En effet, un des enfants est malvoyant avec une vision à trois dixièmes et certains enfants avaient une perception de la lumière. En outre, nous n'avons pas non plus tenu compte du type d'enseignement fréquenté par les enfants aveugles. Or, cela a pu avoir une incidence sur les résultats obtenus. En effet, les méthodes utilisées pour enseigner la géométrie sont peut-être totalement différentes entre les deux types d'enseignement : ordinaire ou spécialisé. La géométrie est peut-être une matière moins enseignée ou plus tardivement dans les écoles spécialisées en comparaison aux écoles ordinaires.

Deuxièmement, nous avons voulu analyser l'évolution des performances avec l'âge de l'enfant dans les différents groupes mais les observations sont à prendre avec précautions. En effet, il ne s'agit pas d'une étude longitudinale mais d'une étude transversale. Nous ne pouvons pas être certains que les différences observées sont réellement dues à une amélioration des performances avec l'âge et non liées à des différences interindividuelles.

3.2. Limites liées à la construction de la tâche

Tout d'abord, une attention plus particulière aurait dû être portée aux textures utilisées. En effet, durant la passation, certains enfants confondaient les formes tactiles et le cadre en Plexiglas permettant de délimiter les cases. Ainsi, il était parfois nécessaire de préciser à l'enfant qu'il était en train d'explorer le cadre et non les images. Par conséquent, cela a pu avoir une incidence sur les temps de réaction enregistrés. En outre, nous n'avons pas pris en compte la difficulté potentielle de chaque item pour réaliser un test de difficulté croissante.

Ensuite, nous n'avons pas réalisé des analyses qualitatives lors de la passation de la tâche. En effet, il aurait peut-être été intéressant de noter la façon dont les enfants exploraient les items : avec une ou deux mains, avec quels doigts... Si une différence entre les enfants non-voyants et les enfants voyants tactile (yeux bandés) existait au niveau de la façon d'explorer les items, elle n'a pu être saisie et prise en compte. En outre, demander aux enfants d'expliquer pourquoi ils choisissent telle forme comme étant l'intrus aurait pu nous apporter des informations en plus sur leurs connaissances géométriques. En effet, il est possible qu'avec l'âge, l'enfant change sa façon de penser et se base sur d'autres critères pour faire son choix comme dans l'étude de Satlow & Newcobe (1998). Les enfants tout-venant passent de l'utilisation de la similarité, des caractéristiques perceptuelles aux définitions comme critère de sélection. Malheureusement, nous ne l'avons pas fait, nous ne pouvons donc pas savoir si c'est également le cas dans notre étude.

4. Apports de l'étude

Nous avons pu le remarquer en parcourant la littérature, il n'y a pas, à l'heure actuelle, d'étude s'intéressant au développement des connaissances géométriques de base chez l'enfant aveugle. Cette étude permet ainsi de comparer les performances d'enfants voyants et non-voyants âgés de 4 à 14 ans. En outre, en discutant avec Mme Edith Bocquillon, elle a pu confirmer qu'il s'agissait d'un domaine souvent difficilement maîtrisé par les enfants aveugles, que ce soit dans l'enseignement ordinaire en intégration ou dans l'enseignement spécialisé. Les parents d'un enfant aveugle ont également confié que la géométrie était une matière assez compliquée pour leur enfant. Par conséquent, cette étude constitue une première étape dans l'apport de connaissances théoriques à propos du développement des concepts géométriques de base chez l'enfant non-voyant et permettra peut-être l'arrivée d'autres recherches dans le domaine. De plus, ce premier pas dans le secteur de la géométrie pourrait à long terme aider au développement d'une méthode d'enseignement de la géométrie davantage adaptée aux enfants non-voyants. Enfin, savoir qu'il s'agit bel et bien d'un domaine dans lequel les enfants aveugles sont en difficulté pourra aider les professionnels à davantage le cibler durant la scolarité.

5. Nouvelles perspectives

Tout d'abord, puisqu'il s'agit de la seule étude se penchant sur la géométrie de base chez l'enfant aveugle, il est important de répliquer les résultats au travers d'autres recherches afin de confirmer ou d'infirmer les conclusions que nous avons tirées. Cela permettra ainsi d'augmenter la fiabilité de cette étude et de nos résultats. En effet, la littérature est remplie d'études ayant des résultats divergents à propos d'un même sujet de recherche ; répliquer les résultats est donc primordial.

Ensuite, afin d'enrichir les observations obtenues à travers cette étude, il serait intéressant de proposer la tâche à des adultes aveugles et voyants. Grâce à cela, nous pourrions en savoir davantage sur le développement des connaissances géométriques et découvrir si les aveugles ont tendance à rattraper leur retard par rapport aux voyants comme cela est le cas lors de la localisation d'une source sonore dans l'espace (Cappagli & Gori, 2016 ; Vercillo et al., 2016). Ou, au contraire, s'il s'agit d'un domaine numérique qui reste complexe en raison de la cécité, comme cela est le cas, par exemple, pour la bissection auditive spatiale (Vercillo et al., 2016 ; Gori et al., 2014). En outre, intégrer

des aveugles tardifs à l'étude permettra de savoir si la vision est réellement nécessaire pour réaliser l'épreuve ou si elle est uniquement nécessaire durant la période développementale pour construire une représentation mentale solide des concepts géométriques de base.

Pour terminer, nous avons pu voir que dans certains domaines numériques, et ce pour certaines tâches, les personnes aveugles recrutent aussi leur cortex occipital. Il a également été découvert que d'autres régions cérébrales, en plus de celles habituellement utilisées chez la personne voyante, sont activées uniquement chez les personnes aveugles lors de la réalisation de certaines activités numériques. Par conséquent, il pourrait être intéressant de mener une recherche sur les bases cérébrales lors d'activités portant sur la géométrie pour pouvoir répondre à des questions telles que : Les aires cérébrales sollicitées par les aveugles sont-elles identiques aux personnes voyantes ? Le cortex occipital est-il recruté en géométrie ? Les résultats obtenus pourront ainsi nous aider à mieux comprendre les observations faites dans cette étude.

Conclusion

Cette étude a été menée afin d'en apprendre davantage sur le développement des connaissances géométriques de base chez l'enfant aveugle de 4 à 14 ans et de répondre à la question suivante : « Le développement de la compréhension des concepts géométriques de base (parallélisme, figures, symétrie, congruence...) est-il influencé par l'expérience visuelle ? ». Grâce à la comparaison des performances dans une tâche à choix multiple de trois populations d'enfants (voyants avec les yeux ouverts, voyants avec les yeux bandés et non-voyants), nous avons pu confirmer plusieurs de nos hypothèses. D'abord, le développement des concepts géométriques est dépendant de la vision. De plus, l'accès à la vision lors de la réalisation de la tâche semble nécessaire pour présenter de bonnes performances. En outre, l'âge de l'enfant ayant une influence sur ses performances en géométrie de base, les enfants plus âgés sont, par conséquent, meilleurs que les enfants plus jeunes. En plus de l'amélioration des scores avec l'âge, l'écart entre les voyants en modalité visuelle et les non-voyants a tendance à s'accroître. Il semblerait donc que l'instruction formelle des concepts géométriques de base ne soit pas l'unique cause du développement de ces compétences géométriques, la vision joue un rôle primordial. En résumé, nous pouvons répondre positivement à notre question de recherche.

Ce travail s'est inspiré de l'étude de Dehaene et al. (2006) dans laquelle une tâche permettant d'évaluer la compréhension des concepts géométriques de base chez l'enfant et l'adulte a été développée. Cette recherche a permis de rendre compte d'un développement inné des connaissances géométriques en l'absence d'éducation. Dès lors, nous avons adapté cette tâche à la modalité haptique et à la population non-voyante.

Bien qu'il semble que la vision soit nécessaire au développement des connaissances géométriques de base, cela n'est pas le cas de tous les domaines numériques. En effet, les dernières études sur le développement des processus de quantification, des opérations arithmétiques chez l'enfant et l'adulte aveugles suggèrent que la cognition numérique n'est pas dépendante de la vision.

Enfin, au vu du peu de données sur ce domaine chez l'enfant aveugle et la personne non-voyante de manière générale, il est certain que de futures recherches permettront d'approfondir et d'étendre les conclusions obtenues au travers de ce mémoire.

Bibliographie

- Abboud, S., Maidenbaum, S., Dehaene, S., & Amedi, A. (2015). A number-form area in the blind. *Nature Communications*, 6(6026), 1-9. <https://doi.org/10.1038/ncomms7026>
- Almaric, M., Denghien, I., & Dehaene, S. (2018). On the role of visual experience in mathematical development : Evidence from blind mathematicians. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 30, 314-323. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2017.09.007>
- Barrouillet, P., Billard, C., de Agostini, M., Démonet, J.-F., Fayol, M., Gombert, J.-E., Habib, M., Le Normand, M.-T., Ramus, F., Sprenger-Charolles, L. et al. (2007). *Dyslexie, dysorthographe, dyscalculie : Bilan des données scientifiques*. Les éditions Inserm. <https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-01570674/document>
- Bideaud, J., Lehalle, H., & Vilette, B. (2004). *La conquête du nombre et ses chemins chez l'enfant*. Presses universitaires du Septentrion.
- Braconne-Michoux, A. (2014). Les niveaux de pensée en géométrie de van Hiele : de la théorie à l'épreuve des classes. *Association mathématique du Québec*, LIV(1), 24-51. <https://archimede.mat.ulaval.ca/amq/bulletins/mar14/06b-maitre-van-Hiele.pdf>
- Camos, V. (2011). La cognition numérique chez l'animal et le bébé. In M. Habib, M.-P. Noël, F. George-Poracchia, & V. Brun (eds.), *Calculs et dyscalculies : Des modèles à la rééducation* (pp. 17-28). https://www.researchgate.net/publication/259027059_La_cognition_numerique_chez_l'animal_et_le_bebe
- Cappagli, G., & Gori, M. (2016). Auditory spatial localization : Developmental delay in children with with visual impairments. *Research in Developmental Disabilities*, 53, 391-398. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2016.02.019>
- Castronovo, J., & Delvenne, J.-F. (2013). Superior numerical abilities following early visual deprivation. *Cortex*, 49(5), 1435-1440. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2012.12.018>

- Castronovo, J., & Seron, X. (2007a). Numerical estimation in blind subjects : Evidence of the impact of blindness and it following experience. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 33(5), 1089-1106. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.33.5.1089>
- Castronovo, J., & Seron, X. (2007b). Semantic numerical representation in blind subjects: The role of the vision in the spatial format of the mental number line. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 60(1), 101–119. <https://doi.org/10.1080/17470210600598635>
- Cattaneo, Z., Fantino, M., Silvanto, J., Tinti, C., & Vecchi, T. (2011). Blind individuals show pseudoneglect in bisecting numerical intervals. *Attention, Perception & Psychophys*, 73, 1021-1028. <https://doi.org/10.3758/s13414-011-0094-x>
- Cattaneo, Z., Rinaldi, L., Geraci, C., Cecchetto, C., & Papagno, C. (2017). Spatial biases in deaf, blind, and deafblind individuals as revealed by a haptic line bisection task. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 71, 1-9. <https://doi.org/10.1177/1747021817741228>
- Crollen, V., Collignon, O., & Noël, M.-P. (2017). Visuo-spatial processes as a domain-general factor impacting numerical development in atypical populations. *Journal of Numerical Cognition*, 3(2), 344-364. <https://doi.org/10.5964/jnc.v3i2.44>
- Crollen, V., Dormal, G., Seron, X., Lepore, F., & Collignon, O. (2013). Embodied numbers: The role of the vision in the development of number-space interactions. *Cortex*, 49, 276-283. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2011.11.006>
- Crollen, V., Lazzouni, L., Rezk, M., Bellemare, A., Lepore, F., Noël, M.-P., Seron, X., & Collignon, O. (2019). Recruitment of the occipital cortex by arithmetic processing follows computational bias in the congenitally blind. *NeuroImage*, 186, 549-556. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.11.034>
- Crollen, V., Mahe, R., Collignon, O., & Seron, X. (2011). The role of the vision in the development of finger-number interactions : Finger-counting and finger-montring in blinc children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 109(4), 525-539. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2011.03.011>

- Crollen, V., Noël, M.-P., Seron, X., Mahau, P., Lepore, F., & Collignon, O. (2014). Visual experience influence the interactions between fingers and numbers. *Cognition*, 133(1), 91-96. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2014.06.002>
- Dehaene, S. (1997). *The number sense*. Oxford University Press. <http://cognitionandculture.net/wp-content/uploads/the-number-sense-how-the-mind-creates-mathematics.pdf>
- Dehaene, S., Bossini, S., & Giraux, P. (1993). The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology: General*, 122(3), 371-396. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.122.3.371>
- Dehaene, S., & Cohen, L. (1997). Cerebral pathways for calculation: double dissociation between rote verbal and quantities knowledge of arithmetic. *Cortex*, 33(2), 219-250. [https://doi.org/10.1016/S0010-9452\(08\)70002-9](https://doi.org/10.1016/S0010-9452(08)70002-9)
- Dehaene, S., Izard, V., Pica, P., & Spelke, E. (2006). Core knowledge of geometry in an amazonian indigene group. *Science*, 311, 381-384. <https://doi.org/10.1126/science.1121739>
- Dillon, M. R., Persichetti, A. S., Spelke E. S., & Dilks, D. D. (2017). Places in the Brain: Bridging Layout and Object Geometry in Scene-Selective Cortex. *Cerebral Cortex*, 1-10. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhx139>
- Dillon, M. R. & Spelke, E. S. (2015). Core geometry in perspective. *Developmental Science*, 18(6), 894-908. <https://doi.org/10.1111/desc.12266>
- Dormal, V., Crollen, V., Baumans, C., Lepore, F., & Collignon, O. (2016). Early but not late blindness leads to enhanced arithmetic and working memory abilities. *Cortex*, 83, 212-221. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.07.016>
- Ferrand, L., Riggs, K. J., & Castronovo, J. (2010). Subitizing in congenitally blind adults. *Psychonomic Bulletin & Review*, 17(6), 840-845. <https://doi.org/10.3758/PBR.17.6.840>
- Fuson, K. C., Richards, J., & Briars, D. J. (1982). The acquisition and the elaboration of the number word sequence. In C. J. Brainerd (eds), *Children's Logical and Mathematical Cognition* (pp. 33-92). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-9466-2_2

- Gandini, D., & Lemaire, P. (2005). La résolution d'opérations arithmétiques au cours du développement. In M.-P. Noël (ed.), *La dyscalculie, trouble du développement numérique* (pp. 139-168).
- Gelman, R., & Gallistel, C. R. (1978). *The Child's Understanding of Number*. Harvard University Press.
- Gori, M., Cappagli, G., Baud-Bovy, G., & Finocchietti, S. (2017). Shape perception and navigation in blind adults. *Frontiers in Psychology*, 8(10), 1-12. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00010>
- Gori, M., Sandini, G., Martinoli, C., & Burr, D. (2014). Impairment of auditory spatial localization in congenitally blind human subjects. *Brain : A Journal of Neurology*, 137, 288-293. <https://doi.org/10.1093/brain/awt311>
- Habib, M. (2018). *La constellation des dys : Bases neurologiques de l'apprentissage et ses troubles*. De Boeck Supérieur.
- Halberda, J., & Feigenson, L. (2008). Developmental change in the acuity of the « Number sense » : The approximate number system in 3-, 4-, 5-, and 6-years-olds and adults. *Developmental Psychology*, 44(5), 1457-1465. <https://doi.org/10.1037/a0012682>
- Hyde, D. C. (2011). Two systems of non-symbolic numerical cognition. *Frontiers in Human Neuroscience*, 5(150), 1-8. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2011.00150>
- Izard, V., Pica, P., Spelke, E., & Dehaene, S. (2011). Flexible intuitions of Euclidean geometry in an Amazonian indigene group. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(24), 9782-9787. <https://doi.org/10.1073/pnas.1016686108>
- Izard, V., & Spelke, E. S. (2009). Development of sensitivity to geometry in visual forms. *Journal of Human Evolution*, 23(3), 213-248. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3045057/>
- Kanjlia, S., Feigenson, L., & Bedny, M. (2018). Numerical cognition is resilient to dramatic changes in early sensory experience. *Cognition*, 179, 111-120. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2018.06.004>

- Kanjlia, S., Lane, C., Feigson, L., & Bedny, M. (2016). Absence of visual experience modifies the neural basis of numerical thinking. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(40), 1-6, <https://doi.org/10.1073/pnas.1524982113>
- Lafay, A., Saint-Pierre, M.-C., & Macoir, J. (2013). Développement des systèmes numériques non symboliques et prédicteurs de réussite mathématique. *Glossa*, 112, 1-17. <http://glossa.fr/userdata/640d0fcce403937f49a2c4d44177091d.pdf>
- Landau, B., Gleitman, H., & Spelke, E. (1981). Spatial knowledge and geometric representation in a child blind from birth. *Science*, 213(4513), 1275-1278. <https://doi.org/10.1126/science.7268438>
- Lecointe, A.-S., Lépine, R., & Camos, V. (2005). Développement et troubles des processus de quantification. In M.-P. Noël (ed.), *La dyscalculie, trouble du développement numérique* (pp. 41-75).
- Lemaire, P., Duverne, S., & El Yagoubi, R. (2002). Le développement des stratégies en résolution de problèmes arithmétiques. In J. Bideaud & H. Lehalle (eds.), *Le développement des activités numériques chez l'enfant* (pp. 195-211).
- Lipton, J.S., & Spelke, E.S. (2003). Origins of the number sense : Large-number discrimination in human infants. *Psychological Science*, 14, 396-401. <https://doi.org/0.1111/1467-9280.01453>
- Lipton, J.S., & Spelke, E.S. (2004). Discrimination of large and small numerosities by human infants. *Infancy*, 5, 271-290. https://doi.org/10.1207/s15327078in0503_2
- Marchand, P. (2009). Le développement du sens spatial au primaire. *Association Mathématique du Québec*, XLIX(3), 63-79. https://archimede.mat.ulaval.ca/amq/bulletins/oct09/Atelier_Marchand.pdf
- Masson, N., & Pesenti, M. (2014). Attentional bias induced by solving simple and complex addition and subtraction problems. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 67(8), 1514-1526. <https://doi.org/10.1080/17470218.2014.903985>
- Masson, N., & Pesenti, M. (2016). Interference of lateralized distractors on arithmetic problem solving: a functional role for attention shifts in mental calculation. *Psychological Research*, 80(4), 640-651. <https://doi.org/10.1007/s00426-015-0668-7>

- McCrink, K., Dehaene, S., & Dehaene-Lambertz, G. (2007). Moving along the mental number line : Operational momentum in nonsymbolic arithmetic. *Perception & Psychophysics*, 69 (8), 1324-1333. <https://doi.org/10.3758/BF03192949>
- Noël, M.-P., & Palmers, E. (2003). La perception numérique chez le bébé et le petit enfant : Une mise en question. *Enfance*, 55(1), 65-73. <https://doi.org/10.3917/enf.551.0065>
- Palmers, E., & Noël, M.-P. (2004). Bases phylogénétiques et ontogénétiques des traitements numériques. In M. Pesenti & X. Seron (eds.), *La cognition numérique* (pp. 221-247).
- Piazza, M. (2004). Processus de quantification : subitizing, dénombrement et estimation de numérosité. In M. Pesenti & X. Seron (eds.), *La cognition numérique* (pp. 113-134).
- Pinet, L., & Gentaz, E. (2007). La reconnaissance des figures géométriques planes par les enfants de 5 ans. *Grand N*, 80, 17-28. <http://numerisation.univ-irem.fr/GN/IGR07021/IGR07021.pdf>
- Rinaldi, L., Merabet, L. B., Vecchi, T., & Cattaneo, Z. (2018). The spatial representation of number, time, and serial order following sensory deprivation : A systematic review. *Neuroscience and Biobehavioral Review*, 90, 371-380. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2018.04.021>
- Rousselle, L. (2005). Le point sur la question des compétences numériques précoces. In M.-P. Noël (ed.), *La dyscalculie, trouble du développement numérique* (pp. 15-40).
- Satlow, E., & Newcombe, N. (1998). When is a triangle not a triangle? Young children's development concepts of geometric shape. *Cognitive Development*, 13, 547-559. [https://doi.org/10.1016/S0885-2014\(98\)90006-5](https://doi.org/10.1016/S0885-2014(98)90006-5)
- Siegler, R. S., & Booth, J. L. (2004). Development of numerical estimation in young children. *Child Development*, 75(2), 428-444. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2004.00684.x>
- Szucs, D., & Csépe, V. (2005). The parietal distance effect appears in both the congenitally blind and matched sighted controls in an acoustic number comparison task. *Neuroscience Letters*, 384, 11-16. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2005.04.050>

- Spelke, E. (2011). Natural number and natural geometry. In S. Dehane & E. M. Brannon. *Space, time and number in the brain : Searching for the foundations of mathematical thought* (pp. 287- 317). <https://doi.org/10.1016/C2010-0-66570-9>
- Spelke, E., Lee, S., A., & Izard, V. (2010). Beyond core knowledge : Natural geometry. *Cognitive Science*, 34, 863-884. <https://doi.org/10.1111/j.1551-6709.2010.01110>
- Starkey, P., Spelke, E.S., & Gelman, R. (1983). Detection of intermodal numerical correspondences by human infants. *Science*, 22, 179-181. <https://doi.org/10.1126/science.6623069>
- Starkey, P., Spelke, E.S., & Gelman, R. (1990). Numerical abstraction by human infants. *Cognition*, 36, 97-127. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(90\)90001-Z](https://doi.org/10.1016/0010-0277(90)90001-Z)
- Strauss, M.S. & Curtis, L.E. (1981). Infant perception of numerosity. *Child Development*, 52, 1146-1152. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.1981.tb03160.x>
- Vallortigara, G. (2017). Comparative cognition of number and space : the case of geometry and of the mental number line. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 373, 1-8. <https://doi.org/10.1098/rstb.2017.0120>
- Vauclair, J. (2000). Connaissances protonumériques chez le primate et le nouveau-né. In M. Pesenti & X. Seron (eds.), *Neuropsychologie des troubles du calcul et du traitement des nombres* (pp. 11-32). <https://www.researchgate.net/publication/297401388>
- Van Loosbroek, E., & Smitsman, W. (1990) Visual perception of numerosity in infancy. *Developmental Psychology*, 26(6), 916-222. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.26.6.911.b>
- Vercillo, T., Burr, D., & Gori, M. (2016). Early visual deprivation severely compromises the auditory sense of space in congenitally blind children. *Developmental Psychology*, 52(6), 847-853. <https://doi.org/10.1037/dev000013>
- Wood, J.N., & Spelke, E.S. (2005a). Chronometric studies of numerical cognition in five-month-old infants. *Cognition*, 97, 23-39. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2004.06.007>

- Wood, J.N., & Spelke, E.S. (2005b). Infants' enumeration of actions : Numerical discrimination and its signature limits. *Developmental Science*, 8, 173-181. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2005.00404.x>
- Wynn, K. (1996). Infants' individuation and enumeration of actions. *Psychological Science*, 7(3), 164-169. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.1996.tb00350.x>
- Xu, F. (2003). Numerosity discrimination in infants : Evidence for two systems of representations. *Cognition*, 89, B15-25. [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(03\)00050-7](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(03)00050-7)
- Xu, F., & Spelke, E.S. (2000). Large number discrimination in 6-month-old infants. *Cognition*, 74(1), B1-B11. [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(99\)00066-9](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(99)00066-9)
- Xu, F., Spelke, E.S. & Goddard, S. (2005). Number sense in human infants. *Developmental Science*, 8, 88-101. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2005.00395.x>

Depuis quelques décennies, certains chercheurs ont pour intérêt le développement de la personne aveugle dans différents domaines, dont la cognition numérique. Ils ont tenté de répondre à plusieurs questions telles que l'impact de la cécité sur la résolution d'opérations arithmétiques ou encore l'influence de celle-ci sur l'activation des aires cérébrales. Toutes ces études ont permis d'accroître nos connaissances sur les éventuelles conséquences d'une déficience visuelle mais il y a encore beaucoup à apprendre, à découvrir. En effet, certains points comme la géométrie n'ont jamais été étudiés chez l'adulte et l'enfant non-voyants.

C'est pourquoi, dans le cadre de ce mémoire, nous avons adapté une tâche à choix multiple permettant d'évaluer la compréhension des connaissances géométriques de base à la modalité tactile. L'objectif étant de savoir si l'enfant aveugle développe ou non des compétences équivalentes à celles d'enfants tout-venant. Dans cette épreuve, les enfants doivent déterminer quelle forme tactile, parmi quatre, viole le concept géométrique cible. Au total, l'étude porte sur 13 enfants non-voyants et 30 enfants voyants. Les résultats suggèrent que les enfants voyants n'ayant pas les yeux bandés sont meilleurs que les enfants aveugles et les enfants voyants avec les yeux bandés, qui ont des scores comparables. Dès lors, le développement de la compréhension des concepts géométriques de base semble dépendant de la vision et l'expérience visuelle antérieure ne suffit pas pour atteindre un bon niveau de compréhension. Enfin, ce premier pas dans la recherche sur la géométrie en cas de cécité soulève d'autres points d'interrogation. Par exemple, les adultes aveugles sont-ils également moins bons que les voyants ? Les enfants non-voyants parviennent-ils à rattraper leur retard ? Les aires cérébrales sollicitées par les aveugles sont-elles identiques ?