



Département d'Orthophonie
Gabriel DECROIX

MEMOIRE

En vue de l'obtention du
Certificat de Capacité d'Orthophonie

présenté par :

Léa LANCELOT

soutenu publiquement en juin 2018 :

La représentation du nombre chez l'enfant implanté cochléaire et l'enfant entendant

MEMOIRE dirigé par :

Sandrine MEJIAS, Maître de conférences, Département d'orthophonie, Université de Lille

Lille – 2018

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier Mme Mejias, Maître de conférences, d'avoir accepté d'encadrer ce mémoire et de s'être rendue disponible au cours de ces deux dernières années pour m'accompagner dans ce projet.

Je remercie infiniment toutes les familles qui ont bien voulu participer à cette étude. Votre implication et vos encouragements ont été un réel soutien et ont rendu ce travail beaucoup plus agréable à réaliser. Encore merci pour votre accueil chaleureux, vos disponibilités, votre intérêt et votre motivation.

Je remercie tout particulièrement les établissements et orthophonistes en libéral pour le grand intérêt qu'ils ont porté à l'étude, leur investissement et leur soutien dans la recherche des familles.

Merci également à Manon Adline, étudiante en orthophonie et future collègue, pour son soutien, ses conseils, ses réflexions et son dynamisme. Faire sa connaissance grâce à ce projet et effectuer ce travail en collaboration avec elle a été très enrichissant. J'espère que ce le fut autant pour elle que pour moi.

Enfin, un grand merci à ma famille et mes ami(e)s qui m'ont accompagnée toutes ces années. Merci pour leurs encouragements, leur temps, leur relecture et leur soutien quotidien.

Résumé :

Le développement des représentations numériques implique des capacités langagières. S'il est reconnu que les enfants implantés cochléaires ont un langage atypique, on ignore à quel point cette atypie retentit sur leur cognition mathématique. Dans cette étude, nous examinons les aptitudes numériques (i.e., estimation analogique et symbolique, maîtrise de la chaîne numérique, transcoding, compétences arithmétiques) et compétences associées (i.e., gnosies digitales, mémoire visuo-spatiale et auditivo-verbale, compétences linguistiques) d'un échantillon de 15 enfants implantés cochléaires scolarisés en école ordinaire. Ces enfants ont été appariés à un groupe d'enfants entendants de même âge chronologique et à un groupe d'enfants entendants de même niveau linguistique. Les résultats montrent que la précision des compétences numériques approximatives des enfants implantés cochléaires est diminuée en raison d'un mauvais recodage verbal par rapport aux enfants de même âge et identique aux enfants de même niveau langagier. De plus, les résultats montrent que les compétences numériques exactes des enfants implantés cochléaires avoisinent fortement celles des deux groupes contrôles ; seule la connaissance de la chaîne numérique est à consolider. Compte tenu de ces données, l'élaboration d'outils d'évaluation et de remédiation spécifiques aux enfants implantés cochléaires est à encourager afin de justifier, si nécessaire, une prise en soin de la cognition numérique de ces enfants.

Mots-clés :

Représentation numérique, enfant sourd, implant cochléaire, langage

Abstract :

The development of numerical representations involves language skills. If it is recognized that cochlear implanted children have atypical language, we ignore how this atypical language development affects their mathematical cognition. In this study, we examine numerical skills (i.e., analogical and symbolic estimation, counting, transcoding, arithmetic skills) and number related-skills (i.e., digital gnosia, visual and verbal working memories, language skills) of a sample of 15 cochlear implanted children schooled in regular public schools. These children were matched to a group of hearing children based on their chronological age and to a group of hearing children with the same language level. The results indicate that the number magnitude representation of the cochlear implanted children is less accurate compared to the same age hearing children and as accurate as the same language level hearing children. In addition, the results show that exact numerical skills of cochlear implanted children are close to those of the two control groups; only the knowledge of the counting sequence needs to be consolidated. Given these data, the development of specific assessment and remediation tools to cochlear implanted children seems to be necessary.

Keywords :

Numerical representation, deaf children, cochlear implant, language

Table des matières

Introduction	1
Contexte théorique, buts et hypothèses	2
.1.Rappels succincts des composants de notre système numérique	2
.1.1.Modèle Triple Code (Dehaene, 1992)	2
.1.2.Compétences numériques approximatives et exactes.....	2
.1.3.Compétences non-numériques associées au développement de la cognition numérique	3
.2.Etat des recherches sur le développement du système numérique chez les enfants implantés cochléaires.....	4
.2.1.Revue des compétences non-numériques associées au développement de la cognition numérique chez les enfants implantés cochléaires	4
.2.2.Revue des compétences numériques de l'enfant IC	5
.2.2.1.Compétences numériques approximatives	5
.2.2.2.Compétences numériques exactes	5
.3.Buts.....	7
.4.Hypothèses	7
Méthode	8
.1.Participants de l'étude	8
.2.Procédure	9
.3.Tâches & Matériel	9
.3.1.EVIP-B	10
.3.2.Matrice.....	10
.3.3.Empan visuo-spatial	10
.3.4.Empan auditivo-verbal	11
.3.5.Gnosies digitales.....	11
.3.6.Comptage.....	11
.3.7.Ecriture de nombres arabes sous-dictée.....	11
.3.8.Lecture à voix haute de nombres arabes.....	12
.3.9.Calcul.....	12
.3.10.Estimation.....	12
Résultats	13
.1.Les compétences non-numériques favorables au développement numérique.....	13
.2.Les compétences numériques approximatives	14
.2.1.Estimation en conditions non-symboliques.....	14
.2.2.Estimation en conditions symboliques	14
.3.Les compétences numériques exactes	14
.4.Analyse corrélacionnelle entre les compétences langagières et les compétences	

arithmétiques.	15
Discussion	17
Conclusion	22
Bibliographie	24
Liste des annexes	28
Annexe n°1 : Lettre explicative adressée aux structures, aux orthophonistes en libéral.....	28
Annexe n°2 : Lettre explicative adressée aux familles.....	28
Annexe n°3 : Trame du protocole individuel pour l'administrateur.....	28
Annexe n°4 : Représentation du potentiomètre.....	28

Introduction

Les spécificités du développement langagier des enfants implantés cochléaires ont fait l'objet de nombreuses études. Néanmoins, rares sont celles qui ont exploré le développement des compétences numériques de ces enfants. Comment s'approprient-ils les mathématiques ?

Actuellement, on sait que le développement langagier des enfants sourds est atypique (Fagan & Pisoni, 2010; Geers, Moog, Biedenstein, Brenner, & Hayes, 2009; Rinaldi, Baruffaldi, Burdo, & Caselli, 2013) et que la majorité de ces enfants ne présente pas de déficience intellectuelle ou de troubles neurologiques. On sait par ailleurs qu'au moins une partie de nos connaissances numériques se développe conjointement à celles de nos performances langagières (Donlan, Cowan, Newton, & Lloyd, 2007). Qu'en est-il alors du développement de leurs représentations numériques ?

Ce mémoire s'intègre dans une étude plus générale du développement de la cognition numérique. Il fait suite au mémoire « La représentation du nombre chez les enfants dysphasiques » réalisé par Bourlès, Laussel, et Mejias (2016), et reprend la méthodologie employée dans celui-ci. De plus, il est mené parallèlement à d'autres mémoires franco-belges s'intéressant au développement numérique des enfants sourds.

L'objectif principal de cette étude est de déterminer les éventuelles particularités présentes dans les composants de la cognition mathématique chez les enfants sourds implantés cochléaires pour définir les dysfonctionnements susceptibles de les rendre inopérants. En outre, nos données serviront à enrichir celles de la littérature pour légitimer, si nécessaire, l'élaboration d'outils diagnostiques et de remédiations spécifiques à cette population.

Pour atteindre ces objectifs nous comparerons, d'une part, les compétences non-numériques associées au développement de la cognition numérique et, d'autre part, les compétences numériques approximatives et exactes des enfants implantés cochléaires intégrés en classe ordinaire à celles d'enfants normo-entendants. Si des divergences sont observées, elles nous permettront de dégager des hypothèses concernant le ou les motif(s) susceptible(s) d'être à l'origine de difficultés numériques et de proposer des idées de remédiation.

Avant de décrire la population recrutée et la méthodologie appliquée dans cette étude, une courte présentation des différents composants de notre système numérique et un aperçu des études disponibles sur la représentation des nombres chez les enfants implantés cochléaires seront développés. Par la suite, les résultats obtenus par l'ensemble des sujets aux différentes épreuves de cette étude seront exposés. Pour finir, les résultats seront discutés et confrontés aux données de la littérature dans le but de répondre aux hypothèses initiales.

Contexte théorique, buts et hypothèses

Dans cette première partie, nous allons développer le contexte théorique en parcourant les composants de notre système numérique et en réalisant une revue de la littérature sur le développement numérique des enfants implantés. Ensuite, nous reviendrons sur les buts de ce mémoire puis nous présenterons les hypothèses établies à partir du contexte théorique.

.1. Rappels succincts des composants de notre système numérique

Dans cette première partie, nous allons succinctement présenter les différents composants de notre système numérique, à savoir l'articulation en trois codes (analogique, verbal et arabe) proposée par Dehaene (1992) dans son Modèle du Triple code, ainsi que les deux principaux sous-systèmes numériques (approximatif et exact) rapportés dans la littérature (Feigenson, Dehaene, & Spelke, 2004). Enfin, nous évoquerons les compétences non-numériques associées au développement des représentations numériques.

.1.1. Modèle Triple Code (Dehaene, 1992)


Le Modèle du Triple Code (Dehaene, 1992) met en relief trois systèmes distincts des représentations numériques. Le système analogique des quantités, qui équivaut à la représentation sémantique non-verbale et non symbolique des magnitudes (e.g., ●●●). Le système verbal, assimilé à la représentation symbolique orale ou écrite des nombres (e.g., [tʁaw] ou « trois »). Il a des propriétés phonologiques, lexicales et syntaxiques comme n'importe quel système linguistique. Et, le système visuo-spatial, correspondant à la représentation figurative des nombres (e.g., 1, 2, 3). Ce système a également des propriétés lexicales et syntaxiques (i.e., la valeur de base de 0 à 9 et la position des chiffres unité, dizaine, centaine). Chacun de ces systèmes est recruté en fonction de la tâche à traiter (e.g., estimation, comptine numérique, calcul) et permet le transcodage, c'est-à-dire passer d'un code à l'autre (e.g., estimation de quantités symboliques en codage analogique, lecture et écriture de nombres arabes).

L'acquisition des codes numériques verbaux et visuo-spatiaux semble favorisée par les apprentissages (Fayol, 2012) tels que les apprentissages scolaires (e.g., apprentissage de la chaîne numérique verbale, opérations, dictée de nombre, lecture de nombre, etc.) et, l'utilisation quotidienne des quantités et symboles numériques présents dans notre environnement direct (e.g., lecture ou écriture de l'heure, des prix lors des courses, des horaires de trains, de la quantité des ingrédients pour les recettes, etc.).

.1.2. Compétences numériques approximatives et exactes

Maintenant que nous savons que les nombres peuvent être encodés sous différents formats, nous allons nous intéresser à nos capacités à les traiter. En effet, nous sommes en mesure d'appréhender les quantités de manière approximative ou de manière exacte (Feigenson et al., 2004).

Des études montrent qu'après seulement quelques heures de vie, à l'instar d'autres espèces, les humains sont habilités à manipuler des quantités approximativement, quelle que soit la modalité d'entrée – visuelle, visuo-spatiale, auditive ou visuo-auditive (Izard, Sann, Spelke, & Streri, 2009 ;

Lipton & Spelke, 2003; Wood & Spelke, 2005; Xu & Arriaga, 2010; Xu, Spelke, & Goddard, 2005). Dehaene (1992) emploie également le terme de « sens du nombre » pour désigner cette faculté, innée et indépendante du langage, à se représenter des magnitudes numériques. Ce système numérique approximatif (SNA) nous permet d'effectuer des tâches de comparaison d'items non-symboliques (e.g., collections de points) pour définir la collection qui contient le plus ou le moins d'items, des tâches d'estimation à partir de matériel soit analogique soit symbolique (e.g.,  ≈ 10) ou encore des tâches de calculs approximatifs de grands nombres (e.g., $1876 + 1998 \approx 4000$). L'acuité de ce système tend à s'affiner avec l'âge (Halberda & Feigenson, 2008).

En complément du SNA, l'Homme a développé un système numérique exact (SNE) à l'aide de ses facultés linguistiques et figuratives. Contrairement au SNA, le SNE nous permet de manier avec exactitude des petites et des grandes quantités au moyen des codes symboliques (verbal et arabe) des nombres (Dehaene & Cohen, 1995). De ce fait, ce système nous offre la possibilité de percevoir précisément et rapidement des quantités inférieures à quatre en un coup d'œil (c'est ce qu'on appelle le « subitizing » ; Mandler & Shebo, 1982 ; cités par Dehaene, 1992) ou résoudre avec exactitude des opérations plus complexes (e.g., $1876 + 1998 = 3874$).

1.3. Compétences non-numériques associées au développement de la cognition numérique

On pensait que les compétences mathématiques étaient une « capacité unique » dépendante de la logique (voir pour revue Content, 2017) mais aujourd'hui on sait qu'elles sont diverses et dépendantes d'aptitudes non-numériques.

En effet, Noël (2005) a observé que la capacité à reconnaître les doigts était prédictive des capacités numériques ultérieures. Les enfants rencontrant des difficultés en mathématiques présentent généralement de moins bonnes performances dans la tâche de gnosies digitales que les enfants sans difficultés en mathématiques (Costa et al., 2011).

De plus, des chercheurs ont trouvé une réelle interaction entre les habiletés visuo-spatiales et le développement ultérieur des habiletés mathématiques, que ce soit chez les enfants ou les adolescents (Reuhkala, 2001; Zhang et al., 2014). Les habiletés visuo-spatiales seraient impliquées dans la résolution de tâches numériques verbales telles que le comptage, la dénomination de nombres ou la tâche de dénomination des doigts (Cornu, Schiltz, Martin, & Hornung, 2018).

Enfin, les compétences phonologiques, le vocabulaire de base, les habiletés grammaticales et la mémoire verbale à court terme impliquant le langage s'avèrent significativement corrélés aux compétences arithmétiques et géométriques (Kleemans, Segers, & Verhoeven, 2018). Ces compétences linguistiques favoriseraient la mémorisation des « mots-nombres » pour l'élaboration de la chaîne numérique verbale, la mémorisation des faits arithmétiques mais aussi la construction du langage mathématique (Dworzak, 2017). La mémoire de travail verbale, quant à elle, semble prédictive des performances mathématiques et permettrait d'effectuer des tâches de type calcul mental (Van de Weijer-Bergsma, Kroesbergen, & Van Luit, 2015).

.2. Etat des recherches sur le développement du système numérique chez les enfants implantés cochléaires

Dans sa revue de la littérature, Roux (2014) rapporte que les enfants sourds présentent un retard systématique de deux ans au niveau de leur développement numérique. Ces dernières années, le dépistage néonatal de la surdité et le développement de nouvelles technologies auditives ont permis aux enfants présentant une surdité sévère à profonde de bénéficier d'implants cochléaires¹. Cet appareil auditif améliore leur audition et parallèlement l'accès à la langue orale. Cet appareil auditif favorise-t-il un développement numérique similaire à celui observé chez l'enfant tout-venant ?

Dans cette seconde partie nous allons faire une synthèse des recherches s'intéressant aux compétences non-numériques associées au développement de la cognition numérique et aux compétences numériques approximatives et exactes des enfants implantés cochléaires (IC).

.2.1. Revue des compétences non-numériques associées au développement de la cognition numérique chez les enfants implantés cochléaires

Comme évoqué précédemment, différentes compétences non-numériques sont recrutées au cours des traitements numériques. Qu'en est-il de celles-ci chez les enfants implantés cochléaires (IC) ?

Dans une étude récente, Brisset, Mussolin, et Leybaert (2017) ont testé les gnosies digitales, les empan visuel et visuo-spatial chez 29 enfants sourds (dont 13 munis d'un implant cochléaire). Ils concluent qu'aucune différence de performance n'est apparue pour le test des gnosies digitales et le test d'empan visuel chez les enfants IC et chez les enfants entendants. De plus, l'empan visuo-spatial des enfants IC est apparu légèrement supérieur aux enfants entendants. En revanche, leurs résultats ont montré que la mémoire de travail auditivo-verbale des enfants sourds implantés était moins performante que celles de leurs pairs entendants. Dans leur étude, Burkholder et Pisoni (2003) ont également montré que chez des enfants IC, l'empan auditivo-verbal était moins étendu par rapport à leurs homologues normo-entendants. Par conséquent, si les enfants IC ont une mémoire auditivo-verbale altérée, leurs capacités numériques et arithmétiques pourraient en être impactées.

Par ailleurs, si la précocité de l'implantation favorise un développement langagier analogue à celui de l'enfant normo-entendant (Johnson & Goswami, 2010; Niparko et al., 2010), des études ont tout de même mis en évidence des retards de langage en réception et en expression chez les enfants implantés cochléaires (Ouellet, Le Normand, & Cohen, 2001; Young & Killen, 2002). Or, comme nous l'avions mentionné précédemment, le développement numérique symbolique (code verbal et code arabe) se fait aux dépens du langage (Donlan et al., 2007). Compte tenu de ce qui précède et de nos inférences, un retard de langage pourrait avoir des incidences sur le développement des systèmes numériques des enfants IC et le retarder. Mais, si l'on venait à comparer des enfants IC à des enfants de même niveau linguistique, alors le développement des systèmes numériques des enfants IC suivrait certainement une courbe d'évolution classique.

Pour résumer, les enfants implantés cochléaires auraient des compétences en gnosies digitales et en empan visuo-spatial comparables aux enfants tout-venant. En revanche, leur empan auditivo-

¹ L'implant cochléaire est une prothèse auditive comprenant une partie externe (microphone, processeur vocal et antenne émettrice) et une partie implantée dans l'os temporal (récepteur, porte électrodes).

verbal et leur niveau de langage seraient moins performants, ce qui pourrait avoir un impact négatif sur le développement de leur cognition numérique.

.2.2. Revue des compétences numériques de l'enfant IC

Dans cette partie nous aborderons le développement des compétences numériques approximatives des enfants implantés cochléaires, puis le développement des compétences numériques exactes.

.2.2.1. Compétences numériques approximatives

A notre connaissance, peu de recherches ont été menées sur la représentation approximative du nombre chez les enfants sourds implantés cochléaires, et les connaissances disponibles dans la littérature sont contradictoires ou incomplètes.

Arfé et al. (2011) ont analysé les capacités de comparaison analogique et numérique chez 10 enfants IC et 99 enfants normo-entendants, âgés de 5.2 ans en moyenne. Les enfants IC sont apparus plus performants que les enfants entendants dans la tâche de comparaison de quantités analogiques. Les enfants sourds ont également obtenu des moyennes équivalentes à leurs pairs entendants dans la tâche de comparaison de nombres arabes.

Ces résultats vont dans le sens des données obtenues par Brisset et al. (2017) qui ont montré que les 29 enfants sourds de leur étude (6-11 ans, dont 13 avec IC) étaient aussi performants que leurs pairs entendants appariés en âge et en QI sur une tâche d'estimation analogique. Toutefois, la tâche d'estimation utilisée dans cette étude impliquait des connaissances numériques symboliques. En effet, la modalité d'entrée utilisée était analogique (sets de points) tandis que la modalité de sortie était symbolique (transcription de nombres arabes). Aucune étude à notre connaissance ne semble avoir évalué les capacités d'estimation des enfants IC à partir de modalités d'entrée et de sortie uniquement analogiques.

Par ailleurs, les données de Genovese, Galizia, Gubernale, Arslan, et Lucangeli (2005) viennent nuancer les résultats vus précédemment. En effet, dans leur étude, les 10 enfants sourds (5-6 ans, dont 2 avec IC) ont obtenu des scores moins précis que leurs homologues entendants appariés en âge dans une tâche de comparaison de sets de points. Ces données corroborent avec celles de Rodríguez-Santos, Calleja, García-Orza, Iza, et Damas (2014) qui ont étudié trois tâches de comparaison (tâche de comparaison de chiffres arabes, de sets de points et de nombre de doigts) chez 10 enfants sourds (8; 5 à 9; 9 ans dont 7 IC) appariés en âge et sur différentes fonctions cognitives à 10 enfants normo-entendants. Les enfants sourds ont été moins précis que les enfants normo-entendants, néanmoins les résultats n'étaient pas significatifs. Leurs résultats montrent également que les enfants sourds effectuaient les tâches de comparaison de chiffres arabes plus lentement que les enfants entendants alors qu'aucune différence n'a été retrouvée dans les tâches de comparaison de quantités analogiques et non-symboliques.

.2.2.2. Compétences numériques exactes

A présent, nous allons établir une revue des études portant sur les compétences numériques exactes des enfants IC, à savoir leurs habiletés de comptage, de transcodage et de résolution d'opérations arithmétiques.

L'acquisition de la chaîne numérique nécessite de mémoriser un lexique de mots-nombres. Or, comme nous l'avons évoqué plus haut, les enfants IC auraient un empan auditivo-verbal réduit qui pourrait pénaliser leur apprentissage de la chaîne numérique. Les résultats obtenus dans l'étude de Brisset et al. (2017) à l'épreuve de la chaîne numérique ont montré que les enfants sourds intégrés en classe ordinaire réussissaient l'épreuve autant que leurs pairs entendants appariés en âge et en QI. Ces données correspondent également à celles retrouvées dans l'étude de Arfé et al. (2011). Les auteurs ont évalué les capacités de comptage de 10 enfants IC et de 99 enfants normo-entendants, tous âgés de 5.2 ans en moyenne. Les enfants sourds de leur étude ont obtenu des scores équivalents aux enfants entendants dans la tâche de comptage verbal.

Toutefois, d'autres auteurs viennent nuancer ces données. Palma, Gubernale, Guarnaccia, et Genovese (2010) ont observé que les 17 enfants IC de leur étude (âge moyen : 54 mois ; QI moyen) réussissaient significativement moins bien que leurs pairs normo-entendants à la tâche de comptage. Les auteurs attribuent cette baisse de performance à une faiblesse du stockage des informations verbales et des difficultés de manipulation de l'information séquentielle.

En ce qui concerne les activités de transcodage, très peu d'études ont été menées jusqu'à ce jour. Palma et al. (2010) ont analysé les capacités de lecture et d'écriture de nombres allant respectivement de 1 à 9 et de 1 à 5 chez 17 enfants IC et 100 enfants normo-entendants appariés en âge et en sexe. L'analyse statistique a révélé des performances significativement identiques pour les deux groupes (IC vs entendants). L'analyse descriptive montre de meilleurs scores en écriture de nombres arabes chez les enfants IC que chez leurs pairs entendants.

A propos des compétences arithmétiques, Huber, Kipman, et Pletzer (2014) ont mesuré les performances d'enfants IC ($n = 23$; moyenne d'âge = 10 ans) par rapport aux enfants normo-entendants sur des tâches d'opérations numériques (addition, soustraction, multiplication, complétion de calcul). Les scores obtenus par les enfants IC sont apparus significativement inférieurs à la norme mais non significativement différents du groupe contrôle. Ces résultats suggèrent que les enfants IC rencontrent des difficultés dans les tâches arithmétiques. Toutefois, après un contrôle statistique du critère linguistique sur les différentes tâches, les auteurs ont remarqué que les groupes (sourds vs entendants) ne se distinguaient plus que sur la tâche arithmétique en présentation orale issue de la WICS-IV (Wechsler, 2003). A la lumière de ce qui précède, les enfants IC auraient un système numérique fragilisé secondairement à un déficit linguistique.

Cependant, l'analyse des résultats de l'étude de Brisset et al. (2017) sur la tâche de calcul effectuée à partir du TTR (De Vos, 1992) a, quant à elle, mis en évidence des performances identiques entre les enfants sourds intégrés et leurs pairs normo-entendants.

Cette revue de la littérature a permis d'obtenir un aperçu des compétences en mathématiques des enfants IC. Actuellement, les données de la littérature restent encore peu nombreuses et discordantes. Les études passées en revue sur le développement numérique approximatif et exact des enfants IC laissent paraître des compétences proches des enfants normo-entendants. Cependant, l'absence de consensus entre les auteurs sur le développement de la cognition numérique des enfants IC est encore notable.

.3. Buts

Ce mémoire a plusieurs objectifs. Tout d'abord, comparer les compétences numériques d'enfants IC à celles d'enfants normo-entendants afin d'étudier le développement de leurs représentations numériques approximatives et exactes. Ensuite, d'enrichir les données de la littérature pour que d'éventuels outils diagnostiques et thérapeutiques spécifiques à cette population puissent être élaborés, si nécessaire, en orthophonie.

.4. Hypothèses

En appréciant les travaux de la littérature, nous émettons les hypothèses suivantes :

- Les enfants IC auront un empan visuo-spatial similaire voire supérieur aux enfants normo-entendants et des habiletés en gnosies digitales identiques à leurs pairs entendants (voir Brisset et al., 2017). En revanche, nous supposons que les enfants IC auront de moins bonnes performances aux tâches d'empan auditivo-verbal et de lexique en réception par rapport aux enfants entendants de même âge chronologique et des performances identiques aux enfants entendants de même niveau linguistique (e.g., Burkholder & Pisoni, 2003).
- L'exécution des tâches d'estimation utilisées dans la présente étude implique l'accès aux représentations numériques approximatives, soit par le biais de matériel analogique et non-symbolique (collections de points), soit par le biais de matériel symbolique (nombres arabes ou nombres verbaux oraux). Par conséquent, nous formulons les hypothèses suivantes :
 - o Les compétences d'estimation seront aussi précises chez les enfants IC que chez des enfants entendants de même âge lorsque la tâche d'estimation recourt à un matériel analogique et non-symbolique. Cette tâche n'impliquant pas de compétences langagières, elle ne devrait pas pénaliser les enfants IC. De plus, pour cette même tâche, si les compétences d'estimation des enfants IC sont comparées à celles des enfants plus jeunes de même niveau linguistique, elles devraient être meilleures puisque le système numérique analogique se précise avec l'avancée en âge (Halberda & Feigenson, 2008).
 - o Les compétences d'estimation seront moins précises chez les enfants IC que chez des enfants entendants de même âge lorsque la tâche d'estimation recourt à un matériel symbolique verbal et/ou visuo-spatial. En effet, cette tâche implique des compétences langagières alors que les enfants IC présentent généralement un retard de langage (e.g., Ouellet et al., 2001). En revanche, pour cette même tâche, si les compétences d'estimation des enfants IC sont comparées à celles des enfants entendants plus jeunes de même niveau linguistique, elles devraient être aussi précises voire plus précises.
- Les tâches davantage scolaires utilisées dans cette étude impliquent un accès aux représentations numériques exactes par du matériel symbolique verbal et/ou visuo-spatial (comptage, transcodage, calcul). Ces tâches sollicitent des compétences langagières généralement retardées chez les enfants IC (e.g., Ouellet et al., 2001). Par conséquent, les performances des enfants IC aux représentations numériques exactes seront moindres par rapport à celles des enfants entendants de même âge, mais similaires voire meilleures au regard des performances des enfants entendants de même niveau linguistique.
- Si certains pensent que le retard langagier influe sur les compétences arithmétiques des enfants IC (e.g., Huber et al., 2014), alors il peut être intéressant de vérifier l'éventuelle

existence de liens entre les compétences impliquant du langage (la mémoire auditivo-verbale, la chaîne numérique, le stock lexical en réception) et les compétences arithmétiques (calcul). Pour ce faire, nous ferons une analyse corrélacionnelle entre les compétences langagières et les compétences arithmétiques.

Méthode

Dans cette seconde partie, nous aborderons les informations concernant la population de l'étude, la procédure suivie ainsi que le contenu du protocole utilisé pour les passations.

.1. Participants de l'étude

Trois groupes de participants ont été constitués à partir d'enfants âgés de 5; 7 à 16 ans, fréquentant l'enseignement primaire et secondaire du CP à la 3^{ème}. Un consentement parental écrit autorisant l'enfant à participer à l'étude était rempli par les parents avant chaque première séance avec l'enfant. Les participants sont originaires des Hauts-de-France, d'Ile-de-France et de Belgique francophone.

Le groupe expérimental (Enfants IC) était constitué de 15 enfants francophones (âge moyen = 113 mois ; écart-type = 29.63 ; 9 filles et 6 garçons) présentant une surdité pré-linguistique profonde (n = 14) et une surdité post-linguistique profonde (n = 1). Tous les enfants ont une surdité bilatérale et sont appareillés soit d'implant cochléaire uni ou bilatéral, soit d'un implant cochléaire associé à une prothèse conventionnelle pour l'oreille controlatérale. 11 enfants implantés étaient scolarisés de manière permanente dans l'enseignement ordinaire et 4 autres enfants implantés étaient intégrés de manière partielle en enseignement ordinaire pour les cours de mathématiques. Le reste du temps, ils étaient scolarisés en enseignement spécialisé. Pour communiquer à l'école et/ou à la maison, les enfants utilisaient la langue orale accompagnée parfois du Langage Parlé Complété et/ou de la langue orale associée à la langue des signes.

Le premier groupe contrôle était constitué de 14 enfants entendants (âge moyen = 114,57 mois, écart-type = 30.12, 9 filles et 5 garçons), ayant tous le français comme langue maternelle. Les enfants implantés cochléaires ont été appariés à des enfants normo-entendants de même âge chronologique (Enfants AC). Pour comparer le groupe IC au groupe AC, les variables « sexe », « âge » et « QI » ont été contrôlées et sont présentées dans le tableau 1. Les analyses statistiques révèlent que les groupes AC et IC ont une moyenne d'âge ($t(26) = -.14 ; p = .89$) et une répartition des sexes ($\chi^2(1) = .06 ; p = .81$) identiques. Le groupe IC est donc équivalent au groupe AC.

Le second groupe contrôle était constitué de 11 enfants entendants (âge moyen = 82.18 mois, écart-type = 11.25 ; 5 filles et 6 garçons), ayant tous le français comme langue maternelle. Les enfants IC ont été appariés à des enfants normo-entendants présentant le même niveau linguistique (Enfants NL), afin de vérifier si les résultats obtenus peuvent être expliqués grâce à leur niveau de langage. Pour ce faire, les enfants IC ont été appariés aux enfants NL en fonction du score obtenu à l'EVIP (Echelle de Vocabulaire en Images Peabody ; Dunn, Theriault-Whalen, & Dunn, 1993). Cette épreuve évalue la taille du vocabulaire réceptif des enfants à l'aide d'une tâche de désignation d'images. C'est la version B de l'EVIP qui a été administrée aux trois groupes afin d'éviter tout effet de re-test. Pour comparer le groupe IC au groupe NL, les variables « sexe », « note brute à l'EVIP » et « QI » ont été contrôlées et sont présentées dans le tableau 1. Les deux groupes ont un niveau de compréhension lexicale similaire ($t(23) = -1.14 ; p = .26$) et la répartition des sexes entre les deux groupes est respectée ($\chi^2(1) = .54 ; p = .46$). Comme attendu l'âge est significativement différent entre le groupe NL² et le groupe IC ($t(19) = 3.68 ; p = .002$). Les enfants du groupe NL sont plus jeunes que les enfants du groupe IC.

² Les enfants des groupes AC et NL sont également différents en âge ($t(17) = 3.71 ; p = .002$)

Les enfants de chaque groupe ne présentaient aucun trouble neurologique ou comportemental reconnu. De plus, l'ensemble des participants ont obtenu des résultats supérieurs à -2 écarts-types (ET) à l'épreuve des matrices de la WISC non-verbale (Wechsler, 2003). Cette épreuve a permis de s'assurer qu'aucun trouble associé ne vienne biaiser les résultats du testing. Seuls les enfants IC scolarisés en école ordinaire (totalement ou partiellement) ont été intégrés dans l'étude puisque le type de scolarité de l'enfant sourd peut impacter leurs performances numériques (voir Brisset et al., 2017).

Tableau 1. Moyennes, écart-types, minimums et maximums du sexe, de l'âge, des scores normalisés en Matrice et aux scores brut à l'EVIP, et à l'épreuve des matrices des trois groupes (IC, AC, NL).

	Sexe (%)		Age (En mois)	Matrices de Wechsler (Score normalisé)	EVIP (Score brut)
	Homme	Femme	<i>M (ET)</i> [Min-Max]	<i>M (ET)</i> [Min-Max]	<i>M (ET)</i> [Min-Max]
Enfants IC (n=15)	40	60	113 (29.63) [84-192]	0.23 (0.96) [-1.2-2.4]	67,60 (25.83) [31-112]
Contrôle AC (n=14)	37	63	114,57 (30.12) [83-190]	0.54 (0.86) [-0.9-2.7]	110,50 (23.88) [72-158]
Contrôle NL (n=11)	54	45	82,18 (11.25) [69-100]	0.26 (0.79) [-1.7-1.5]	78,36 (22.02) [38-110]

.2. Procédure

Les participants du groupe IC et AC ont été recrutés par trois étudiantes ayant travaillé sur cette étude et moi-même (Adline, 2018; Lentz, 2017; Thibaudat, 2018). Des données sont également issues de mémoires inter-universitaires effectués dans le cadre de cette même étude pour les groupes AC et NL (Bourlès et al., 2016; Gérardy, 2016; Legoff, 2016; Lentz, 2017). Pour entrer en contact avec les familles, nous avons sollicité des structures spécialisées et des orthophonistes en libéral. Une lettre explicative leur a été remise (annexe 1). Un courrier explicatif a également été remis aux familles (annexe 2).

Un même protocole d'évaluation a été administré à chaque participant. Les passations se sont déroulées en deux ou trois sessions de 30 minutes chacune environ, afin de limiter les troubles d'attention et de concentration. Chaque épreuve a été réalisée individuellement en présence d'un examinateur. Les épreuves ont été présentées aléatoirement afin de limiter les biais liés à l'ordre d'administration des épreuves. Les passations ont été réalisées dans un lieu calme, soit au domicile des participants, soit dans les structures spécialisées entre septembre et mars.

.3. Tâches & Matériel

Deux sortes d'épreuves ont été administrées aux participants. Des épreuves contrôles, constituées à partir de l'EVIP B, des matrices de Wechsler, de l'empan visuo-spatial, de l'empan auditivo-verbal et des gnosies digitales. Des épreuves spécifiques au développement numérique, constituées à partir du Tedi-Maths (comptage, écriture de nombres arabes sous-dictée, lecture à voix

haute de nombres arabes), du Tempo Test Rekenen (calcul) et de tâches d'estimation. La trame du protocole individuel est présentée dans l'annexe 3.

.3.1. EVIP-B

L'Echelle de Vocabulaire en Images Peabody (EVIP) (Dunn et al., 1993) a permis de mesurer l'étendue du vocabulaire acquis par l'enfant. L'échelle est constituée de deux formes (forme A et forme B) comprenant chacune 5 items d'entraînement et 170 items de difficulté croissante. Pour éviter tout effet de re-test, c'est la forme B qui a été administrée à l'ensemble des participants. Dans cette étude, la consigne a été formulée oralement à l'enfant par l'examineur, et les différentes planches d'images ont été présentées sur un écran d'ordinateur. La passation s'est déroulée de la manière suivante : l'examineur énonçait un item et l'enfant devait montrer sur la planche active l'image correspondant à l'item entendu parmi les quatre images proposées. Les items d'entraînement ont permis de vérifier la bonne compréhension de la consigne par l'enfant. Ensuite, la passation débutait à partir des items correspondant au niveau d'âge de l'enfant. A la fin de l'épreuve, on a obtenu un score brut que l'on a également pu convertir en score normalisé. Le score normalisé a été utilisé pour révéler ou réfuter un retard de langage chez l'enfant sourd par rapport aux enfants entendants de même âge chronologique. Le score brut a été utilisé pour appairer les sujets enfants implantés cochléaires aux enfants entendants de même niveau langagier.

.3.2. Matrice

Le subtest « Matrice » de l'Echelle d'Intelligence de Wechsler pour Enfants et Adolescents, 4e Edition (Wechsler, 2003) a permis d'apprécier le raisonnement visuo-perceptif de l'enfant. Dans ce test, l'enfant devait compléter de façon logique la partie manquante d'une matrice visuelle. C'est la seule épreuve de l'étude où la consigne n'était pas donnée oralement. En effet une planche présentait la consigne à partir d'une série d'images. Cela permettait de limiter le biais qu'un déficit langagier pourrait entraîner. Dans cette étude, la consigne, les items d'entraînement et les matrices ont été présentés sur un écran d'ordinateur. L'épreuve comprenait 41 items, un critère de départ (âge) et un critère d'arrêt (quatre réponses fausses consécutives sur cinq). Un score sur quarante-et-un a été calculé et normalisé pour chaque sujet, ce dernier reflétait son niveau cognitif non-verbal.

.3.3. Empan visuo-spatial

L'épreuve d'empan visuo-spatial développée par Wilson, Scott, et Power (1987) mesure la capacité de la mémoire de travail à maintenir des informations visuo-spatiales. Dans cette étude, les matrices ont été informatisées pour contrôler le temps d'exposition du stimulus et reproduites par l'enfant sur un papier plastifié. Les matrices représentent des carrés dont le nombre total de carrés croît au fur et à mesure de la passation. Parmi ces carrés, la moitié a été aléatoirement noircie. La cible a été présentée à l'enfant pendant deux secondes avant de disparaître. L'enfant a dû ensuite se remémorer l'emplacement des carrés noirs pour les reproduire sur une planche de matrices vierges. Ce test permettait de mesurer un empan allant d'un minimum de deux à un maximum de quinze. Chaque niveau était évalué trois fois. Pour que la taille d'un empan soit valide l'enfant devait réussir les trois cibles d'un même niveau. Le dernier niveau réussi a été considéré comme un indicateur de l'empan visuo-spatial du participant.

.3.4. Empan auditivo-verbal

L'empan auditivo-verbal a été mesuré grâce à une épreuve de répétition de chiffres endroits issue du subtest de l'Echelle Clinique de la Mémoire pour Enfants (Cohen, 2001). Cette épreuve était destinée à mesurer la capacité auditive de la mémoire de travail. L'examineur a énoncé une série de chiffres allant de deux à neuf chiffres que l'enfant devait répéter. L'épreuve comprenait neuf niveaux. Chaque niveau était composé de deux items différents de longueur identique. Pour passer au niveau suivant, au moins un item sur deux devait être entièrement réussi. L'épreuve prenait fin lorsque le sujet obtenait deux échecs à des items de même longueur. L'empan auditivo-verbal de l'enfant correspond, dans cette étude, à la somme des items réussis.

.3.5. Gnosies digitales

Pour tester les gnosies digitales des sujets, une épreuve de touches successives issue de la batterie des gnosies de Zazzo et Galifret-Granjon (1966) a été proposée aux enfants. Au début du test, il était demandé à l'enfant de poser sa main droite à plat sur la table, paume contre table. Ensuite, on lui présentait une feuille sur laquelle était dessinée une main droite. L'examineur touchait un des doigts de la main droite de l'enfant, puis demandait à l'enfant de lui montrer sur le dessin le doigt correspondant à celui qui avait été touché. Pour la suite de l'épreuve, la main de l'enfant était cachée sous une boîte en carton. Au cours de l'épreuve, chacun des doigts de l'enfant a été touché successivement par l'examineur dans un ordre aléatoire. Chacune des mains a été testée individuellement, et pour augmenter la validité des réponses de l'enfant, chaque doigt a été testé deux fois. A la fin de l'épreuve, le score total obtenu était sur vingt.

.3.6. Comptage

L'épreuve de comptage issue de la batterie TEDI-MATH (Test Diagnostique des Compétences de Base en Mathématiques) élaborée par Van Nieuwenhoven, Grégoire, et Noël (2001) a permis de déterminer le niveau d'acquisition de la chaîne numérique. Différents aspects du comptage ont été évalués : le comptage le plus loin possible en partant de 1, le comptage avec une borne supérieure, le comptage avec une borne inférieure, le comptage avec une borne inférieure et supérieure à la fois, le comptage à rebours, le comptage par pas de deux puis par pas de dix. Dans cette étude, les épreuves de comptage ont été proposées aux enfants d'âge inférieur ou égal à dix ans et aux enfants de plus de dix ans qui avaient un score chuté à l'épreuve de calcul (décrite plus loin). Toute erreur de comptage entraîne une note nulle à l'épreuve. Pour chaque aspect du comptage, le score brut maximal était de deux points.

.3.7. Ecriture de nombres arabes sous-dictée

L'épreuve d'écriture de nombres arabes sous-dictée, issue de la batterie TEDI-MATH (Van Nieuwenhoven et al., 2001) a permis de définir les capacités de l'enfant à passer du code verbal oral au code arabe. Pour cette épreuve, il était demandé à l'enfant d'écrire sur une feuille vingt nombres dictés par l'examineur. Le score brut obtenu à cette épreuve était sur vingt points.

.3.8. Lecture à voix haute de nombres arabes

L'épreuve de lecture à voix haute de nombres arabes, issue de la batterie TEDI-MATH (Van Nieuwenhoven et al., 2001) a permis quant à elle de définir les capacités de l'enfant à passer du code arabe au code verbal oral. Dans cette étude, les nombres à lire ont été informatisés. Le score brut total à cette épreuve était sur vingt points.

.3.9. Calcul

Le Tempo Test Rekenen (De Vos, 1992) a été utilisé pour évaluer le niveau de calcul de l'enfant. Cette épreuve a permis d'apprécier les compétences numériques exactes des sujets. L'examineur présentait alternativement à l'enfant des feuilles sur lesquelles figuraient des calculs (addition, soustraction, multiplication, division). Pour cette étude, les calculs de multiplication et de division ont été proposés uniquement aux enfants d'âge supérieur ou égal à dix ans. L'examineur posait la feuille face contre table devant l'enfant et lui expliquait qu'une fois la feuille retournée, il devrait réaliser le plus d'opérations possible en une minute. Pour chaque type de calcul, quarante opérations de difficultés croissantes étaient proposées. Les opérations les plus simples évaluaient la mémorisation des faits arithmétiques (e.g., $1 + 1$) et les opérations les plus complexes évaluaient les procédures de calculs (e.g., $19 + 32$). On attribuait un point pour chaque réponse correcte. Le score obtenu était noté sur quarante pour chaque type d'opération.

.3.10. Estimation

Les capacités d'estimation des enfants ont été mesurées grâce à une épreuve réalisée sur ordinateur avec le logiciel E-prime (Schneider, Eschmann, & Zuccolotto, 2002) et inspirée de l'étude de Mejias, Mussolin, Rousselle, Grégoire, et Noël (2012). Cette épreuve permet d'apprécier les compétences numériques approximatives des enfants. Dans cette étude, les modalités d'entrée variaient (sets de points, nombres verbaux oraux ou NVO, nombres arabes ou NA), et la modalité de sortie restait toujours la même (sets de points). Quatre conditions ont été présentées à l'enfant : deux conditions non symboliques (sets de points de taille homogène et sets de points de taille hétérogène) et deux conditions symboliques (NVO, NA). L'enfant était amené à estimer (sans compter) des numérosités le plus rapidement possible en utilisant un potentiomètre (annexe 4 ; figure issue du mémoire de Lentz, 2017) qui lui permettait de faire apparaître des points de taille identique sur l'écran depuis un bouton rotatif.

Résultats

Les données présentées ci-après correspondent aux résultats obtenus par l'ensemble des sujets de cette étude afin d'étudier les différences pouvant exister entre les enfants IC et les enfants normo-entendants appariés en âge et en niveau langagier. Les analyses ont été effectuées à l'aide du site internet BiostaTGV (2011). Le seuil de significativité a été fixé à $p < .05$.

1. Les compétences non-numériques favorables au développement numérique

Les scores aux tâches d'empan visuo-spatial et auditivo-verbal, des gnosies digitales et du lexique en réception sont repris dans le tableau 2.

Un t de Student nous a permis de constater que les enfants IC avaient des performances identiques aux enfants AC à la tâche d'empan visuo-spatial ($t(26) = .71$; $p = .49$). Par ailleurs, l'empan visuo-spatial des enfants IC était significativement meilleur que celui des enfants NL ($t(23) = 3.31$; $p = .003$).

Les enfants IC ne se distinguaient pas des deux groupes contrôles à la tâche d'empan auditivo-verbal (IC vs AC : $t(23) = -1.81$; $p = .08$; IC vs NL : $t(23) = .94$; $p = .35$).

Compte tenu des résultats précédents, il nous a semblé intéressant de comparer les performances des tâches d'empan visuo-spatial et auditivo-verbal au sein de chaque groupe (IC, AC, NL).

Un t de Student apparié nous a permis de constater que les enfants implantés avaient les mêmes performances aux deux tâches ($t(14) = -1.56$; $p = .14$) tandis que les enfants normo-entendants avaient de meilleures performances à la tâche d'empan auditivo-verbal ($ps \leq .001$).

Pour les tâches de gnosies digitales, les enfants IC ne se distinguaient pas des enfants AC ($t(23) = -.72$; $p = .48$). Pour cette même tâche, un effet marginal a été observé, les enfants IC obtenant des habiletés en gnosies digitales légèrement supérieures à celles des enfants NL ($t(20) = 1.98$; $p = .06$).

Les compétences langagières en réception des enfants IC étaient significativement différentes des enfants AC et NL ($ps \leq .001$).

Tableau 2. Moyennes, écarts-types, minimums et maximums des scores aux empan visuo-spatial et auditivo-verbal et aux gnosies digitales.

	Mémoire		Gnosies digitales	EVIP (Score normalisé)
	Empan visuo-spatial	Empan auditivo-verbal		
	<i>M (ET)</i> [Min-Max]	<i>M (ET)</i> [Min-Max]	<i>M (ET)</i> [Min-Max]	<i>M (ET)</i> [Min-Max]
Enfants IC (<i>n</i> = 15)	5.46 (1.45) [4-9]	6.2 (1.65) [4-9]	18.86 (1.92) [13-20]	-1.45 (0.79) [-2.6-0]
Contrôle AC (<i>n</i> = 14)	5.07 (1.54) [3-7]	7.57 (2.34) [4-11]	19.28 (1.13) [16-20]	0.98 (0.63) [0.07-2.27]
Contrôle NL (<i>n</i> = 11)	3.81 (1.07) [2-6]	6.72 (1.19) [5-8]	17.27 (2.10) [14-20]	0.96 (0.96) [-0.8-0.77]

.2. Les compétences numériques approximatives

Dans cette partie nous avons analysé les scores d'erreurs (i.e., moyenne des écarts entre la réponse des sujets et la numérosité cible, en valeur absolue) des trois groupes (IC, AC, NL) dans les tâches d'estimation en condition non-symbolique puis symbolique.

.2.1. Estimation en conditions non-symboliques

Les moyennes des scores d'erreurs (SE) aux conditions non-symboliques sont reprises dans le tableau 3. Un t de Student nous a permis de constater que les enfants IC étaient significativement différents des enfants AC en conditions non-symboliques ($t(24) = 2.29$; $p = .03$). Les enfants IC avaient des scores d'erreurs supérieurs aux enfants AC (tableau 3). En revanche, les enfants IC ne se distinguaient pas des enfants NL dans cette condition ($t(19) = 1.79$; $p = .08$). Les scores d'erreurs des enfants IC étaient supérieurs à ceux des enfants NL dans la condition non-symbolique (tableau 3).

.2.2. Estimation en conditions symboliques

Les moyennes des scores d'erreurs aux conditions symboliques sont reprises dans le tableau 3. Au t de Student, les enfants IC ne se distinguaient ni des enfants AC ($t(17) = 1.78$; $p = 0.09$) ni des enfants NL ($t(15) = 1.28$; $p = .22$).

Un t de Student apparié a permis d'observer que les enfants IC avaient un niveau de précision identique aux tâches d'estimation symboliques et non-symboliques ($t(14) = -1.92$; $p = .08$) tandis que les groupes contrôles avaient un niveau de précision significativement meilleur dans la condition analogique comparativement à la condition symbolique (AC et NL : $ps \leq .002$).

Tableau 3. Moyennes, écarts-types, minimums et maximums des moyennes des scores d'erreur (SE) en conditions non-symboliques (collections de set de points de taille identique, collection de sets de points de taille différente) et en conditions symboliques (NVO, NA) pour les trois groupes (IC, AC, NL).

	Conditions non-symboliques M (ET) [Min-Max]	Conditions symboliques M (ET) [Min-Max]
Enfants IC (n = 15)	21.70 (15.87) [6.38-48.57]	39.06 (45.63) [5.7-189.29]
Contrôle AC (n = 14)	10.15 (11) [5.19-48.08]	16.78 (15.40) [6.14-67.93]
Contrôle NL (n = 11)	13.55 (6.53) [5.76-29.13]	23.42 (10.15) [8.68-37.24]

.3. Les compétences numériques exactes

Les moyennes des scores aux épreuves du système numérique exact sont reprises dans le tableau 4. Un *t* de Student sur les tâches numériques exactes (comptage ; transcodage : lecture à voix haute et écriture sous-dictée ; calcul : TTR) a été réalisé pour les trois groupes.

Un effet marginal entre les enfants IC et AC a été observé pour l'épreuve de comptage ; les enfants AC avaient tendance à être meilleurs que les enfants IC (IC vs AC : $t(19) = -2.01$; $p = .06$). Les enfants IC ne se distinguaient pas des enfants NL en comptage (IC vs NL : $t(21) = .24$; $p = .81$).

Les enfants IC ne se différençaient pas des enfants AC et NL en transcodage (IC vs AC : $t(22) = -0.13$; $p = .90$; IC vs NL : $t(12) = .96$; $p = .35$).

Enfin, les enfants IC ne se distinguaient pas des enfants AC pour le TTR (IC vs AC : $t(24) = -1.60$; $p = .12$) et on a noté un effet marginal entre les enfants IC et NL pour l'épreuve du TTR (IC vs NL : $t(18) = 2.04$; $p = .06$) ; les enfants IC avaient tendance à être meilleurs que les enfants NL, plus jeunes.

Tableau 4. Moyennes, écarts-types, minimums et maximums des trois groupes (IC, AC, NL) aux épreuves de compétences numériques exactes (comptage, transcodage, calcul).

	Comptage M (ET) [Min-Max]	Transcodage ¹ (%) M (ET) [Min-Max]	Calcul (TTR) M (ET) [Min-Max]
Enfants IC (n=15)	9.13 (3.37) [4-12]	97.83 (5.08) [80-100]	25.93 (9.95) [10-44]
Contrôle AC (n=14)	11.07 (1.54) [8-12]	98.03 (2.97) [90-100]	32.92 (13.26) [16-63]
Contrôle NL (n=11)	8.81 (3.31) [2-12]	94.02 (12.40) [58-100]	16.45 (12.84) [2-43]

¹ Le transcodage correspond à la moyenne rapportée sur cent des scores bruts en lecture et en écriture des nombres arabes.

.4. Analyse corrélacionnelle entre les compétences langagières et les compétences arithmétiques.

Les scores moyens aux tâches d'empan auditivo-verbal, de comptage et de calcul (TTR) sont repris dans les tableaux 2 et 4.

Un test de corrélation de Pearson a montré qu'il n'existait aucune relation significative entre l'empan auditivo-verbal et le TTR chez les enfants IC et les enfants NL, ($ps \geq .11$) tandis qu'un lien significatif fort existait entre ces deux variables chez les enfants AC ($r = .680$; $p = .008$; figure 1).

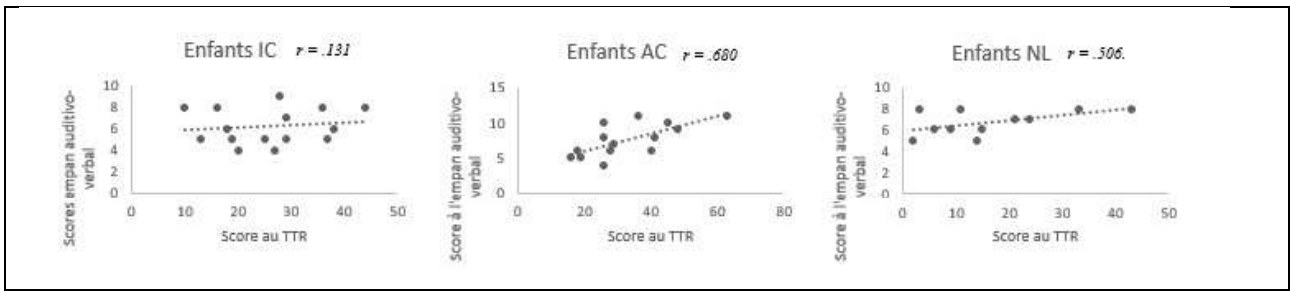


Figure 1. Corrélation entre les scores au comptage et les scores au TTR des trois groupes (IC, AC, NL).

Par ailleurs, au test de corrélation de Pearson, le score de comptage était significativement corrélé avec les capacités arithmétiques pour les trois groupes ($ps \leq .04$; figure 2). De plus, la relation entre les deux variables était forte ($r \geq .568$).

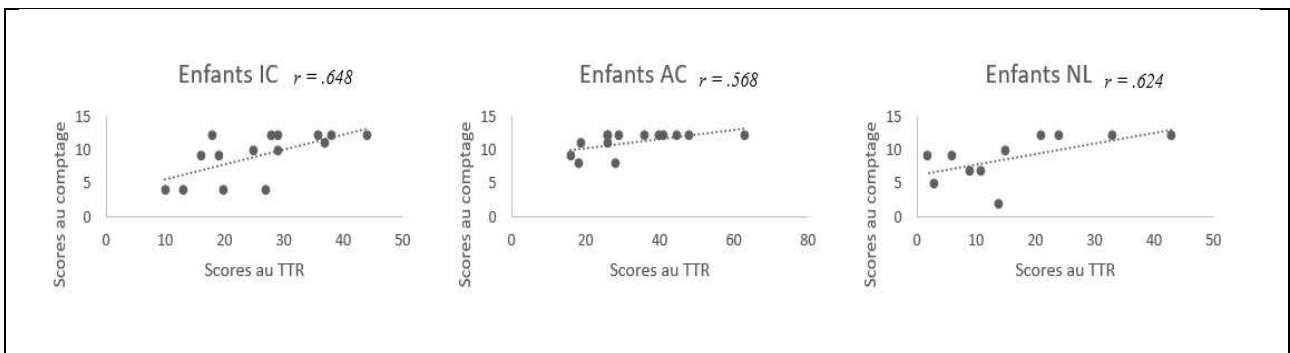


Figure 2. Corrélation entre les scores au comptage et les scores au TTR des trois groupes (IC, AC, NL).

Enfin, le test de corrélation de Pearson a montré qu'un lien significatif existait entre le niveau lexical en réception (EVIP) et les compétences arithmétiques (TTR) pour les deux groupes contrôles (AC et NL ; $ps \leq .007$). De plus, la relation entre ces deux variables était forte ($r \geq .758$). Pour le groupe d'enfants implantés cochléaires, aucune corrélation n'a été retrouvée entre les deux variables ($r = .843$; $p = 7.732$; figure 3).

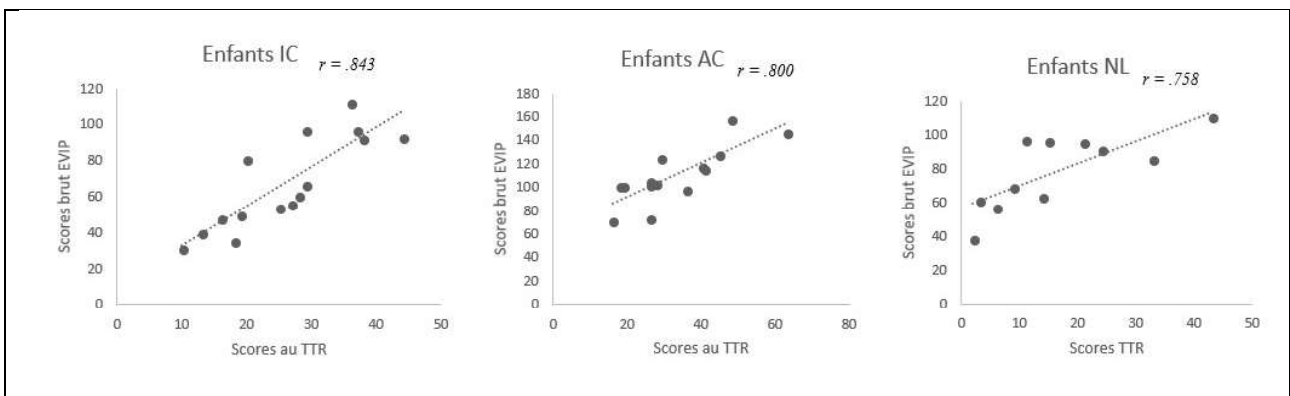


Figure 3. Corrélation entre les scores brut EVIP et les scores TTR pour les trois groupes (IC, AC, NL).

Discussion

Les objectifs principaux de cette étude étaient de comparer les compétences numériques des enfants implantés cochléaires (IC) à celles des enfants tout-venant afin de mieux appréhender le développement de leurs représentations numériques, et enrichir les données de la littérature pour que d'éventuels outils diagnostiques et thérapeutiques spécifiques à cette population puissent être élaborés, si nécessaire, en orthophonie. Ce mémoire répondant à quatre hypothèses, la discussion des résultats sera structurée en fonction de celles-ci.

La première hypothèse portait sur le développement non-numérique des enfants (IC). A peu de choses près, nos résultats corroborent avec les données de la littérature. En effet, contrairement aux résultats de l'étude de Burkholder et Pisoni (2003), les enfants IC de cette étude présentent un empan auditivo-verbal identique à celui des enfants normo-entendants de même niveau langagier mais surtout et avant tout, de même âge scolaire. Ces données nous informent qu'en moyenne, les enfants IC ont une mémoire verbale à court terme fonctionnelle. Cette population développerait des compétences non-numériques favorables à la rétention de la chaîne numérique et des faits arithmétiques.

Par ailleurs, en accord avec l'étude de Brisset et al. (2017), les enfants sourds disposent de gnosies digitales similaires aux enfants normo-entendants. L'absence de différence entre les groupes nous laisse supposer que la déficience auditive n'influe pas sur leurs représentations proprioceptives. Notons également que, les compétences mnésiques visuo-spatiales des enfants IC se sont révélées identiques voire supérieures à celles de leurs pairs normo-entendants. Les enfants IC semblent disposer de compétences non-numériques favorables au développement des compétences numériques. De plus, nos résultats montrent que les enfants IC performant autant aux habiletés mnésiques auditivo-verbales que visuo-spatiales tandis que les groupes contrôles (AC et NL) ont de meilleures performances à la tâche de mémoire auditivo-verbale. Partant de là, les résultats aux tâches de mémoire nous laissent supposer que les informations auditivo-verbales ne suffisent pas aux enfants IC pour percevoir l'entièreté des informations. Ainsi, pour pallier cette faiblesse, les enfants IC auraient besoin de compléter les informations auditivo-verbales par les informations visuo-spatiales.

Enfin, nos résultats montrent que les enfants sourds IC présentent un retard de langage en réception, avec des scores normalisés nettement inférieurs aux groupes contrôles (AC et NL) comme annoncé par Ouellet et al., (2001) et Young et Killen (2002). Ainsi, nous supposons que le retard de langage rencontré par les enfants IC pourrait occasionner un ralentissement du développement numérique exact, au niveau du système numérique verbal constitué de mots-nombres oraux ou écrits, au niveau du système arithmétique constitué d'un lexique mathématique particulier (e.g., la somme, le produit, le quotient etc.) et/ou au niveau de la compréhension des consignes mathématiques et de la résolution de problèmes. Nous développerons ce sujet un peu plus bas.

La deuxième hypothèse de cette étude portait sur la précision des représentations numériques approximatives chez les enfants IC par rapport aux enfants tout-venant de même âge chronologique (AC) et de même niveau linguistique (NL). Nous suggérons que les compétences numériques approximatives en condition analogique et non-symbolique – innée et sans impact du langage – seraient identiques entre les trois groupes (IC, AC, NL). A contrario, nous postulons que les compétences numériques approximatives en condition symbolique – dépendantes du langage – seraient moins précises entre les enfants IC et les enfants AC, et identiques entre les enfants IC et les

enfants NL. Nous comparerons, ci-après, les performances des enfants IC aux épreuves d'estimation à celles des deux groupes contrôles (AC et NL). Nous présenterons d'abord des résultats de la condition analogique (sets de points de taille homogène et de taille hétérogène) et de la condition symbolique (nombres verbaux oraux et nombres arabes) puis nous discuterons ces résultats.

Contrairement à ce qui était attendu, la précision de la magnitude des enfants IC à la tâche d'estimation en condition analogique est significativement altérée par rapport aux enfants de même âge. Ces résultats sont surprenants puisque cette tâche n'implique pas de facteur linguistique. De ce fait, cette différence pourrait provenir d'une faiblesse de la représentation de la magnitude. Pourtant, le niveau de précision des magnitudes entre les groupes IC et NL est identique. Outre la différence linguistique entre les groupes contrôles, c'est l'âge voire le manque d'expériences numériques qui diffèrent. Halberda et Feigenson (2008) rapportent que la précision du « sens du nombre » continue d'augmenter avec l'expérience et notamment l'enseignement formel des mathématiques. Ainsi, nous pourrions postuler que les enfants IC de cette étude présentent un « retard » ou un manque d'expériences quant à leur représentation de la magnitude du nombre.

Toutefois, lorsqu'on s'intéresse aux tâches d'estimation en condition symbolique, on s'aperçoit que la précision des réponses des enfants IC est équivalente à celles de leurs pairs entendants (AC et NL) alors que nous nous attendions à des résultats différents entre les enfants IC et les enfants AC en raison du retard linguistique. Bien que des résultats similaires soient retrouvés dans l'étude de Brisset et al. (2017), nous proposons une interprétation encore peu explorée de nos résultats. Nous postulons que tout individu recourt involontairement au recodage verbal des magnitudes avant d'estimer, à partir d'un matériel analogique, une quantité. Ce concept de recodage implique des compétences verbales. Ainsi, en prenant en compte le retard langagier des enfants IC, nous supposons que les capacités de recodage verbal des enfants implantés cochléaires manquent d'exactitude et viennent altérer la précision de leur estimation analogique. Ce postulat expliquerait pourquoi, une fois appariés en niveau linguistique, les enfants IC se comportent de la même manière aux tâches numériques approximatives analogiques et symboliques.

Par ailleurs, remarquons que les enfants IC ont un niveau de précision identique entre les deux conditions (analogique et symbolique). Ces résultats nous prouvent que le « sens du nombre » des enfants IC est fonctionnel et qu'il existe certainement un lien entre les compétences numériques approximatives symboliques et non-symboliques. Aussi, un renforcement des compétences approximatives symboliques pourrait probablement favoriser la précision des compétences numériques analogiques. En outre, des auteurs suggèrent que la scolarisation pourrait être un facteur d'amélioration de la précision de l'appréhension des magnitudes et grandeurs numériques (Nys et al., 2013 ; Piazza, Pica, Izard, Spelke, & Dehaene, 2013). Ainsi, permettre une scolarisation classique aux enfants IC pourrait être un facteur favorable au développement de leurs compétences numériques approximatives.

En résumé, les enfants IC développent des compétences numériques approximatives de la même façon qu'un enfant tout-venant, mais leur système numérique approximatif analogique est moins précis sûrement en lien avec leur retard de langage. Pour favoriser et renforcer l'association entre codes symboliques et magnitude, il peut être opportun, en séances de rééducation orthophonique, de proposer systématiquement les codes symboliques verbaux et arabes lors d'activité autour des magnitudes.

La troisième hypothèse de cette étude portait sur les performances des représentations numériques exactes des enfants implantés cochléaires (IC) par rapport aux deux groupes contrôles (AC et NL). Les compétences numériques exactes, se faisant à partir d'un matériel symbolique (code

arabe et code verbal), impliquent des aspects visuo-spatiaux et linguistiques. Puisque les enfants IC présentent généralement un retard de langage, retrouvé dans cette étude, nous supposons que les enfants IC auraient de moins bonnes performances numériques exactes comparativement aux enfants AC ou des performances identiques aux enfants tout-venant si nous considérons le niveau lexical.

Les résultats obtenus dans cette étude vont, en partie, à l'encontre de nos hypothèses. Contrairement à notre hypothèse initiale, le retard de langage ne semble pas occasionner un ralentissement du développement du système numérique exact chez les enfants IC. Les performances aux tâches de transcodage (lecture à voix haute et écriture sous dictée de nombres arabes) et de calcul sont apparues de même qualité chez les enfants IC que chez les enfants AC. Ces résultats corroborent avec ceux des études de Palma et al. (2010) et Brisset et al. (2017). Ceci laisse suggérer que les compétences numériques symboliques des enfants IC se développent pareillement aux enfants tout-venant. De plus, Brisset et al. (2017) ont montré que les enfants sourds intégrés en classe ordinaire développaient mieux leurs compétences numériques que les enfants scolarisés en école spécialisée. Compte tenu de ce qui précède, nous suggérons que l'intégration des enfants IC en classe ordinaire favoriserait l'élaboration des représentations numériques exactes de ces enfants. En effet, nous supposons que les enfants IC outrepasseraient leur faible niveau de langage pour parvenir à suivre le niveau de la classe.

Néanmoins, en ce qui concerne la tâche de comptage, nos résultats montrent que la chaîne numérique verbale des enfants IC est perfectible. D'après Content (2017), la méconnaissance de la chaîne numérique verbale pourrait résulter de difficultés verbales. Cette éventualité semble se confirmer puisque la faiblesse retrouvée à la tâche de comptage tend à disparaître lorsque les enfants IC sont comparés aux enfants NL. Par ailleurs, Content (2017) rapporte que des difficultés au niveau de la connaissance de la chaîne numérique pourraient retarder l'installation du calcul. Nos résultats vont à l'encontre de cette théorie puisque les enfants IC de cette étude ont obtenu des compétences arithmétiques similaires à leurs pairs normo-entendants.

Pour synthétiser, les enfants IC développent des compétences numériques exactes proches des enfants tout-venant. En effet, seule la maîtrise de chaîne numérique verbale nécessiterait d'être améliorée. Toutefois, la faiblesse de la chaîne numérique verbale ne semble pas impacter les autres domaines mathématiques testés au regard de notre étude. Un renforcement de la chaîne numérique verbale avec l'appui du code arabe pourrait être un axe de rééducation orthophonique. Cela permettrait favoriser la bonne mise en place du transcodage et des procédures arithmétiques.

La quatrième hypothèse consistait à analyser les éventuels liens entre les compétences arithmétiques et les compétences impliquant des capacités langagières (l'empan auditivo-verbal, la connaissance de la chaîne numérique verbale et le niveau linguistique).

Aucun lien n'a été retrouvé entre l'empan auditivo-verbal et les compétences arithmétiques chez les enfants IC et les enfants NL. En revanche, nos résultats montrent qu'un lien significatif existe entre ces deux variables chez les enfants AC. Ces résultats laissent suggérer, d'une part, que la mémoire verbale à court terme participe à l'élaboration des compétences arithmétiques chez l'enfant tout-venant, et d'autre part, que le niveau linguistique peut être un facteur favorisant l'utilisation de la mémoire verbale.

Par ailleurs, un lien significatif est retrouvé entre la connaissance de la chaîne numérique verbale et les capacités arithmétiques chez les trois groupes. Les variables étant positivement associées, cela signifie que plus la chaîne numérique est maîtrisée plus les capacités arithmétiques s'amélioreront.

Enfin, nous avons retrouvé une corrélation significative entre le niveau linguistique et les compétences arithmétiques chez les deux groupes contrôles (AC et NL) avec des variables positivement associées (EVIP et TTR). Ces résultats laissent supposer que l'enrichissement du stock lexical favorise les compétences arithmétiques. Paradoxalement, chez les enfants IC, aucun lien n'a été retrouvé entre le niveau linguistique et les compétences arithmétiques. Or, dans notre étude, nous avons vu que les enfants IC obtenaient des scores identiques à leurs pairs entendants de même âge. Nos données viennent contester l'hypothèse de Huber et al. (2014) quant à l'éventuel impact d'un déficit langagier sur les compétences arithmétiques des enfants IC. De ce fait, il pourrait être intéressant de découvrir quel(s) est(sont) les processus associé(s) au développement numérique, outre le niveau linguistique, qui leur permet(tent) d'obtenir de telles performances (e.g., imagerie mentale, mémoire visuelle à court terme et à long terme).

En somme, les compétences impliquant des capacités langagières (empan auditivo-verbal, comptage, stock lexical en réception) semblent contribuer au bon développement des compétences arithmétiques chez l'enfant tout-venant. Ainsi, lors de remédiations orthophoniques, si les compétences arithmétiques des enfants IC sont altérées il pourrait être intéressant de renforcer le lexique mathématique, le lexique général, la mémoire verbale à court terme et la maîtrise de la chaîne numérique. Toutefois, comme nous venons de l'étudier, ces liens entre compétences arithmétiques et compétences impliquant du langage ne se retrouvent pas toujours chez les enfants IC. Et pourtant, leurs compétences numériques sont apparues identiques aux enfants entendants de même âge. Considérant cela, il pourrait être intéressant de découvrir sur quels autres processus associés aux compétences arithmétiques s'appuient les enfants IC.

Pour conclure sur ces quatre hypothèses, les enfants IC ont un niveau de langage fragile susceptible de freiner le développement de leurs représentations numériques. Cette fragilité langagière empêchant la bonne association entre les codes pourrait expliquer le manque de précision retrouvé au niveau du système numérique approximatif. Les compétences numériques exactes des enfants IC se rapprochant fortement de celles de leurs pairs entendants, nous supposons que le contexte scolaire les aiderait à compenser leur faible niveau de langage. Enfin, nous avons vu que les compétences impliquant des capacités langagières sont liées aux compétences arithmétiques mais que ces relations ne s'observent pas toujours chez les enfants IC. Nous avons alors supposé que les enfants IC recourraient certainement à d'autres habiletés associées qu'il pourrait être intéressant de rechercher (e.g., imagerie mentale, mémoire visuelle à court terme et à long terme). Finalement, nos données ne révèlent pas de développement atypique des compétences numériques chez les enfants IC mais plutôt un retard.

Maintenant que l'analyse des résultats a apporté des éléments de réponses à nos hypothèses, nous allons soulever les limites méthodologiques de la présente étude et proposer des pistes d'amélioration pour de futures recherches. La constitution des échantillons est un des premiers biais de cette étude. Tout d'abord la taille des échantillons est réduite et les échantillons sont inégalement répartis entre eux, bien que cela ne soit pas répréhensible, il aurait été préférable de recruter un enfant contrôle par enfant IC dans chaque groupe (AC et NL). La procédure d'échantillonnage a été réalisée auprès de sujets volontaires ce qui peut remettre en question la généralisation des résultats. Par conséquent, nos échantillons risquent de ne pas être suffisamment représentatifs des populations étudiées. Qui plus est, les enfants de cette étude sont tous francophones mais sont, soit de nationalité française, soit de nationalité belge. Partant de ce fait, les programmes scolaires et les méthodes d'apprentissages peuvent différer d'un pays à l'autre et avoir un impact sur

le développement des représentations numériques. Toutefois, bien que la validité externe ne permette pas de généraliser les données obtenues à la population cible (enfants implantés cochléaires), nos données restent pour le moins intéressantes. Par ailleurs, les groupes d'enfants implantés cochléaires (IC) et d'enfants appariés en âge devaient initialement fréquenter la même classe afin que leur niveau scolaire soit le plus comparable possible. Cependant, pris de court, cela n'a pu se faire. Dans cette étude, un seul des enfants IC a été comparé à un enfant entendant de même âge fréquentant la même classe. Enfin, l'échantillon comprend des enfants scolarisés soit partiellement soit totalement en classe ordinaire. Initialement, nous voulions comparer l'effet du type de scolarisation (intégration totale vs intégration partielle) sur le développement des représentations numériques des enfants IC mais le nombre de participants étant trop inégalement partagé dans le groupe expérimental, ce projet n'a pu aboutir.

L'administration des épreuves est un autre biais de cette étude. Ce mémoire faisant l'objet d'un travail interuniversitaire, les épreuves n'ont pas toutes été administrées par le même expérimentateur pour chacun des enfants de notre étude. Par conséquent, il est impossible de s'assurer du bon respect du protocole, des conditions de passation, du nombre de rencontres par sujets et de l'attention des sujets au cours des épreuves. Lors d'une prochaine étude, il serait préférable de recruter soi-même l'ensemble des participants de chaque groupe pour un meilleur contrôle de ces critères. En revanche, cela a permis d'éviter le biais de l'expérimentateur unique qui aurait pu déformer involontairement la passation des tâches au fil du temps.

Le choix des épreuves représente le dernier biais de cette étude. Premièrement, pour que l'ensemble des sujets franco-belges puissent être comparable au niveau lexical, nous avons utilisé le test de l'EVIP. Or ce test, malgré sa bonne validation interne, est une adaptation franco-canadienne comprenant un vocabulaire désuet et donc peu représentatif du niveau lexical des participants. De plus, il aurait pu être intéressant de compléter ce test par une évaluation des capacités de compréhension morphosyntaxique, reconnu comme déviant chez les enfants IC (Szagun, 2000). Cela aurait permis de mieux définir les compétences langagières de ces enfants et perfectionner l'appariement du niveau de langage entre les groupes. Ensuite, nous avons mesuré l'empan auditivo-verbal des enfants à partir d'un matériel numérique (répétition de chiffres). Or, pour évaluer la mémoire verbale à court terme, il aurait été judicieux de proposer un matériel linguistique spécifique tel que la répétition de mots ou de non-mots. En effet, d'éventuelles difficultés numériques chez les enfants IC auraient pu diminuer la fiabilité de l'épreuve. Par ailleurs, on relève deux biais à l'épreuve de comptage du TEDI-Maths. Premièrement, cette épreuve présente un effet plafond pour certaines tranches d'âge de notre population (collégien). Ensuite, une mauvaise compréhension des consignes ne permet pas d'évaluer spécifiquement les habiletés de comptage. En effet, concernant les enfants de primaire, il nous a semblé difficile de savoir si c'était les habiletés de comptage en soi qui étaient insuffisantes ou si c'était la consigne qui n'était pas comprise en raison d'une méconnaissance du vocabulaire mathématique (ex : compte à partir de, compte de X à X, etc.). Lors d'une prochaine étude, il pourrait être intéressant, en cas d'échec aux subtests de comptage, de proposer des nouveaux essais en fournissant un modèle de ce qui est attendu. Enfin, concernant l'épreuve d'estimation symbolique (nombres verbaux oraux), les participants ne percevaient pas toujours le stimulus, soit par manque de concentration, soit par gêne du rapport signal/bruit présent dans la vidéo. Il pourrait être pertinent pour les prochaines passations, d'enregistrer de nouveau les vidéos en contrôlant le rapport signal/bruit ou bien de permettre une répétition du stimulus si ce dernier a mal été perçu.

Conclusion

Ce mémoire avait pour objectif d'offrir un aperçu du développement des représentations numériques des enfants implantés cochléaires. Pour cela, les performances mathématiques des enfants implantés cochléaires ont été comparées à celles d'enfants normo-entendants à travers diverses tâches (numériques et non-numériques). Nos résultats ont montré que les enfants implantés cochléaires présentaient des compétences numériques approximatives moins précises que les enfants normo-entendants de même âge. Ce manque de précision a été attribué à une faiblesse du recodage verbal, lui-même fragilisé par le retard langagier retrouvé chez ces enfants. De plus, nos résultats ont laissé voir des compétences numériques exactes quasi-identiques à celles des enfants normo-entendants. En effet, seule la maîtrise de la chaîne numérique verbale est apparue différente de leurs pairs entendants, sans pour autant impacter les autres domaines mathématiques testés. Enfin, nos résultats ont confirmé l'existence d'un lien entre les compétences linguistiques et les compétences arithmétiques. En fin de compte, on observe plutôt un retard qu'une atypie du développement des représentations numériques chez les enfants implantés cochléaires.

Il n'existe pas suffisamment d'études à ce jour pour définir complètement les compétences numériques des enfants implantés cochléaires, néanmoins, s'il apparaît que leurs compétences numériques suivent une même courbe développementale que les enfants normo-entendants, il pourrait être intéressant de développer des outils diagnostiques qui soient spécifiques à leur retard. Une fois normalisés, de tels outils nous permettraient de savoir si les difficultés numériques rencontrées par les enfants implantés cochléaires sont directement attribuables au déficit sensoriel ou si elles sont imputables à un trouble de la cognition numérique. Ainsi, nous pourrions justifier la nécessité d'une prise en soin de la cognition numérique de ces enfants.

Bibliographie

- Adline, M. (2018). *La représentation du nombre chez l'enfant sourd* (Mémoire d'Orthophonie). Université de Lille, Lille.
- Arfé, B., Lucangeli, D., Genovese, E., Monzani, D., Gubernale, M., Trevisi, P., & Santarelli, R. (2011). Analogic and Symbolic Comparison of Numerosity in Preschool Children with Cochlear Implants. *Deafness & Education International*, 13(1), 34-45. doi : 10.1179/1557069X11Y.0000000002
- BiostaTGV. (2011). *Tableau des tests statistiques d'hypothèse*. Retrieved from Institut Pierre Louis d'Epidémiologie et de la Santé Publique UMR S WEB site : <https://marne.u707.jussieu.fr/biostatgv/?module=tests>
- Bourlès, F., Laussel, E., & Mejias, S. (2016). *La représentation du nombre chez les enfants dysphasiques*. (Mémoire d'Orthophonie). Université de Lille, Lille.
- Brisset, M., Mussolin, C., & Leybaert, J. (2017). Traitements numériques, capacités visuo-spatiales et gnosies digitales chez les enfants sourds et entendants : impact du type d'instruction. *Rééducation orthophonique*, (270), 51-81.
- Burkholder, R. A., & Pisoni, D. B. (2003). Speech timing and working memory in profoundly deaf children after cochlear implantation. *Journal of experimental child psychology*, 85(1), 63-88.
- Cohen, M. J. (2001). *CMS Echelle de mémoire pour enfants*. ECPA.
- Content, A. (2017). L'acquisition du nombre - perspectives actuelles. *Rééducation orthophonique*, (269), 125-143.
- Cornu, V., Schiltz, C., Martin, R., & Hornung, C. (2018). Visuo-spatial abilities are key for young children's verbal number skills. *Journal of Experimental Child Psychology*, 166, 604-620. doi :10.1016/j.jecp.2017.09.006
- Costa, A. J., Silva, J. B. L., Chagas, P. P., Krinzinger, H., Lonneman, J., Willmes, K., ... Haase, V. G. (2011). A hand full of numbers: a role for offloading in arithmetics learning? *Frontiers in Psychology*, 2. doi : 10.3389/fpsyg.2011.00368
- De Vos, T. (1992). *Tempo Test Rekenen (TTR)*. Nijmegen : Berkhout.
- Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44(1-2), 1-42.
- Dehaene, S. & Cohen, L. (1995). Towards an anatomical and functional model of number processing. *Mathematical Cognition*, 1, 83-120.
- Donlan, C., Cowan, R., Newton, E. J., & Lloyd, D. (2007). The role of language in mathematical development: evidence from children with specific language impairments. *Cognition*, 103(1), 23-33. doi : 10.1016/j.cognition.2006.02.007
- Dunn, L. M., Theriault-Whalen, C. M., & Dunn, L. M. (1993). *Echelle de Vocabulaire en Images Peabody : EVIP* (PsyScan). Toronto.
- Dworzak, P. (2017). Troubles de la cognition arithmétique et prématurité. *Rééducation orthophonique*, (270), 99-128.
- Fagan, M. K., & Pisoni, D. B. (2010). Hearing experience and receptive vocabulary development in deaf children with cochlear implants. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 15(2), 149-161. doi : 10.1093/deafed/enq001
- Fayol, M. (2012). *L'acquisition du nombre*. Presses Universitaires de France.
- Feigenson, L., Dehaene, S., & Spelke, E. (2004). Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(7), 307-314. doi : 10.1016/j.tics.2004.05.002

- Geers, A. E., Moog, J. S., Biedenstein, J., Brenner, C., & Hayes, H. (2009). Spoken language scores of children using cochlear implants compared to hearing age-mates at school entry. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 14(3), 371-385. doi : 10.1093/deafed/enn046
- Genovese, E., Galizia, R., Gubernale, M., Arslan, E., & Lucangeli, D. (2005). Mathematical vs. reading and writing disabilities in deaf children: a pilot study on the development of numerical knowledge, in Thomas E. Scruggs, Margo A. Mastropieri (ed.) *Cognition and Learning in Diverse Settings*, 18, 33 – 46.
- Gérardy, A. (2016). *La représentation du nombre chez l'enfant porteur de trouble spécifique du langage : étude comportementale* (Mémoire). Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve.
- Halberda, J., & Feigenson, L. (2008). Developmental change in the acuity of the « number sense »: The approximate number system in 3-, 4-, 5-, and 6-year-olds and adults. *Developmental Psychology*, 44(5), 1457-1465. doi : 10.1037/a0012682
- Huber, M., Kipman, U., & Pletzer, B. (2014). Reading instead of reasoning? Predictors of arithmetic skills in children with cochlear implants. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 78(7), 1147-1152. doi : 10.1016/j.ijporl.2014.04.038
- Izard, V., Sann, C., Spelke, E. S., & Streri, A. (2009). Newborn infants perceive abstract numbers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(25), 10382-10385. doi : 10.1073/pnas.0812142106
- Johnson, C., & Goswami, U. (2010). Phonological awareness, vocabulary, and reading in deaf children with cochlear implants. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research: JSLHR*, 53(2), 237-261. doi : 10.1044/1092-4388(2009/08-0139)
- Kleemans, T., Segers, E., & Verhoeven, L. (2018). Role of linguistic skills in fifth-grade mathematics. *Journal of Experimental Child Psychology*, 167, 404-413. doi :10.1016/j.jecp.2017.11.012
- Legoff, A. (2016). *Représentations numériques chez l'enfant déficient auditif* (Mémoire). Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve.
- Lentz, V. (2017). *La représentation du nombre chez l'enfant sourd* (Mémoire). Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve.
- Lipton, J. S., & Spelke, E. S. (2003). Origins of number sense. Large-number discrimination in human infants. *Psychological Science*, 14(5), 396-401. doi : 10.1111/1467-9280.01453
- Mandler, G., & Shebo, B. J. (1982). Subitizing: an analysis of its component processes. *Journal of Experimental Psychology. General*, 111(1), 1-22.
- Mejias, S., Mussolin, C., Rousselle, L., Grégoire, J., & Noël, M.-P. (2012). Numerical and nonnumerical estimation in children with and without mathematical learning disabilities. *Child Neuropsychology: A Journal on Normal and Abnormal Development in Childhood and Adolescence*, 18(6), 550-575. doi : 10.1080/09297049.2011.625355
- Niparko, J. K., Tobey, E. A., Thal, D. J., Eisenberg, L. S., Wang, N.-Y., Quittner, A. L., ... CDaCI Investigative Team. (2010). Spoken language development in children following cochlear implantation. *JAMA*, 303(15), 1498-1506. doi : 10.1001/jama.2010.451
- Noël, M.-P. (2005). Finger gnosia: a predictor of numerical abilities in children? *Child Neuropsychology: A Journal on Normal and Abnormal Development in Childhood and Adolescence*, 11(5), 413-430. doi : 10.1080/09297040590951550
- Nys, J., Ventura, P., Fernandes, T., Querido, L., Leybaert, J., & Content, A. (2013). Does math education modify the approximate number system? A comparison of schooled and unschooled adults. *Trends in Neuroscience and Education*, 2(1), 13-22. doi : 10.1016/j.tine.2013.01.001

- Ouellet, C., Le Normand, M. T., & Cohen, H. (2001). Language evolution in children with cochlear implants. *Brain and Cognition*, *46*(1-2), 231-235.
- Palma, S., Gubernale, M., Guarnaccia, M. C., & Genovese, E. (2010). Numerical intelligence, verbal competence and intelligence in preschool children with cochlear implants: our findings in a clinical sample. *Cochlear Implants International*, *11 Suppl 1*, 355-359. doi : 10.1179/146701010X12671177989877
- Piazza, M., Pica, P., Izard, V., Spelke, E. S., & Dehaene, S. (2013). Education enhances the acuity of the nonverbal approximate number system. *Psychological Science*, *24*(6), 1037-1043. doi : 10.1177/0956797612464057
- Reuhkala, M. (2001). Mathematical Skills in Ninth-graders: Relationship with visuo-spatial abilities and working memory. *Educational Psychology*, *21*(4), 387-399. doi : 10.1080/01443410120090786
- Rinaldi, P., Baruffaldi, F., Burdo, S., & Caselli, M. C. (2013). Linguistic and pragmatic skills in toddlers with cochlear implant. *International Journal of Language & Communication Disorders*, *48*(6), 715-725. doi : 10.1111/1460-6984.12046
- Rodríguez-Santos, J. M., Calleja, M., García-Orza, J., Iza, M., & Damas, J. (2014). Quantity processing in deaf and hard of hearing children: evidence from symbolic and nonsymbolic comparison tasks. *American Annals of the Deaf*, *159*(1), 34-44.
- Roux, M.-O. (2014). Surdit  et difficultés d'apprentissage en mathématiques, état des lieux et probl matiques actuelles. *Bulletin de psychologie*, *Num ro 532*(4), 295-307.
- Schneider, W., Eschmann, A., & Zuccolotto, A. (2002). E-prime (Version 2.0). Pittsburgh, PA: Psychology Software Tools, Inc.
- Szagan, G. (2000). The acquisition of grammatical and lexical structures in children with cochlear implants: a developmental psycholinguistic approach. *Audiology & Neuro-Otology*, *5*(1), 39-47. doi : 10.1159/000013864
- Thibaudat, M. (2018). Les compétences numériques chez les enfants et adolescents sourds scolarisés en intégration (Mémoire d'Orthophonie). Université de Lille, Lille.
- Van de Weijer-Bergsma, E., Kroesbergen, E. H., & Van Luit, J. E. H. (2015). Verbal and visual-spatial working memory and mathematical ability in different domains throughout primary school. *Memory & Cognition*, *43*(3), 367-378. doi : 10.3758/s13421-014-0480-4
- Van Nieuwenhoven, C., Grégoire, J., & No l, M.-P. (2001). *TEDI-MATHS Test diagnostique des compétences de base en mathématiques* (ECPA).
- Wechsler, D. (2003). *Wechsler intelligence scale for children (4e Ed.)* (ECPA).
- Wilson, J. T. L., Scott, J. H., & Power, K. G. (1987). Developmental differences in the span of visual memory for pattern. *British Journal of Developmental Psychology*, *5*(3), 249-255. doi : 10.1111/j.2044-835X.1987.tb01060.x
- Wood, J. N., & Spelke, E. S. (2005). Infants' enumeration of actions: numerical discrimination and its signature limits. *Developmental Science*, *8*(2), 173-181. doi : 10.1111/j.1467-7687.2005.00404.x
- Xu, F., & Arriaga, R. I. (2007). Number discrimination in 10-month-old infants. *British Journal of Developmental Psychology*, *25*(1), 103-108. doi : 10.1348/026151005X90704
- Xu, F., Spelke, E. S., & Goddard, S. (2005). Number sense in human infants. *Developmental Science*, *8*(1), 88-101. doi : 10.1111/j.1467-7687.2005.00395.x

- Young, G. A., & Killen, D. H. (2002). Receptive and expressive language skills of children with five years of experience using a cochlear implant. *The Annals of Otology, Rhinology, and Laryngology*, 111(9), 802-810. doi : 10.1177/000348940211100908
- Zazzo, R., & Galifret-Granjon, N. (1966). *Genèse et formules de la latéralité : Batterie Piaget-Head : Tests des gnosies digitales*. Delachaux & Niestlé.
- Zhang, X., Koponen, T., Räsänen, P., Aunola, K., Lerkkanen, M.-K., & Nurmi, J.-E. (2014). Linguistic and spatial skills predict early arithmetic development via counting sequence knowledge. *Child Development*, 85(3), 1091-1107. doi :10.1111/cdev.12173

Liste des annexes

Annexe n°1 : Lettre explicative adressée aux structures et aux orthophonistes en libéral

Annexe n°2 : Lettre explicative adressée aux familles et accord parentaux

Annexe n°3 : Trame du protocole individuel pour l'administrateur

Annexe n°4 : Représentation du potentiomètre