

MEMOIRE

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

Flora BOURLES
Elise LAUSSEL

soutenu publiquement en juin 2016 :

La représentation du nombre chez les enfants dysphasiques

MEMOIRE dirigé par :
Madame Sandrine MEJIAS, Neuropsychologue (MCU-Lille2)

Lille – 2016

PAGE	CE QUI EST ÉCRIT	CE QUI DEVRAIT ÊTRE ÉCRIT
7	de l'éducation et de la transmission culturelle.(Feigenson, Dehaene, & Spelke, 2004)	de l'éducation et de la transmission culturelle (Feigenson, Dehaene, & Spelke, 2004).
8	quinzième mois de vie . (Camos, 2011.)	quinzième mois de vie (Camos, 2011).
8	le subitizing permet de représenter des objets avec limite stricte de quantité	le subitizing permet de représenter des objets avec une limite stricte de quantité
9	De plus, si dans certaines sociétés le lexique numérique est partagé avec le lexique corporel.	De plus, dans certaines sociétés le lexique numérique est partagé avec le lexique corporel.
16	Figure n°3: substrats neuronaux d'après (Dehaene, Piazza, Pinel, & Cohen, 2003)	Figure n°3: substrats neuronaux (Dehaene, Piazza, Pinel, & Cohen, 2003)
21	Le critère diagnostic le plus communément	Le critère diagnostique le plus communément
27	des compétences en comparaison de nombre arabes	des compétences en comparaison de nombres arabes
32	recupération de faits arithmétique	recupération de faits arithmétiques
37	Dans le tableau, il est écrit, pour le participant de la ligne 4: 14,10	14;10
39	Dans le tableau, il est écrit pour le participant 10037: 27,9	27;9
43	(Kinsbourne, Warrington 1978 cité par Fayol 2013).	(Kinsbourne & Warrington, 1978; cités par Fayol, 2013).
46	un entrainement de quatre cibles différentes est proposées	un entrainement de quatre cibles différentes est proposé
47	les performances des DYS à cette épreuves seront	les performances des DYS à cette épreuve seront
80	Si Nys et collaborateurs (2013), émettent l'hypothèse d'un manque	Si Nys et collaborateurs (2013) émettent l'hypothèse d'un manque
89	Il manque un point à la fin de la référence de Benton et al. (1951)	Benton (...) 756-766.
90	Idem pour la référence de Camos et al. (1998)	Camos (...) ANAE.
96	fi findings from a systematic review of the literature	findings from a systematic review of the literature
97	Idem pour la référence de Mejias et al. (2012)	Mejias (...) 550-575.
97	Idem pour la référence de Mussolin et al. (2014)	Mussolin (...) Review.
97	Idem pour la référence de Olswang et al. (1998)	Olswang (...) 23-32.
99	Idem pour la référence de Rousselle et al. (2004)	Rousselle (...) 57-84.
100	Idem pour la référence de Vanderwaele C. (2008)	Vanderwaele (...) Bruxelles.

« Les plus beaux rêves se réalisent toujours »
Bada, à l'ombre d'un arbre à palabre, Sénégal

Remerciements

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce à plusieurs personnes à qui nous voudrions témoigner notre reconnaissance.

Nous tenons à remercier tout particulièrement Sandrine Méjias, Directrice de mémoire, pour ses précieux conseils et pour nous avoir accompagnées dans ce travail avec conviction, enthousiasme et bienveillance.

Nos remerciements s'adressent aussi à l'ensemble de nos pré-lecteurs attentifs pour leurs remarques judicieuses.

Nous souhaitons également remercier très chaleureusement l'ensemble des enfants qui ont bien voulu prêter de leur temps pour participer avec bonne humeur à notre étude. Aussi, nous remercions les parents de ces enfants pour l'intérêt sincère porté à notre travail et pour leur disponibilité.

Des remerciements particuliers à Christelle Dufour, enseignante, qui nous a accueillies avec gentillesse dans sa classe. Un merci appuyé également à l'association Avenir Dysphasie et Rebondys 56 pour avoir partagé nos mails avec le plus grand nombre.

Enfin, nous tenons à remercier les professionnels qui nous reçoivent en stage et nous offrent la possibilité d'expérimenter le métier d'orthophoniste et d'en découvrir des facettes insoupçonnées.

Personnellement, un grand merci à nos familles d'avoir toujours cru en nous, de nous donner la force d'essayer, d'explorer et d'avancer. Merci aussi à nos amis lillois, toulousains, ariégeois, aveyronnais, nantais, parisiens et bien plus loin, vous êtes des étoiles qui subliment nos jours joyeux et illuminent nos jours tristes. Merci à toutes les pépites rencontrées sur le chemin de la vie.

Merci à ma coéquipière et amie, Elise, pour ces quatre années d'émotions intenses partagées souvent autour d'un (plusieurs) cafés/thés. « Je t'ai adorée, tu me l'as rendu en centuple ». Merci!

Merci Flora pour ces exaltantes divagations, sur une île bretonne, dans un canapé, sur le pas de la porte ou sous un parapluie au coin d'une rue pavée.

Résumé :

Cette étude s'intéresse aux compétences numériques exactes et approximatives des sujets dysphasiques. Les compétences numériques approximatives, innées, devraient être préservées alors que les compétences exactes, dépendantes de l'apprentissage du langage devraient être altérées. En outre, nous évaluerons les facteurs qui améliorent l'acuité numérique et les corrélations entre langage et précision du système numérique approximatif (SNA).

Nous avons constitué trois groupes : 18 sujets dysphasiques (DYS) et 36 sujets contrôles appariés en âge (AC) et en niveau linguistique (ML) ont été soumis à un protocole d'évaluation des compétences numériques.

Les résultats suggèrent que l'organisation structurelle des représentations numériques des sujets DYS est identique à celle des sujets contrôles. La précision du SNA est moindre chez les sujets DYS, avec un effet de la condition : les recodages symboliques amoindrissent l'acuité des estimations. Les représentations numériques approximatives sont corrélées aux compétences numériques exactes et au niveau de langage.

Mots-clés : cognition, dysphasie, compétences numériques, recherche, enfant, adolescent

Abstract :

The objective of this study was to analyze exact and approximate number skills in children with SLI. Approximate's would be preserved whereas exact number system would be impaired. Furthermore, the purpose was researching factors which increase number acuity, and particular links between language skills and ANS.

We constitute three groups of 18 subjects. First was SLI one, two others where controls one's matched in age (AC) or lexical level (ML). We submit them to a testing.

Our results shows that ANS acuity in children with SLI is lower although they organize their representation on a mental number line as subjects control.

Moreover, there is correlations between ANS acuity and exact number skills as with langage. So we conclude that langage increase approximate representations.

Keywords : cognition, specific langage impairment (SLI), mathematical developpement, research, children, teenager

Table des matières

Introduction	1
Contexte théorique, buts et hypothèses	4
1. Développement de la cognition numérique	5
1.1. Le modèle du triple code de Dehaene (1992)	5
1.2. Les processus de quantification innés	6
1.2.1. Le système numérique approximatif	7
1.3. Les processus de quantification acquis	9
1.3.1. Les doigts, outils analogiques pré-symboliques	9
1.3.2. Le code verbal oral	10
1.3.3. Le code arabe	13
1.4. La ligne numérique mentale	14
1.4.1. Evolution de la ligne numérique mentale	14
1.4.2. Relations entre ligne numérique mentale et codes	15
1.5. Corrélats neuronaux	15
1.5.1. Rôle fonctionnel du lobe pariétal	15
1.5.2. Rôle fonctionnel du cortex préfrontal	17
1.5.3. Latéralisation des fonctions numériques	17
2. Les dysphasies	18
2.1. Terminologie	18
2.1.1. La conception francophone : dysphasie versus retard simple du langage	18
2.1.2. Evolution actuelle vers la conception anglophone de trouble spécifique du langage oral	20
2.2. Caractéristiques générales de la dysphasie	21
2.2.1. La question du diagnostic de la dysphasie	21
2.2.2. Les marqueurs de la dysphasie	22
3. État des recherches sur la cognition numérique des enfants avec trouble spécifique du langage	23
3.1. Le système numérique approximatif des enfants SLI	23
3.1.1. Estimations de numérosités	23
3.1.2. Arithmétique approximative	24
3.2. Les processus de quantification acquis et les compétences numériques exactes des enfants SLI	24
3.2.1. Les codes symboliques	25
3.2.2. La résolution de faits arithmétiques	27
3.2.3. La ligne numérique mentale	29
3.3. Implication de divers facteurs cognitifs dans les activités numériques des enfants SLI	29
3.3.1. La mémoire de travail	29
3.3.2. Les habiletés linguistiques	30
3.3.3. Répercussions en cascade	32
4. Intérêt de l'étude et rappel des hypothèses	33
Sujets, matériel et méthode	34
1. Présentation des sujets	36
1.1. Le groupe d'enfants dysphasiques	36
1.1.1. Les critères d'inclusion et d'exclusion	36
1.1.2. Présentation des sujets dysphasiques de l'étude	37
1.2. Les groupes contrôles	38
1.2.1. Les critères d'exclusion et d'inclusion	38
1.2.2. Présentation des groupes contrôles	38

2.Procédure et Matériel.....	39
2.1.Procédure de passation.....	39
2.2. Matériel	39
2.2.1.La batterie de pré-testing	40
2.2.1.1.Compréhension lexicale.....	40
2.2.1.2.Aptitudes intellectuelles non verbales.....	40
2.2.1.3.Empan de pattern visuel.....	41
2.2.1.4.Mémoire auditivo-verbale.....	41
2.2.2.La batterie des compétences numériques	42
2.2.2.1.Évaluation des compétences numériques transversales	42
2.2.2.2.Évaluation des compétences numériques exactes.....	43
2.2.2.3.Compétences numériques approximatives	45
Résultats.....	48
1.Appariement	49
2.Compétences approximatives	50
2.1.Effets mesurés.....	50
2.1.1.Effet de numérosité.....	50
2.1.2.Effet de condition.....	50
2.1.3.Effet de groupe.....	51
2.1.4.Conclusion intermédiaire.....	51
2.2.Les groupes face aux épreuves d'estimation.....	51
2.2.1.Les conditions avec entrées symboliques.....	52
2.2.1.1.La condition NVO.....	52
2.2.1.2.La condition NA.....	53
2.2.2.Les conditions avec entrée non-symbolique	54
2.2.2.1.La condition He.....	54
2.2.2.2.La condition Ho.....	55
2.2.3.Conclusion intermédiaire.....	55
2.2.4.Corrélation entre les conditions	55
2.3.Analyse de la précision du système numérique approximatif (N=54).....	56
2.3.1.Hypothèse de l'existence d'un lien entre la précision du SNA et l'âge	56
2.3.2.Hypothèse de l'existence d'un lien entre la précision du SNA et les performances aux épreuves numériques	57
2.3.3.Hypothèse d'un lien entre la précision du SNA et les épreuves d'empans	57
2.3.4.Hypothèse d'un lien entre la précision du SNA et le langage.....	58
2.3.5.Conclusion pour la précision du SNA.....	58
3.Résultats aux épreuves de pré-testing.....	58
3.1.Langage	59
3.2.Aptitudes intellectuelles non verbales.....	59
3.3.Résultat à l'empan visuo-spatial.....	59
3.4.Résultat à l'empan auditivo-verbal.....	60
3.5.Conclusions pour les épreuves de pré-test.....	60
4.Les épreuves de compétences numériques.....	61
4.1.Capacité pré-symbolique, gnosies digitales.....	61
4.2.Comptage.....	62
4.3.Compréhension du système numérique, transcodages.....	62
4.3.1.Lecture à voix haute.....	62
4.3.2.Ecriture sous dictée.....	62
4.3.3.Transcodages.....	62
4.4.Calcul	63
4.4.1.Additions du Tempo-Test Rekenen.....	63

4.4.2.Soustractions du Tempo-Test Rekenen.....	63
4.5.Conclusions pour les épreuves de compétences numériques.....	64
5.Corrélations entre les épreuves.....	64
5.1. Taille des empan.....	64
5.1.1.Empan visuo-spatial.....	64
5.1.2.Empan auditivo-verbal, mémoire de travail.....	65
5.1.3.Conclusion.....	65
5.2.Lexique.....	65
5.3.Gnosies.....	66
Discussion.....	67
1.Notre étude.....	69
2.Rappel des hypothèses au regard de la théorie de Dehaene (1992).....	70
2.1.Epreuves de compétences numériques exactes.....	70
2.2.Epreuves de compétences numériques approximatives.....	70
2.2.1.Les conditions non symbolique (Ho et He).....	70
2.2.2.Les conditions symboliques (NVO et NA).....	70
3.Principaux résultats.....	71
3.1.Les compétences numériques approximatives pour le groupe DYS.....	71
3.2.Les facteurs influençant la précision du SNA.....	71
3.2.1.Les compétences numériques exactes.....	71
3.2.2.L'âge.....	72
3.2.3.Le niveau linguistique.....	72
3.3.Recherche de liens de causalité pour le groupe DYS.....	73
3.3.1.Les compétences numériques exactes du groupe DYS.....	73
3.3.1.1.Le comptage.....	73
3.3.1.2.Niveau de comptage pour le groupe DYS.....	73
3.3.1.2.1.Hypothèses explicatives.....	74
3.3.1.3.Corrélation entre le comptage et les épreuves d'estimation.....	74
3.3.2.Le transcodage.....	75
3.3.2.1.Niveau des transcodages pour le groupe DYS.....	75
3.3.2.1.1.Hypothèses explicatives.....	75
3.3.2.2.Corrélation entre les transcodages et les estimations.....	76
3.3.3.Niveau des compétences arithmétiques pour le groupe DYS.....	76
3.3.3.1.Hypothèses explicatives.....	76
3.3.3.2.Corrélation entre les compétences arithmétiques et les épreuves d'estimation.....	77
3.3.4.Conclusion intermédiaire à propos des compétences numériques exactes pour le groupe DYS.....	77
3.4.Les gnosies digitales, outils pré-symboliques.....	78
3.4.1.Les gnosies digitales pour les enfants du groupe DYS.....	78
3.4.2.Corrélation entre gnosies digitales et épreuves d'estimation.....	78
3.5.Déficit symbolique.....	78
3.6.Déficits linguistiques et capacités approximatives.....	79
3.6.1.Condition hétérogène (He).....	79
3.6.1.1.Hypothèses explicatives.....	79
3.6.2.Condition nombre arabe (NA).....	80
3.6.2.1.Hypothèses explicatives.....	80
3.7.Conclusion intermédiaire de la discussion.....	80
4.Critiques méthodologiques.....	81
4.1.Le testing.....	81
4.2.Échantillon de population.....	82
5.Apport au champ de l'orthophonie.....	83

Conclusion	85
Bibliographie	88
Liste des annexes	102
Annexe n°1 : Lettre adressée aux parents et enfants contactés.....	103
Annexe n°2 : Trame du protocole individuel pour l'administrateur.....	103
Annexe n°3 : Effet de la condition.....	103
Annexe n°4 : Effet de groupe	103
Annexe n°5 : Plaquette explicative de l'étude.....	103

Introduction

L'étude de la cognition mathématique connaît des évolutions majeures relativement récentes : depuis la découverte de compétences précoces indépendantes de la culture chez le primate et l'humain et l'identification en IRMf de zones cérébrales du cortex pariétal spécifiquement associées au traitement numérique, les théories innéistes convergent vers l'existence de deux systèmes distincts dont la nature des relations demeure énigmatique.

Le SNA, système numérique approximatif, est un système inné de représentation des magnitudes, il supporte le sens du nombre. Les études phylogénétiques suggèrent la présence de ce système dès la toute petite enfance chez l'humain et le primate. Son développement serait indépendant de l'éducation.

Le SNP, système numérique précis, supporte pour sa part les activités de représentation des quantités en modalité symbolique. Il serait le résultat de l'instruction formelle des codes symboliques et de l'exercice de manipulation des magnitudes.

Grâce à la maturation des réseaux neuronaux, à l'instruction et à l'exercice des habiletés numériques, l'homme structurerait ses représentations numériques mentales sur une ligne numérique mentale. D'abord logarithmique, cette ligne tendrait vers une représentation linéaire, témoin d'une précision accrue de la représentation sémantique des magnitudes.

La présente étude s'intéresse à l'analyse des représentations numériques exactes et approximatives d'enfants présentant un trouble sévère de développement du langage oral : la dysphasie. Les sujets répondant à cette nomenclature présentent des profils très hétérogènes mais constituent, en raison de leur déficit linguistique, un échantillon de population très intéressant pour l'étude des compétences mathématiques. En effet, les chercheurs en cognition numérique se questionnent toujours sur l'implication du langage dans le développement des capacités numériques approximatives. En témoignent les diverses modélisations théoriques du développement numérique.

Les principales études de la littérature anglophone qui s'intéressent aux compétences numériques de cette population attestent donc d'un déficit dans les tâches numériques exactes qui font intervenir les compétences linguistiques alors que les tâches numériques approximatives seraient préservées ; sans qu'on soit toutefois en mesure d'en expliquer les causes. Cette dissociation conforte le modèle

du Triple Code de Dehaene (1992) selon lequel les représentations numériques seraient codées selon trois modalités reliées par des transcodages mais dont le développement serait indépendant.

Dans une perspective de remédiation, il sera également intéressant d'enrichir la littérature d'études sur les performances numériques de ces enfants en ce qui concerne les compétences approximatives, peu étudiées à ce jour, en particulier au moyen d'une tâche d'estimation. Au regard de la récurrence de certains déficits et de l'analyse des facteurs sous-tendant ces fonctionnements, le cumul d'études à ce sujet permettrait aux thérapeutes d'envisager des remédiations spécifiques aux difficultés rencontrées par ces enfants dans le domaine de la cognition numérique.

Notre travail sera mené selon deux hypothèses principales :

(H1) Les compétences approximatives des enfants dysphasiques sont similaires à celles des enfants à développement typique et de même âge chronologique et supérieures à celles des enfants à développement typique et de même niveau linguistique ; donc la précision du SNA ne dépend pas du langage.

(H2) Les capacités numériques exactes des enfants dysphasiques sont plus faibles que celles des groupes contrôles, leur développement étant dépendant du langage.

Cette étude s'inscrit dans la continuité de deux recherches menées dans le cadre de licence et master de logopédie (Vanderwaele, 2008 et Seghin, 2014). L'intérêt de les poursuivre est multiple : augmenter la taille de l'échantillon, observer l'effet de l'âge, approfondir l'analyse des profils par un protocole enrichi d'épreuves de compétences numériques.

D'abord, nous présenterons le développement de la cognition numérique dans la population à développement typique et la terminologie relative aux troubles du langage, en particulier les caractéristiques du trouble dysphasique, pour ensuite présenter une revue de la littérature concernant les compétences numériques des enfants avec trouble spécifique du langage oral.

Puis, nous présenterons nos populations et nos choix méthodologiques.

Ensuite, nous analyserons les données obtenues.

Enfin, nous discuterons de ces analyses en les confrontant aux données de la littérature pour répondre à nos hypothèses.

Contexte théorique, buts et hypothèses

Dans cette première partie, nous nous intéresserons tout d'abord au développement de la cognition numérique chez les sujets au développement typique. Nous aborderons ensuite les différentes terminologies et les caractéristiques générales de la dysphasie. Nous détaillerons l'état actuel de la recherche sur la cognition numérique des enfants avec troubles spécifiques du langage pour enfin rappeler les hypothèses de notre étude.

1. Développement de la cognition numérique

Les nombreuses études phylogénétiques et la neuro-imagerie ont permis d'affirmer l'existence de capacités proto-mathématiques précoces chez l'être humain (Gelman & Butterworth, 2005). Dès lors, deux modèles innéistes des processus numériques se sont développés : le modèle du triple code de Dehaene (1992) et le modèle développemental d'acquisition numérique de Von Aster (2007). Le système numérique approximatif serait à l'origine du sens du nombre et permettrait d'accéder à l'aide du langage et de l'apprentissage symbolique aux habiletés numériques exactes.

Selon la théorie de Bootstrapping (Carey, 2001, 2004), il existe en revanche une relative indépendance entre l'apprentissage du mot-nombre et le SNA. Les enfants accèdent à la connaissance du nombre depuis la relation entre l'acquisition du langage et le système visuel d'individualisation de l'objet.

Même s'il n'existe aujourd'hui aucun consensus à propos de la modélisation du développement numérique (Lafay, Saint-Pierre, & Macoir, 2013), notre étude sera basée sur une approche innéiste que nous présenterons dans un premier temps. Dans un second temps, nous présenterons les processus de quantification innés et acquis, la théorie de la ligne numérique mentale et enfin les corrélats neuronaux qui soutiennent l'approche phylogénétique.

1.1. Le modèle du triple code de Dehaene (1992)

Dehaene (1992, 1995) détermine trois modules de représentations mentales pour le traitement du nombre : la représentation verbale orale, la représentation arabe et la représentation analogique (Figure 1). Ces trois modules reposent sur des circuits neuronaux différents mais sont par ailleurs fortement interconnectés via les possibles activités de transcodages (Pesenti, Seron, & Noël, 2000).

Les modules de représentations numériques verbal et arabe sont symboliques et asémantiques (Lafay, 2013) et supportent les habiletés numériques exactes.

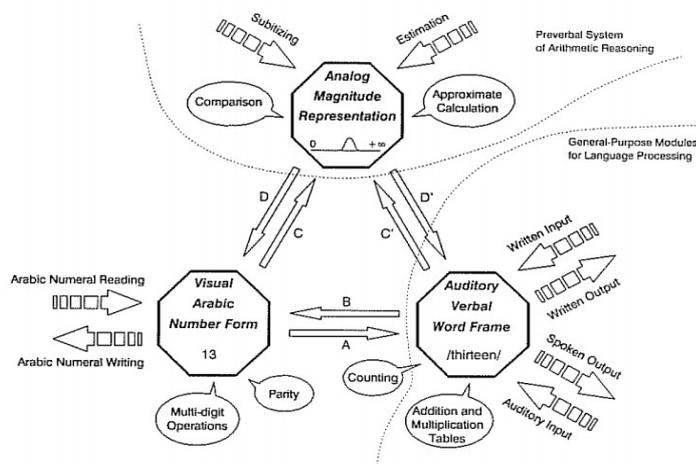


Figure n°1 : Modèle du triple code (Dehaene, S., 1992. *Varieties of numerical abilities. Cognition* 44, 1–42)

-La représentation visuelle arabe (NA) est un système de représentation numérique symbolique en modalité visuelle (e.g. 3) (Pesenti, Seron, & Noël, 2000). Elle est utilisée dans les jugements de parités et la résolution de calculs mentaux complexes.

-La représentation verbale orale, nombre verbal oral (NVO) est un système de représentation symbolique du nombre en modalité auditivo-verbale : elle correspond à l'énoncé oral du nombre (eg. [trwa]) et permet de réaliser des activités de comptage et de récupérer des faits arithmétiques en mémoire (addition, multiplication).

-Le module de représentation analogique correspond au traitement du sens du nombre (eg. ***), habileté universelle à se représenter et à manipuler les magnitudes numériques, indépendamment du langage (Noël, 2011 ; Dehaene, 1995). La perception précise de petits ensembles et le traitement approximatif de grandes quantités sont les tâches numériques approximatives réalisées grâce à ce module.

1.2. Les processus de quantification innés

Les habiletés ontogéniques et phylogénétiques reposent sur deux systèmes de représentations : l'un est le système de représentation approximative des grandes magnitudes, l'autre est le système de représentation des petites magnitudes,

autrement appelé « subitizing ». Ces deux systèmes supportent l'émergence d'un système numérique conceptuel plus sophistiqué, propre à l'être humain, qui est le résultat de l'éducation et de la transmission culturelle. (Feigenson, Dehaene, & Spelke, 2004)

1.2.1. Le système numérique approximatif

Nous présenterons ci-après le SNA et le subitizing, dont les caractéristiques ont été révélées par des études chez l'animal, le bébé, et certaines populations indigènes qui ont pour particularité de ne pas posséder de lexique numérique.

D'une part, le système numérique approximatif (SNA) supporte les tâches d'approximations de grandes magnitudes. Il est fonctionnel dans les tâches de comparaison lorsque le ratio entre deux collections est suffisant. Il répond à la loi de Weber-Fechner qui correspond à « une compression logarithmique des représentations numériques mentales lorsque les quantités réelles augmentent » (Lafay et al., 2013) et répond à deux effets principaux de taille¹ et de distance² (Lafay et al., 2013 ; Camos, 2011). Chez le primate et l'humain, des capacités de discrimination de quantités, ainsi que des connaissances ordinales et des habiletés arithmétiques reposant sur un codage non-verbal ont été découvertes (Camos, 2011).

D'abord, la discrimination d'objets selon différents critères et le jugement de quantités inférieures à quatre ont été démontrées comme capacités innées chez l'animal et le nourrisson lors d'études expérimentales utilisant un paradigme d'habituation. Le nourrisson peut dès ses premiers jours de vie extra-utérine discriminer petites et grandes quantités indépendamment de la nature des stimuli. (Camos, 2011). Ainsi, le nourrisson de six mois peut discriminer des numérosités selon un ratio de 1:2 (e.g., il peut discriminer 8 vs 16 mais pas 8 vs 12). Cette capacité s'affine au cours du développement (à dix mois le ratio est de 2:3) (Feigenson et al., 2004), pour aboutir à l'âge adulte à un ratio de 9:10 (Pica, 2004).

Le nourrisson et le chimpanzé peuvent appairer des collections d'objets selon leur grandeur, même si les modalités sensorielles sont différentes. Dès onze mois,

1 effet de taille : la comparaison de petites quantités est plus rapide que celle de grandes quantités

2 effet de distance : la comparaison de quantités éloignées est plus rapide que la comparaison de quantités proches

les bébés sont sensibles à la place de l'objet dans la collection, alors qu'ils développeront l'accès au concept de « plus grand que/plus petit que » autour du quinzième mois de vie. (Camos, 2011.)

Ensuite, l'étude des procédures de quantification chez une population indigène du Brésil de langue Munduruku soutient l'existence de systèmes indépendants de représentation exacte et approximative. En effet, les Mundurukus possèdent un lexique numérique seulement pour les nombres allant de 1 à 5 et n'utilisent pas de routine verbale de comptage. Par ailleurs, si le comptage digital est possible chez certains individus, il est rare et lent. Une entité lexicale numérique est par ailleurs associée à plusieurs numérosités. Il s'agit d'un système approximatif, ainsi le terme cinq peut correspondre aux grandeurs de cinq à neuf. Les adultes Munduruku sont performants en comparaison de numérosités selon un ratio de 7:8 alors que les adultes étudiés par Halberda et coll. (2008) peuvent comparer des quantités selon un ratio de 10:11. La présence d'un système exact renforcerait donc l'acuité du SNA. La représentation de la magnitude des grands nombres est toutefois possible en son absence. En calcul approximatif, les Munduruku sont également capables de mettre en œuvre des stratégies d'addition et de soustraction (Pica, 2004).

En effet, l'éducation améliore significativement la précision des représentations analogiques, indépendamment de la maturation cognitive : les habiletés numériques sont corrélées à l'acuité des représentations analogiques. Les enfants Mundurukus ayant bénéficié d'instruction obtiennent de meilleurs résultats que ceux qui n'en ont pas bénéficié (Piazza et al., 2013). L'acuité du SNA émerge donc de la maturation cérébrale, des connaissances arithmétiques mais également de l'expérience dans la discrimination de numérosités (Halberda & Feigenson, 2008).

D'autre part, le subitizing permet de représenter des objets avec limite stricte de quantité (Camos, 2011). Cette compétence est précoce : les nourrissons de dix à douze mois sont capables, indépendamment des modalités sensorielles et du ratio entre les collections, d'orienter leur choix vers la quantité la plus grande pour des numérosités allant jusqu'à 3 alors qu'ils échouent pour des numérosités à partir de 4. Ces compétences sont en faveur d'un modèle indépendant de représentation exacte des quantités 1 à 3 (Feigenson et al., 2004).

Les mécanismes du subitizing seraient ainsi indépendants des processus d'estimation numérique : l'hypothèse d'obéissance à la loi de Weber est écartée pour

ces numérosités au bénéfice du postulat de l'existence de processus spécifiques de traitement des petites quantités, d'ordre attentionnels (Revkin, Piazza, Izard, Cohen, & Dehaene, 2008).

Son rang fait toutefois l'objet d'une controverse : si certains auteurs considèrent qu'il s'étend jusqu'à 3, d'autres considèrent la limite à 5 éléments (Fayol, Perros, & Seron, 2004 ; Starkey & Cooper, 1995 ; cités par Lafay, Saint-Pierre, & Macoir, 2015). Toutefois, des études chez l'adulte humain et le singe rhésus limitent son rang à 4 éléments (Feigenson et al., 2004).

1.3. Les processus de quantification acquis

Nous avons abordé précédemment le caractère inné du développement cognitif numérique. Au delà des deux systèmes approximatifs de représentation des magnitudes, il existe un système de représentation exacte des numérosités, utilisant les codes symboliques que nous détaillerons. Nous verrons que l'interaction de ces systèmes est possible grâce au langage et précisément grâce à l'acquisition de la chaîne numérique verbale et du dénombrement qui permettent l'association entre objet réel et nombre symbolique pour aboutir à la construction du concept de nombre naturel, préalable au développement des habiletés arithmétiques exactes ultérieures (Camos, 2011).

1.3.1. Les doigts, outils analogiques pré-symboliques

Indépendamment de leur culture, tous les enfants découvrent que les doigts de la main peuvent être mis en relation avec une collection d'objets à dénombrer. La dénomination de numérosités supérieures à trois est très liée au comptage corporel : les doigts supportent les chiffres digitaux qui constituent un lexique corporel des nombres (Dehaene, 2010 ; Di Luca, & Pesenti, 2011). L'utilisation de la base 5 ou de la base 10, partagées dans de nombreuses sociétés témoigne d'autre part de ce lien étroit entre corps et nombre en référant au nombre de doigts que possède l'être humain (Di Luca & Pesenti, 2011).

De plus, si dans certaines sociétés le lexique numérique est partagé avec le lexique corporel. Par exemple, en nouvelle-guinée « six » se dit « poignet » et en anglais l'étymologie du nombre « five » est « fist », le poing (Dehaene, 2010 ; Di Luca & Pesenti, 2011). Nous relevons que les sociétés aborigènes qui ne possèdent

pas de lexique verbal pour les numérosités supérieures à trois possèdent un riche lexique gestuel qui s'appuie sur l'ensemble du corps (Dehaene, 2010).

En outre, les représentations canoniques des doigts de la main contribuent à l'acquisition, la construction et l'accès à la sémantique du nombre (Di Luca & Pesenti, 2011).

Utilisés en support au dénombrement, les doigts contribuent également à maintenir la cardinalité lors de résolutions de faits arithmétiques (Fuson, 1988). Le traitement de faits arithmétiques est d'ailleurs plus rapide lorsque les opérands sont présentées sous une modalité digitale plutôt qu'analogique (Di Luca & Pesenti, 2011). Aussi, un entraînement des gnosies digitales chez des enfants aux performances mathématiques faibles améliore ces performances (Graciabafalluy & Noel, 2008).

Les gnosies digitales sont ainsi établies comme prédicteurs spécifiques du développement d'habiletés arithmétiques chez des enfants de 5 ans (Fayol, 1998).

Enfin, l'utilisation répétée de représentations canoniques de doigts confère un statut particulier iconographique et symbolique à ces représentations. Intégrées en mémoire à long terme, elles sont plus vite associées à leur magnitude que les représentations non canoniques et constituent ainsi un intermédiaire sensori-moteur entre la perception du sens du nombre et ses représentations symboliques (Di Luca & Pesenti, 2011).

L'utilisation des doigts dans diverses tâches numériques persiste chez l'adulte instruit. Cette représentation ne disparaît donc pas au profit des codes auditivo-verbal ou arabe (Di Luca & Pesenti, 2011).

1.3.2. Le code verbal oral

Nous verrons d'abord les raisons qui contraignent l'être humain à utiliser un code symbolique numérique. Ensuite nous détaillerons le développement de la comptine numérique chez l'enfant et le déterminisme linguistique dont elle dépend pour enfin aborder l'activité de dénombrement.

D'abord, l'acquisition du code auditivo-verbal est lente : avant 5 ans, les enfants ont de meilleurs résultats en additions et soustractions lorsqu'on leur

présente un recodage analogique (Brissiaud 1991 cité par Fayol, Camos, & Roussel dans Pesenti & Seron, 2000). L'homme est toutefois contraint d'entrer dans un système combinatoire pour exprimer et comprendre une infinité de numérosités, ce que lui permet le codage auditivo-verbal, au travers d'un lexique numérique régi par des règles. En contractant un ensemble d'unités, nous constituons une base (Dehaene, 2010) à partir de laquelle nous déterminons des unités lexicales primitives qui réfèrent à des numérosités. Dans notre système, il en existe une trentaine pour le code verbal, organisé en classes (unités, dizaines, multiplicateurs, zéro et les particuliers). C'est la combinaison de ces primitives qui crée la syntaxe des nombres (Poncelet, Majerus, & Van der Linden, 2009). Les noms des nombres doivent évoquer rapidement et précisément les numérosités correspondantes. Ainsi, un même mot ne peut coder deux quantités distinctes (Fayol, 2013).

En outre, les caractéristiques linguistiques intrinsèques au code sont primordiales. Les études comparatives interlangues mettent en évidence le fait que les régularités du système en facilitent l'apprentissage. Aussi, les enfants chinois sont rapidement bien plus performants que leurs homologues occidentaux du fait de la simplicité de l'organisation de la numération verbale. Ce système fait clairement apparaître le principe décimal et le nombre d'unités lexicales à retenir est restreint. Ces enfants accèdent ainsi plus rapidement que leurs homologues aux noms des nombres, aux premières opérations arithmétiques (Fayol, 2013), et comptent plus loin à âge égal (Miller et al., cités par Dehaene, 2010).

En revanche, le système décimal français manque de transparence et le partage d'une même unité lexicale pour plusieurs référents (e.g. « un » n'est pas uniquement réservé au domaine numérique) le rend ambigu. En outre il contient un grand nombre de particuliers (les nombres de 1 à 16) et la syntaxe est irrégulière (e.g., 70 se dit « soixante-dix »). Enfin, la longueur des unités lexicales semble jouer un rôle dans leur rétention et implique une charge cognitive dans les tâches qui font intervenir la mémoire de travail auditivo-verbale (Fayol, 2013).

Ensuite, la connaissance de la comptine numérique est fondamentale : elle constitue un prédicteur de la réussite mathématique (Jordan et al., 2009). L'utilisation du langage pour représenter la numérosité ne laisse pas de trace de l'accroissement de la quantité. Le sujet doit alors se défaire des dimensions perceptives (surface,

densité etc.) pour élaborer une représentation numérique abstraite. Si une maturité est nécessaire à l'enfant pour accéder à cette abstraction, la nature linguistique du code et ses caractéristiques entrent également en jeu dans le développement des habiletés de comptage (Fayol, 2013).

Fuson (1988) définit ainsi plusieurs stades de maturité de la comptine numérique. D'abord récitée tel un chapelet, la chaîne devient « insécable » : les mots sont individualisés mais le comptage n'est possible qu'à partir du début. Puis la chaîne devient « sécable » et enfin « terminale ». Les noms des nombres considérés comme des entités distinctes sont désormais utilisables dans des opérations arithmétiques.

Enfin, l'activité de dénombrement permet d'évoquer de manière précise le cardinal d'un ensemble codé par le rang du mot-nombre dans la chaîne numérique verbale (Fayol, 2013). Nous verrons que les performances aux épreuves de jugement (appariement mot-nombre et magnitude), sont interprétées de deux manières distinctes : certains auteurs postulent que le développement inné de principes de comptage en guide l'apprentissage alors que d'autres soutiennent que c'est la maîtrise progressive de la procédure de dénombrement qui développe les compétences de jugement de cardinalité (Fayol, 2013).

Cinq principes permettraient à l'individu d'accéder au comptage grâce à la coordination de l'énonciation de la chaîne verbale et du pointage : les principes d'ordre stable, de stricte correspondance terme à terme, de cardinalité, d'abstraction et de non pertinence de l'ordre dans la comptine numérique (Gelman & Gallistel, 1978). Le concept de cardinalité serait de nature générative, l'humain étant prédisposé à l'apprentissage du sens des mots-nombres. Par le comptage, le sujet identifie une valeur discrète pour la faire correspondre à une magnitude. (Leslie, Gelman, & Gallistel, 2008)

D'autres auteurs considèrent le dénombrement comme procédural : les enfants savent précocement (2 ans $\frac{1}{2}$) qu'un nombre réfère à une numérosité précise sans pour autant l'identifier. Ils distinguent également les mots-nombres des autres mots (Gelman & Gallistel, 1978 ; Fuson, 1988 ; Wynn 1990 ; cités par Wynn, 1992). Ainsi, s'ils acquièrent d'abord la séquence des mots-nombres relatifs aux petites numérosités c'est pour accéder ensuite aux représentations cardinales des grandes collections. Ce sont les situations contextuelles, en leur permettant d'inférer les liens

entre mots-nombres et magnitudes, mais aussi l'exercice de la quantification de collections discrètes, la maîtrise de la syntaxe des mots-nombres ou la compréhension de la nature itérative du codage linguistique des numérosités qui entraîneraient la maturation des procédures (Wynn, 1992).

La difficulté principale serait alors la correspondance entre représentations pré-verbales et représentations verbales des quantités (Fayol, 2013).

1.3.3. Le code arabe

Le code arabe est régi par un système positionnel de base dix. Toutes les combinaisons sont possibles entre les dix primitives lexicales, à l'exception des séquences qui commencent par zéro. Les relations de type additives et multiplicatives sont possibles et peuvent être combinées (e.g., « trois cent sept » $3 \times 100 + 7$) pour écrire une infinité de nombres (Poncelet et al., 2009).

De plus, l'automatisation de l'accès aux représentations arabes des nombres est présente dès six ans (White et al., 2012 ; cités par Lafay, Saint-Pierre, & Macoir, 2013). Les effets de taille et de distance observables dans des tâches de comparaison de chiffres arabes sont considérés comme témoins du mapping des nombres arabes sur des représentations numériques analogiques (Mussolin et al., 2014). Le traitement perceptif du nombre arabe repose en outre sur des corrélats neuronaux spécifiques détaillés ci-après (Abboud, Maidenbaum, Dehaene, & Amedi, 2015).

Enfin, les études portant sur des tâches de comparaison de nombres arabes suggèrent qu'elles seraient prédictrices de la réussite mathématique (Jordan et al., 2009 ; De Smedt et al., 2009 ; Durand et al., 2004 ; cités par Lafay, Saint-Pierre et Macoir, 2013). Cette tâche serait possible dès six ans et le temps de comparaison s'amoindirait avec l'âge (Holloway & Ansari, 2009; Sekuler & Mierkiewicz, 1977 cités par Mussolin et al., 2014).

Siegler et Booth (2006), cités par Lafay et coll. (2013) suggèrent également que la performance à l'épreuve de placement de nombres arabes sur une ligne numérique mentale est corrélée à la performance mathématique. Le positionnement de nombres arabes sur une ligne numérique mentale s'améliorerait entre six et huit ans pour les cent premiers nombres et entre huit et onze ans pour les nombres jusqu'à mille (Opfer & Siegler, 2012 ; cités par Mussolin et al., 2014).

Mazzocco et Thomson (2005) suggèrent pour finir que l'identification de nombres arabes est corrélée à la performance mathématique.

1.4. La ligne numérique mentale

La ligne numérique mentale est une hypothèse de représentation mentale des magnitudes. Il s'agit d'une ligne bornée, compressée à droite et originellement logarithmique. L'existence de ce système de représentation chez les primates non humains renforce cette hypothèse (Dehaene, 2003). Ce sont les apprentissages culturels et scolaires et l'interaction entre les codes qui font évoluer cette représentation vers une linéarité (Feigenson et al., 2004 ; Berteletti, Lucangeli, Piazza, Dehaene, & Zorzi, 2010).

1.4.1. Evolution de la ligne numérique mentale

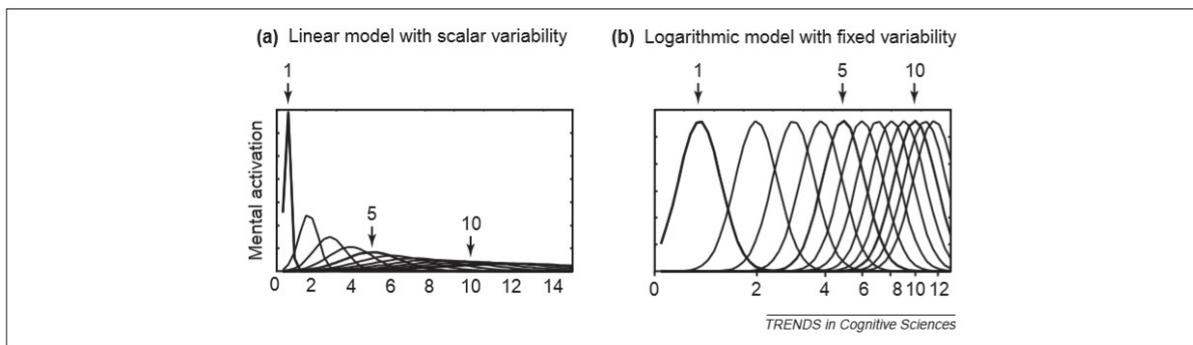


Figure n°2 : d'après (Feigenson et al., 2004) : à gauche, LNM linéaire, à droite LNM logarithmique.

Lorsque l'on propose à des enfants de cinq ans de situer les nombres sur un segment, ils accordent d'abord plus d'importance aux petites numérosités, les grandes numérosités étant compressées à droite du segment. Aussi, le ratio entre les nombres importe plus que la distance qui les sépare (Berteletti et al., 2010). Cette répartition répond à la loi de Weber et suit une échelle logarithmique (Berteletti et al., 2010).

Les enfants scolarisés en cycle élémentaire apprennent ensuite à mettre en relation les représentations approximatives et symboliques. La représentation de la LNM bascule alors progressivement d'une échelle logarithmique à une échelle linéaire scalaire (Feigenson et al., 2004), observable dès l'âge de sept ans (Berteletti et al., 2010).

Une étude menée sur une population Mundurucu, qui n'utilise pas d'outils linéaires de mesure, montre par ailleurs que ces individus recourent intuitivement,

comme les jeunes enfants occidentaux, à une représentation logarithmique. Les apprentissages tendent également à linéariser leurs représentations. Cette linéarisation est donc bien l'effet de l'instruction et non celui d'une maturation cérébrale seule (Izard, Pica, Spelke, & Dehaene, 2008).

1.4.2. Relations entre ligne numérique mentale et codes

L'interaction entre les représentations analogiques et symboliques est révélée à la faveur de la LNM : la précision des représentations analogiques en estimation et la vitesse de dénomination numérique sont corrélées (Revkin et al., 2008).

De plus, le gain en précision des estimations analogiques par un calibrage grâce au code symbolique témoigne également d'une interaction et d'une co-construction des codes (Izard et al., 2008).

1.5. Corrélats neuronaux

Le lobe pariétal est particulièrement impliqué dans les activités numériques. C'est dans cette zone que siège le substrat anatomo-fonctionnel du sens du nombre. Par ailleurs, les zones frontales et temporales sont également impliquées dans ces traitements.

Différentes zones sont co-activées lors des tâches numériques exactes ou approximatives : pariétales, frontales et gyrus angulaire coopèrent (Dehaene, 2004).

1.5.1. Rôle fonctionnel du lobe pariétal

Le lobe pariétal est multimodal : il soutient d'une part des activités attentionnelles, de grasping, d'occulomotricité, et d'autre part les traitements numériques (Dehaene, Piazza, Pinel, & Cohen, 2003). Un lien fonctionnel entre doigts et calcul apparaît en outre dans le syndrome de Gerstman : les lésions pariétales provoquent une acaculie associée à une agnosie digitale, les zones cérébrales dédiées aux nombres et aux doigts étant très proches (Noël, 2011).

Le lobe pariétal est segmenté en deux parties : au niveau antérieur, le segment horizontal bilatéral (hIPS) et le gyrus angulaire (AG), au niveau postérieur la région pariétale supéro-postérieure (PSPL) (Dehaene et al., 2003).

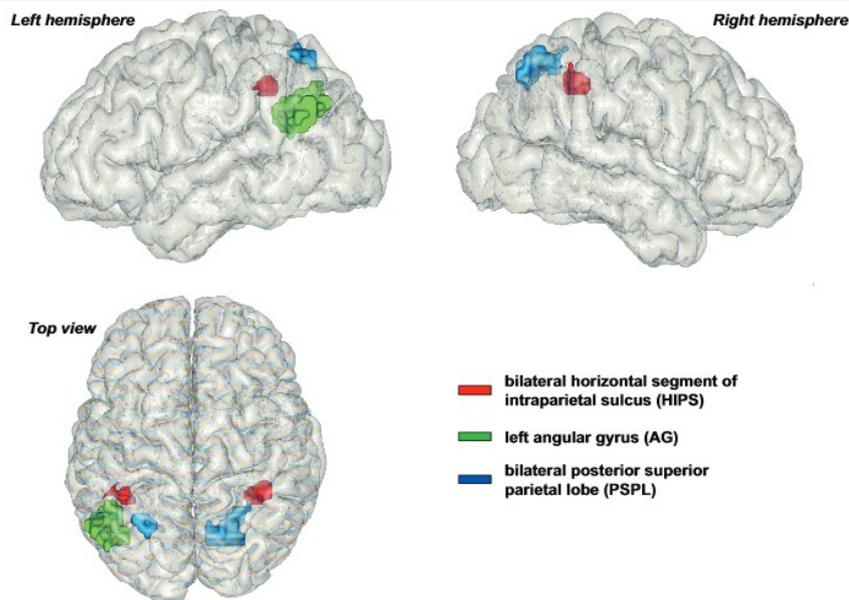


Figure n°3 : Substrats neuronaux d'après (Dehaene, Piazza, Pinel, & Cohen, 2003)

Le sillon intra-pariétal (HiPS)

Le segment horizontal du sillon intrapariétal bilatéral est le module spécifique et amodal du sens du nombre (Habib, 2011 ; Pesenti, Seron, Noël, 2000, Dehaene, 2004). S'il est activé dans l'ensemble des tâches numériques (accès aux représentations symboliques et non symboliques de la magnitude dans des tâches de comparaison numériques, résolution de problèmes arithmétiques simples) il est surtout le substrat essentiel des tâches d'approximation numérique (Habib, 2011). Par ailleurs, le degré d'activation du sillon intra-pariétal est d'autant plus fort que l'activité qu'il supporte est basique. Ce constat conforte l'idée que cette zone détient le rôle majeur dans la représentation et la manipulation des magnitudes (Dehaene, 2004).

Le gyrus angulaire (GA)

Le gyrus angulaire hémisphérique gauche serait le substrat du codage verbal des faits arithmétiques. Il permettrait ainsi la mémorisation de résultats de calculs (tables de multiplications, calcul exacts). Il est par ailleurs impliqué dans de nombreuses tâches verbales non numériques (Habib, 2011).

Il existe en effet une dichotomie dans l'activation des zones HiPS et GA : alors que les tâches approximatives qui font appel aux représentations de la LNM mobilisent fortement le sillon intrapariétal, les tâches numériques exactes codées dans une représentation linguistique mobilisent majoritairement cette zone du gyrus angulaire qui n'est toutefois pas spécifique des tâches numériques puisqu'elle est

aussi activée lors de tâches de dénomination des doigts et de détection phonémique (Dehaene, 2004).

La région pariétale supéro-postérieure (PSPL)

La région pariétale supéro-postérieure bilatérale est activée lors de tâches d'approximations, de soustractions, d'attention visuo-spatiale et d'orientation sur la ligne numérique mentale (Habib, 2011). Elle est impliquée dans les tâches de manipulation des quantités qui requièrent une haute mobilisation attentionnelle (Simon, Mangin, Cohen, Le Bihan, & Dehaene, 2002).

1.5.2. Rôle fonctionnel du cortex préfrontal

Le degré d'activation du cortex pré-frontal varie avec l'exigence de rapidité de réponse, dans les tâches de calcul mental par exemple, et avec la complexité de la tâche, alors qu'en parallèle, le degré d'activation du sillon intrapariétal décroît. Le rôle du cortex pré-frontal est d'organiser et de mobiliser les ressources, particulièrement dans les tâches qui font appel à la mémoire de travail (Dehaene, 2004).

Par ailleurs, les aires prémotrices du cortex frontal sont impliquées dans le contrôle de la motricité digitale (Habib, 2011; Pesenti, Seron, & Noël, 2000).

1.5.3. Latéralisation des fonctions numériques

Le consensus des auteurs à propos de la latéralisation des activités numériques est le suivant : le sillon intrapariétal gauche serait spécialisé dans les tâches de jugement numériques exacts alors que le droit serait spécialisé dans des tâches de jugements approximatifs (Habib, 2011).

En outre, il existerait une aire de reconnaissance de la forme visuelle des nombres localisée au niveau du gyrus temporal inférieur droit. Cette aire visuelle de reconnaissance des nombres arabes se développerait de manière multimodale et son activation impliquerait systématiquement la coactivation du sillon intra-pariétal (Abboud, Maidenbaum, Dehaene, & Amedi, 2015).

2. Les dysphasies

2.1. Terminologie

Le terme « dysphasie » est utilisé communément dans la littérature francophone et en clinique pour désigner un trouble sévère et durable du développement du langage oral en l'absence de cause identifiable. Cependant, il n'est pas admis par l'ensemble de la littérature internationale. Si les publications anglophones s'attachent au terme de « trouble spécifique du langage oral » (Leonard 2014 ; Bishop 1992), d'aucuns remettent en cause le caractère spécifique des troubles et parlent plutôt de trouble du développement du langage (Leclercq & Maillart, 2014) ou de trouble primaire du langage (Kohnert, 2009 ; Thordardotti, 2010). Certains auteurs intègrent la notion de trouble d'apprentissage « language learning-impairment » (Marler 2005 cité par Maillart 2012). Ce « labyrinthe » de terminologies reflète bien la complexité du diagnostic, l'hétérogénéité de l'expression clinique des troubles et d'un point de vue plus large, l'évolution des recherches sur le développement de l'acquisition du langage (Leonard, 2014).

Au regard des sujets qui constituent notre échantillon de population, qui portent le diagnostic de dysphasie, nous nous accorderons dans ce mémoire à utiliser ce terme.

2.1.1. La conception francophone : dysphasie versus retard simple du langage

Certains enfants avec troubles du langage oral verront leurs difficultés se résorber spontanément ou à l'aide d'une intervention thérapeutique appropriée, alors qu'un dixième d'entre eux aura des difficultés persistantes et sévères (Gérard, 1993 ; Ringard, 2000).

L'approche francophone des dernières décennies s'appuie sur ce constat clinique pour constituer deux entités de troubles spécifiques du langage oral. Elles se distinguent par la nature de leur trouble (fonctionnel versus structurel) et par le caractère développemental du langage (délai versus déviance) (Gérard, 1993 ; Piérart, 2013 ; Schelstraete et al., 2011). Le retard de langage est ainsi défini comme une trouble fonctionnel, transitoire du langage oral : les acquisitions sont plus

tardives que dans le développement typique (Piérart, 2013). L'atteinte des composantes du langage est légère à modérée et se résorbe logiquement vers 6 ans, spontanément ou avec un suivi orthophonique (De Werck, 1996).

Selon le dictionnaire d'orthophonie la dysphasie est un « *trouble développemental grave du langage se manifestant par une structuration déviante, lente et dysharmonieuse* » de la parole et du langage oral (au versant de l'expression et/ou de la compréhension). Aussi, la présence de difficultés de manipulation du code entraîne « *des altérations durables dans l'organisation du langage à différents niveaux : phonologique, lexical, syntaxique, morphosyntaxique, sémantique et/ou pragmatique, sans qu'il existe actuellement de causes déterminées.* » (Brin, 2011). D'après cette définition, la dysphasie est un trouble non acquis (Leclercq & Maillart, 2014) dû aux dysfonctionnements ou atypies neurodéveloppementales excluant les difficultés liées à un environnement insuffisant ou une autre cause identifiable (Mazeau, 2014).

Dans l'espace francophone, les performances langagières sont déclarées pathologiques après une étude qualitative et quantitative de celles-ci (Mazeau, 2014). En effet, un score de 2 déviations standard en dessous de la moyenne mesuré par des tests standardisés (Parisse & Maillart, 2006) et la présence d'au moins trois marqueurs de déviance (trouble d'informativité, hypospontanéité, trouble de la compréhension, trouble de l'évocation lexicale, trouble de l'encodage syntaxique, dissociation automatico-volontaire) (Gérard, 1993) révèlent un développement atypique du langage. La fréquence des dysphasies est estimée à 2% (Ringard, 2000).

Selon Monfort (2001), cette distinction entre le retard de parole ou retard de langage et la dysphasie est aussi importante d'un point de vue théorique que pratique (choix des stratégies thérapeutiques, intensité des prises en charge).

L'opposition entre la déviance et le délai est remise en cause actuellement par des auteurs francophones comme Piérart (2013). Dans son étude des compétences langagières de treize enfants dysphasiques, ces derniers présentent un lexique réduit et des résultats en phonologie au dessous des normes. Cependant, ces deux

entités langagières ne sont pas déviantes et suivent les caractéristiques développementales des enfants tout-venant.

Le caractère transitoire du retard de parole est aussi remis en cause par des études longitudinales qui montrent que des adolescents et adultes ayant consulté pour retard de parole pendant leur enfance conservent des écarts significatifs dans certaines épreuves langagières (Rescorla, 2009 ; Law et al., 2000).

2.1.2. Evolution actuelle vers la conception anglophone de trouble spécifique du langage oral

L'absence des deux entités est le fondement même de l'approche anglo-saxonne qui définit les performances linguistiques comme un continuum appelé « spécifique langage impairment » ,SLI, (Leonard, 1981 ; Fey, & Leonard, 1983) où le retard simple du langage se trouverait à une extrémité et la dysphasie à l'autre extrémité (Chevrié-Muller, 2007). Le SLI regroupe donc l'ensemble des troubles sévères du développement du langage qui ne peuvent être expliquées en termes de déficience mentale, auditive ou physique, de trouble émotionnel ou de privation d'entourage (Bishop, 1992. Tallal, Stark, & Mellits,1985). Inclure l'adjectif spécifique dans la terminologie permet de distinguer strictement les SLI des autres pathologies comme l'autisme et la déficience intellectuelle (Schuele, & Hadley, 1999). Aujourd'hui le terme SLI est le terme le plus usité dans les recherches internationales (Leonard, 2014).

Selon Monfort (2001), le terme générique SLI est cependant trop « imprécis [...] car il englobe tous les troubles développementaux du langage à partir d'un seul critère quantitatif de différence entre le niveau général de développement et le niveau de développement langagier ». De ce fait, il couvre des enfants avec des performances langagières très hétérogènes (Leonard 2014). Ainsi, les termes dysphasie et SLI ne sont pas synonymes. D'ailleurs, la prévalence des SLI dans la population, estimée entre 5 et 10%, est plus importante que celle des dysphasies (Law et al. 2000). L'absence de consensus sur la définition du trouble et du diagnostic explique qu'aucune prévalence ne soit validée scientifiquement à ce jour concernant ces pathologies.

2.2. Caractéristiques générales de la dysphasie

2.2.1. La question du diagnostic de la dysphasie

Le diagnostic de la dysphasie repose sur des critères d'exclusion (spécificité du trouble) et des critères d'inclusion (sévérité et persistance) (Piérart, 2013). Cependant, la clinique et des études récentes remettent en cause ces critères.

Le critère diagnostique le plus communément admis reste le diagnostic par exclusion (DSM IV, CIM-10). Ainsi, le diagnostic ne pourrait être posé en présence de surdité, d'otites à répétition, de trouble comportementaux et émotionnels, de traumatisme, d'épilepsie ou de trouble neurologique et lorsque le QIP est inférieur à 85 (Stark et al., 1981).

De nouvelles données montrent que l'application de ces critères est relative : beaucoup d'enfants dysphasiques présentent des déficits dans d'autres domaines de développement que celui du langage. En clinique, il n'est pas rare qu'un enfant sourd, IMC ou avec un retard mental, soit dysphasique (Monfort, 2001). Des études ont révélé la présence de troubles moteurs pour la moitié de la population dysphasique (Hill, 2001). La cooccurrence avec les troubles attentionnels est aussi présente pour 20 à 40% de cette population (Oram et al., 1999).

De nombreux auteurs se sont interrogés aussi sur le score seuil de 85, fixé comme critère de déficit aux tâches cognitives non verbales (Tager, Flusberg, & Cooper, 1999). En effet, certains enfants dysphasiques montrent des performances aux épreuves non verbales proches de celles des enfants avec retard mental sans pour autant présenter de déficience (Leonard, 2014 ; Bishop, 2004). En outre, des observations longitudinales ont évoqué des déclin des habiletés non verbales chez des jeunes dysphasiques (Botting, Faragher, Simkin, Knox, & Conti-Ramsden 2001). Une étude de Conti-Ramsden et ses collaborateurs (2012) nuance ces résultats : seuls les enfants dysphasiques avec atteinte importante du versant compréhension observent un fléchissement du quotient intellectuel non verbal dans le temps.

La présence importante de troubles non langagiers reflète l'hétérogénéité des causes et des déficits sous-jacents de la dysphasie. Même si la spécificité est remise en cause à travers ces études, on note une altération majorée sur le versant langagier par rapport aux autres domaines d'acquisitions (Leclercq & Maillart, 2014).

2.2.2. Les marqueurs de la dysphasie

Comme nous l'avons vu précédemment, associée à des performances langagières pathologiques, la présence d'au moins trois marqueurs de déviance de Gérard (1993) confirme le diagnostic d'une dysphasie. Néanmoins, le développement atypique des troubles langagiers est remis en cause par de nombreuses études récentes (Parisse & Maillart, 2006 ; Piérart 2013). Les erreurs commises par les enfants dysphasiques seraient persistantes plutôt que déviantes. Leclercq et Maillart (2014) préconisent donc ne pas les utiliser comme des critères stricts d'inclusion mais comme des indicateurs de la gravité des troubles.

Dans cette perspective, les signes suivants peuvent nous permettre de suspecter un trouble sévère et/ou persistant et peuvent constituer des critères d'inclusion (Schelstraete, 2008) :

- un déficit au niveau réceptif (phonèmes, mots, phrases) ;
- une inintelligibilité due à de nombreuses erreurs phonologiques atypiques et non-constantes avec un déficit massif de la répétition de pseudo-mots (Bishop et al., 1996 ; Botting et al., 2001) ;
- des difficultés praxiques associées avec une dissociation automatico-volontaire
- des troubles morpho-syntaxiques et du récit (Rice & Wexler, 1996) ;
- un retard dans le développement du jeu symbolique (Yoder et al., 1995) et dans la communication gestuelle (Olswang et al., 1998) ;
- un trouble de l'évocation persistant.

Avec le temps et une prise en charge adaptée, la personne dysphasique met en place des compensations et ces signes peuvent s'atténuer (Leclercq & Maillart, 2014). Néanmoins, des difficultés de répétition de pseudo-mots, de répétition de phrases et de production de morphèmes grammaticaux persistent et peuvent ainsi constituer des épreuves fiables pour contribuer au diagnostic (Botting & Conti-Ramsden, 2001).

3. État des recherches sur la cognition numérique des enfants avec trouble spécifique du langage

Considérant que la plupart des études portant sur les compétences numériques des enfants avec troubles du langage font partie de la littérature anglophone, la terminologie récurrente est celle de trouble spécifique du langage (SLI). Cette population d'étude concerne un panel de sujets plus large que notre étude, centrée sur des sujets avec trouble sévère et persistant du langage oral, et qui bénéficient pour la plupart d'un suivi intensif en rééducation et d'une scolarité aménagée. Il est toutefois très intéressant de nous intéresser à ces articles qui nous renseignent à la fois sur les compétences préservées et les déficits de ces sujets mais qui interrogent également le rôle du langage dans le développement des habiletés cognitives numériques.

A l'égard de cette population, nous aborderons d'abord l'étude des processus de quantification innés pour ensuite faire état des recherches concernant les processus de quantification acquis et enfin terminer par une mise en perspective de divers facteurs cognitifs impliqués dans les traitements numériques.

3.1. Le système numérique approximatif des enfants SLI

Au regard de la dimension innée des manipulations de quantités approximatives exposée plus haut, il paraît essentiel de s'intéresser à l'évaluation des compétences des enfants avec SLI dans ces tâches. Pourtant, l'étude des compétences approximatives de ces enfants a mobilisé les chercheurs dans une moindre mesure que celle de la numération exacte (Nys, Content, & Leybaert, 2013 ; Koponen et al ., 2006).

Nous présenterons donc une brève revue des études disponibles.

3.1.1. Estimations de numérosités

La qualité des représentations des magnitudes des enfants SLI (Siegel 1981 ;Koponen, Mononen, Rasanen, & Ahonen, 2006), mesurée au travers de tâches d'approximations, de comparaisons de numérosités (Koponen et al., 2006 ; Nys et al., 2013) ou par des tâches d'estimations à partir d'un code analogique est

équivalente à celle des enfants contrôles de même âge chronologique (Koponen et al., 2006).

Selon ces études, les difficultés numériques des enfants SLI ne relèveraient pas d'un déficit du sens du nombre. Par ailleurs, les difficultés langagières n'entraveraient pas le développement de représentations approximatives du nombre. Enfin, les représentations approximatives des magnitudes ne dépendraient pas d'un recodage langagier (Nys et al., 2013).

Par ailleurs, les enfants SLI ont dans ces tâches, qu'elles soient ou non symboliques, de meilleurs résultats que leurs pairs de même niveau linguistique mais d'âge inférieur. Par contre, ils ont des résultats similaires à leurs pairs d'âge chronologique. Cet effet de l'âge pourrait révéler une maturation cérébrale, un effet de l'expérience et/ou de l'entraînement (Nys et al., 2013).

3.1.2. Arithmétique approximative

Les compétences des enfants SLI en tâches de calcul approximatif ne diffèrent pas non plus de celles de leurs pairs (Nys et al., 2013).

Un effet d'âge opère également, et est d'autant plus marqué lorsque les opérations portent sur un matériel non verbal et sur des numérosités inférieures à 6 (Arvedson, 2002). Certains aspects arithmétiques se développent donc indépendamment du langage (Arvedson, 2002).

3.2. Les processus de quantification acquis et les compétences numériques exactes des enfants SLI

Chez l'enfant tout venant, les erreurs lexicales (portant sur le code oral) sont initialement présentes pour disparaître naturellement alors que les erreurs syntaxiques (portant sur le code arabe) persistent. Chez les enfants SLI, il existerait une dissociation dans la maîtrise des codes. Le code arabe serait maîtrisé (Gourlay & Donlan, 1999 ; cités par Noël, 2011), alors que le système auditivo-verbal demeurerait imprécis avec un lexique numérique mal maîtrisé, un retard dans le comptage (Fazio, 1994) et une extension de la chaîne numérique verbale anormalement lente (Fazio 1996 ; Fazio, 1994).

Nous présenterons ci-après une revue des principales études disponibles à ce sujet.

3.2.1. Les codes symboliques

Les numéraux verbaux oraux

Le comptage verbal implique la connaissance des propriétés lexicales et syntaxiques des nombres (Seron 2001 ; Delazer 2001 ; Fazio 1994 cités par Koponen et al., 2006).

Les enfants SLI ont une chaîne numérique verbale réduite (Cowan, 2008 ; Koponen et al., 2006). Leur performance en comptage est très inférieure aux enfants de même âge sans trouble (Cowan, 2008) et comparable à celles des enfants plus jeunes mais de même niveau linguistique. Les enfants SLI ont des difficultés à rétablir la dimension séquentielle de la comptine (Cowan, 2008 ; Koponen et al., 2006) et l'ordinalité (Cowan, 2008) alors que leur compréhension conceptuelle du nombre est bonne (Fayol, 1998).

Ce déficit est précoce et persistant : il est présent dans l'ensemble des études portant sur un échantillon d'enfants de trois à onze ans.

De trois à cinq ans, les enfants SLI ont ainsi une séquence de comptage réduite (Arvedson 2002 cité par Koponen et al., 2006). Entre quatre et cinq ans, bien que leur connaissance conceptuelle de la chaîne numérique soit bonne (Fazio, 1994), ils ont des difficultés à réciter la séquence numérique ordonnée (Fazio, 1994). A six ans, les difficultés portent dorénavant sur la récupération des mots-nombres supérieurs à 20 (Fazio, 1996). Dès l'âge de huit ans, leurs déficits sont de grande ampleur : 40% des enfants SLI de l'étude menée par Donlan ne peuvent compter au delà de 8 contre 4% des enfants témoins (Cowan, Donlan, Newton, & Llyod, 2005). Le comptage rebours, le comptage borné (Cowan et al., 2005) et le comptage par pas (Tieche Christinat et al., 1995 ; cités par Koponen et al., 2006) sont également très déficitaires. La comptine demeure réduite jusqu'à neuf ans (Fazio, 1999 ; Cowan, 2008) pour enfin se préciser à l'âge de onze ans avec toutefois la persistance d'un déficit en vitesse de récupération (Fazio, 1999 cité par Koponen et al., 2006).

Enfin, l'implication du comptage dans les tâches de raisonnement mathématique est modérée chez les enfants SLI qui n'utilisent pas spontanément les stratégies de récitation de la comptine verbale ni l'utilisation du comptage digital. Leurs performances sont d'ailleurs supérieures à celles de leurs pairs dès que le recours au comptage peut être évité, alors que les scores des enfants SLI

s'amenuisent dès qu'ils sont invités à utiliser le comptage dans ces mêmes tâches. Toutefois, si cette compensation par un traitement non-verbal est possible dans des tâches de raisonnement mathématique comprenant de petites numérosités elle ne l'est plus dès que les collections s'agrandissent (Arvedson, 2002).

La comptine numérique des enfants SLI reste donc longtemps réduite et instable. Si sa précision tend à se normaliser, sa manipulation demeure difficile et la récupération des séquences est lente.

A 5 ans, les enfants SLI ont acquis les principes de cardinalité et de correspondance terme à terme de petites collections, leur dénombrement est identique à celui d'enfants sans troubles du langage. Leurs compétences dans les tâches de dénombrement gestuel sont toutefois meilleures qu'en modalité auditivo-verbale (Fazio, 1994). Entre 6 et 7ans, si le dénombrement de petites quantités reste performant, il existe un déficit dans le dénombrement de grandes collections (Fazio, 1996). Des difficultés de correspondance terme à terme et de sériation avaient également été observées dans une approche piagétienne (Siegel, 1981). Dans les tâches de production et de jugement de dénombrement et de cardinalité, les enfants dysphasiques produisent davantage d'erreurs et sont plus lents que leurs pairs. Leur chaîne numérique verbale est réduite, son énonciation est lente et la précision en dénombrement est par conséquent moindre chez ces enfants. Par ailleurs, utiliser le pointage ne permet pas de compenser les difficultés d'énonciation, et ralentit même le traitement (Fayol, 1998).

Les auteurs mettent en relief la dissociation existant entre les bonnes compétences de jugements et les faibles performances des enfants dysphasiques dès qu'on examine le versant productif (Fayol, 1998).

Les numéraux arabes

Il existe peu d'études sur les transcodages et la représentation arabe chez les enfants SLI et celles-ci ne permettent pas de conclure sur l'indépendance ou l'interrelation du code arabe vis à vis du code auditivo-verbal. Un effet de distance est toutefois mesuré dans la tâche de comparaison et indique un recours aux représentations non-verbales des magnitudes sur la ligne numérique mentale (Donlan & Gourlay, 1999 ; Cowan et al., 2005). En outre, il existe un effet de la nature des nombres sur la vitesse de jugement en comparaison de nombres arabes :

alors que les nombres transparents sont très vite comparés, ceux qui introduisent une ambiguïté le sont moins (e.g., les nombres réversibles 24/42, ou ceux dont l'unité est un grand chiffre 21/19) (Donlan & Gourlay, 1999).

Pour certains, la compréhension du principe de magnitude des nombres arabes repose sur une modalité visuo-spatiale (Donlan & Gourlay, 1999), ce qui expliquerait la supériorité des résultats des enfants SLI par rapport à ceux des enfants de même niveau linguistique sans toutefois expliquer l'infériorité parfois observée par rapport à ceux des enfants de même âge chronologique (Cowan et al., 2005). Toutefois, il n'existe pas de consensus et si des compétences en comparaison de nombre arabes équivalentes aux enfants témoins de même âge ont également été montrées (Koponen et al., 2006), le temps de réponse des enfants SLI demeure significativement plus lent (Koponen et al., 2006).

D'autres études s'intéressent également à la relation entre les codes symboliques : alors que la comparaison de numérosités à partir d'un code analogique ne distingue pas les enfants SLI de leurs pairs tout-venants, les premiers seraient moins précis dès que l'on utilise un code symbolique (ici le code arabe) ; sans pour autant que l'on ait pu établir de corrélation spécifique entre la comparaison de nombres arabes et le trouble linguistique (Nys et al., 2013).

Il n'existe donc pas actuellement de consensus et les études trop peu nombreuses sur des échantillons trop réduits ne permettent pas de se positionner par rapport à l'implication des représentations symboliques auditivo-verbales dans la comparaison de représentations symboliques non-verbales (code arabe).

Le modèle du triple code de Dehaene considère que la représentation de la magnitude opère indépendamment des processus verbaux. Si les enfants témoins plus jeunes mais de même niveau linguistique ont des résultats inférieurs aux enfants SLI, c'est que dans la tâche de comparaison de nombres arabes, seul le sens du nombre intervient, indépendamment des représentations auditivo-verbales (Koponen et al., 2006). Cette hypothèse est également étayée par la neuro-imagerie qui atteste que l'accès au code arabe comme au code auditivo-verbal active le sillon intra-pariétal impliqué spécifiquement dans le sens du nombre (Dehaene, 2004).

3.2.2. La résolution de faits arithmétiques

En calcul exact, les performances des enfants SLI sont très contrastées avec leurs performances en calcul approximatif. Ces tâches sont clairement échouées

(Fazio, 1996 ; Nys et al., 2013) et les déficits sont précoces (Kleemans, Segers, & Verhoeven, 2012) et persistants (Fazio, 1999 ; Nys et al., 2013).

Pour certains auteurs, les résultats des enfants SLI en résolution de faits arithmétiques élémentaires sont nettement inférieurs à ceux de leurs pairs de même âge chronologique. Par contre, ils sont similaires à leurs pairs de même âge linguistique (Cowan, 2008). Ils sont pour d'autres supérieurs (en vitesse et précision) à ceux d'enfants plus jeunes appariés en niveau linguistique (Koponen et al., 2006). Toutefois, lorsqu'on laisse du temps supplémentaire aux enfants SLI pour résoudre les faits arithmétiques, leur précision est identique à celle des enfants de même âge chronologique. Ainsi, ils utilisent préférentiellement des stratégies immatures coûteuses en temps et insuffisamment les stratégies de récupération des faits arithmétiques (Fazio, 1999).

Différentes stratégies additives co-existent ainsi chez les enfants SLI : le comptage verbal et digital pour les petites numérosités, ou la récupération de faits arithmétiques en mémoire à long terme pour les calculs simples (Koponen et al., 2006). La vitesse de récupération des faits arithmétiques est facilitatrice dans la résolution de calculs complexes. Les résultats significativement inférieurs en vitesse de récupération des enfants SLI en comparaison de leurs pairs de même âge chronologique (Koponen et al., 2006 ; Fazio, 1996) montrent qu'ils utilisent plus souvent et plus durablement les stratégies immatures de résolution de faits arithmétiques (Koponen et al., 2006).

Pour la plupart des auteurs, les difficultés des enfants SLI en résolution de faits arithmétiques sont la résultante du déficit linguistique (Donlan, Cowan, Newton, & Lloyd, 2007; Nys et al., 2013). Une dissociation entre leurs résultats en opérations additives (échouées) et soustractives (non échouées) s'expliquerait d'ailleurs par la différence de traitement cognitif. Alors que les opérations additives reposeraient sur une stratégie linguistique de récupération des mots-nombres, les soustractions dépendraient d'un traitement visuo-spatial et des représentations de la ligne numérique mentale (Lee & Kang, 2002). En outre, la corrélation entre le niveau verbal des enfants SLI et leurs scores en vitesse de calcul (mais également en

raisonnement non-verbal) illustre cette relation langage-arithmétique (Koponen et al., 2006).

Une corrélation existe également entre niveau de calcul (vitesse, précision) et mémoire auditivo-verbale (Fazio, 1999) : l'utilisation de stratégies immatures entraîne une lenteur considérable qui requiert un long maintien des opérands dans la boucle phonologique (Camos, 2006). Or, il existe probablement un effet d'interférence phonologique (confusion entre les mots-nombres aux sons proches) qui induit des erreurs de calcul (Camos, 2006).

Le niveau des jeunes enfants SLI en résolution de faits arithmétiques est donc similaire à celui des enfants de même niveau linguistique. Un déficit précoce et persistant existe : si certains enfants parviennent en grandissant à obtenir une précision comparable à celle de leurs pairs de même âge chronologique, leurs stratégies de résolution de faits arithmétiques demeurent immatures et entraînent une grande lenteur. Ce déficit en résolution de faits arithmétiques constituera un frein au développement d'habiletés numériques plus élaborées comme la résolution de problèmes (Camos, 2006).

3.2.3. La ligne numérique mentale

L'effet de distance témoigne d'une représentation numérique linéaire. En outre, dans les tâches de jugements symboliques (comparaison de numérosités selon différentes modalités : auditivo-verbale, analogique, numéraux arabes), une articulation incongruente (l'examineur énonce un nombre différent de celui qui est vu) n'a pas d'effet sur les performances qui restent bonnes. Les enfants SLI n'auraient donc pas recours au recodage verbal des magnitudes (Donlan, 1998).

3.3. Implication de divers facteurs cognitifs dans les activités numériques des enfants SLI

3.3.1. La mémoire de travail

De nombreux auteurs considèrent que le déficit de mémoire de travail des enfants SLI est impliqué dans leurs difficultés numériques.

D'une part, la boucle phonologique expliquerait le déficit en comptage et en calcul mental (Cowan et al., 2005). Le déficit de mémoire de travail auditivo-verbale des enfants SLI est pour certains l'origine du trouble numérique : le stockage des

mots-nombres et des faits arithmétiques sous forme phonologique est un obstacle pour ces enfants (Fazio, 1996). Lors de l'activité de dénombrement, la récupération en mémoire à long terme et le maintien dans le buffer phonologique du mot-nombre mobilisent fortement la mémoire de travail (Camos, 2006). L'activité de résolution de calculs nécessite de bonnes capacités de mémoire de travail et la mise en œuvre de nombreuses étapes avant d'aboutir au bon résultat (Nys et al., 2013).

D'autre part, le calepin visuo-spatial, qui expliquerait les déficits en transcodings ou en comparaison de nombres arabes (Cowan et al., 2005), est recruté lors de l'activité de dénombrement par le rétrocontrôle indispensable à la distinction entre les items dénombrés et les items à dénombrer. Les difficultés en mémoire de travail auditivo-verbale des enfants SLI ont ainsi pour conséquence un ralentissement de l'activité de dénombrement et une majoration du nombre d'erreurs (Camos, 2006).

En outre, certains auteurs considèrent le déficit de mémoire de travail comme un trouble associé au SLI et postulent que les tâches numériques requièrent une coopération de la compréhension verbale, du raisonnement non-verbal et de la mémoire de travail (Cowan, 2008).

Enfin, il existe une contre-étude qui exclut toute corrélation spécifique à la population SLI entre les performances arithmétiques additives et soustractives et la mémoire de travail (Kleemans et al., 2012).

3.3.2. Les habiletés linguistiques

Siegel (1981) explique la difficulté dans le dénombrement par le traitement séquentiel nécessité par la tâche. Or, le langage est le support de ce traitement dans la mesure où il permet le stockage temporaire de l'information et l'attribution d'une place au sein d'un ensemble (Siegel, 1981). De plus, l'origine d'un déficit de comptage se trouverait dans le déficit linguistique (Cowan et al., 2005) et plus précisément dans le déficit de traitement auditif séquentiel des enfants SLI (Fazio, 1994).

Aucune corrélation spécifique n'a été établie entre la résolution de faits arithmétiques et les habiletés morphosyntaxiques (Kleemans et al., 2012 ; Koponen et al., 2006), le raisonnement non-verbal, la mémoire à court terme, la fluence lexicale (Koponen et al., 2006), la compréhension lexicale (Koponen et al., 2006 ;

Nys et al., 2013), la compréhension syntaxique ou le quotient intellectuel (Koponen et al., 2006).

Il en existe toutefois une entre les habiletés phonologiques et les compétences en calcul exact (Nys et al., 2013). Les calculs et les processus phonologiques impliqueraient ainsi des processus cognitifs généraux similaires de dimension séquentielle, de stockage temporaire de l'information sous sa forme phonologique. Aussi, lors de la récupération de faits arithmétiques en mémoire à long terme, les opérands sont transcodés dans leur forme phonologique. De plus, les algorithmes de calcul des opérations élémentaires indispensables à la résolution de calculs complexes sont soumis au codage verbal. L'inconsistance des formes phonologiques des mots chez les enfants SLI peut par conséquent être un obstacle à la construction d'algorithmes et à leur accès en mémoire à long terme (Nys et al., 2013).

La dénomination rapide, corrélée aux capacités verbales des enfants SLI (Durkin, Mok, & Conti-Ramsden, 2013 ; Kleemans et al., 2012) est considérée par certains auteurs comme le seul marqueur prédictif permettant de détecter les difficultés arithmétiques ultérieures des enfants SLI (Koponen et al., 2007 ; Koponen et al., 2006). Une équipe a par ailleurs établi la dénomination rapide comme prédicteur des compétences numériques verbales des très jeunes enfants avec SLI (Kleemans, Segers, & Verhoeven, 2011) et la spécificité de ce prédicteur à la population SLI dans des tâches additives (Kleemans et al., 2012). Elle est également corrélée aux performances de comptage verbal (Koponen et al., 2006).

Il est par ailleurs intéressant de noter que la dénomination rapide n'est pas corrélée aux performances en estimation (Durkin et al., 2013 ; Kleemans et al., 2012), en faveur d'une indépendance des représentations non-symboliques et verbales.

Le niveau de vocabulaire, corrélé au comptage verbal (Koponen et al., 2006) témoigne de l'importance des compétences langagières dans la construction ou la maîtrise du code auditivo-verbal.

Par ailleurs, des auteurs ont étudié le caractère prédictif du niveau de langage et du QIP des enfants SLI sur leurs performances numériques. Moins la gravité du trouble langagier est marquée, meilleurs seront les résultats des enfants de sept et

huit ans en numération. Une persistance des difficultés numériques des enfants SLI est observée dans cette étude longitudinale qui postule que le développement des habiletés numériques ne peut par conséquent pas être considéré indépendamment du langage (Durkin et al., 2013).

3.3.3. Répercussions en cascade

Pour certains auteurs, les dissociations entre bases conceptuelles numériques préservées et déficit procédural chez les enfants SLI témoignent de l'importance du traitement non-verbal dans le développement numérique conceptuel (Baroody & Dowker, 2003). Les conséquences des déficits ou des retards cumulés dans la mise en place de procédures (récupération de faits arithmétique, comptage) chez les enfants SLI pourraient toutefois entraîner en cascade une restriction des compétences conceptuelles numériques (Baroody & Dowker, 2003).

La comptine numérique est par ailleurs une compétence socle à l'accès aux habiletés numériques élémentaires (Nys et al., 2013), le déficit de séquence serait précisément un obstacle dans l'acquisition du principe positionnel du nombre en représentation arabe (Cowan et al., 2005) alors que le dénombrement de grandes collections est dépendant de la bonne maîtrise de la comptine numérique. Enfin, les compétences en dénombrement sont également indispensables au développement des activités arithmétiques (Kleemans et al., 2011).

Au delà des difficultés spécifiques des enfants SLI dans le domaine numérique, une répercussion en cascade de ces difficultés pourrait entraver le développement de compétences pourtant initialement présentes. Face à ce constat, des propositions d'accompagnement émergent : pour améliorer les compétences arithmétiques et la numération, certains proposent un drill phonologique (Nys et al., 2013) ou un entraînement à la dénomination rapide des résultats de faits arithmétiques comme mécanisme compensatoire (Kleemans et al., 2012). D'autres révèlent les processus compensatoires visuo-spatiaux mis en place spontanément par les enfants SLI (Rasmussen & Bisaz 2005, Stigler 1984 cités par Nys et al., 2013) alors que certains suggèrent enfin d'enrichir les pratiques éducatives par une manipulation plus fréquente des quantités approximatives en complément de l'enseignement traditionnel des procédures numériques faisant appel aux représentation exactes (Nys et al., 2013).

4. Intérêt de l'étude et rappel des hypothèses

D'une part, nous avons vu qu'il existe à ce jour peu d'études portant sur la cognition numérique des sujets avec troubles du langage oral.

La plupart portent sur l'examen de leurs compétences numériques exactes. Les résultats déficitaires des sujets dans ces tâches suggèrent que la qualité du langage influence le développement des compétences numériques exactes. Qu'en est-il du système numérique approximatif ?

Le système numérique approximatif (SNA), qui supporte le sens du nombre demeure peu étudié pour cette population. Or, un trouble linguistique pourrait aussi influencer la précision du SNA.

D'autre part, les principaux travaux portant sur le SNA sont menés au moyen d'une tâche de comparaison de magnitudes qui a pour inconvénient de ne proposer qu'un choix binaire de réponse. Au contraire, la tâche d'estimation qui en permet une multitude est selon Smets (2015) la tâche la plus fidèle pour évaluer la qualité des représentations sémantiques du nombre.

La présente étude aura donc pour objectif de compléter les données actuelles de la littérature concernant les représentations numériques exactes et approximatives des enfants dysphasiques. Nous étudierons en particulier la précision du SNA au moyen d'une tâche d'estimation.

Notre travail sera mené selon deux hypothèses principales :

(H1) Les compétences approximatives des enfants dysphasiques sont similaires à celles des enfants à développement typique et de même âge chronologique et supérieures à celles des enfants à développement typique et de même âge chronologique ; donc la précision du SNA ne dépend pas du langage.

(H2) Les capacités numériques exactes des enfants dysphasiques sont plus faibles que celles des groupes contrôles, leur développement étant dépendant du langage.

Sujets, matériel et méthode

Notre étude s'inscrit dans le cadre du modèle du triple code de Dehaene (1995). Selon ce modèle, le processus de représentation sémantique des nombres se construit à travers deux systèmes. Tout d'abord, un système d'approximation numérique (SNA), inné et non-verbal qui permettrait l'émergence des premières capacités de quantification. Des observations portant sur l'animal et le jeune enfant confirment son existence (Xu & Spelke, 2005). Ensuite, un deuxième système numérique verbal, responsable de l'acquisition des compétences numériques exactes, se développerait sous l'influence du langage et de l'instruction (Dehaene, 2001).

Cependant, la distinction des deux systèmes n'est pas, à ce jour, reconnue par l'ensemble des chercheurs. Pour Carey (2001), le langage a un rôle fondamental dans les acquisitions des quantifications (représentations numériques approximatives). Des études ont notamment démontré que la maîtrise de la comptine verbale améliore les capacités d'approximation numérique (Wynn, 1992 ; Carey, 2001). D'autres chercheurs invoquent la maturation de la zone du cerveau correspondant au SNA pour justifier l'amélioration des capacités de quantification et donc l'indépendance de ce système et du langage (Halberda & Feigenson 2008 ; Piazza 2010).

Pour déterminer la part de l'inné et du langage dans le développement des compétences numériques, nous avons choisi d'étudier les représentations du nombre chez des enfants dysphasiques au travers d'épreuves linguistiques et numériques.

Les résultats des sujets du groupe cible (DYS) seront comparés à ceux des deux groupes contrôles constitués de sujets de même âge chronologique (AC) et de sujets de même niveau langagier (ML).

Nous pouvons donc considérer que si le développement du SNA tel que décrit par Dehaene, n'est pas influencé par le langage, alors les compétences numériques approximatives des sujets dysphasiques seront identiques à celles des sujets de même âge chronologique. Au contraire, si les capacités langagières affectent le développement des processus d'approximation, alors les sujets dysphasiques seront moins performants que les sujets de même âge chronologique (Nys et al., 2013).

1. Présentation des sujets

Pour cette étude, trois groupes ont été constitués. Le premier est constitué d'enfants dysphasiques. Les deux autres, servant de groupes contrôles, sont constitués d'une part, d'enfants de même âge chronologique (AC) et, d'autre part, d'enfants de même niveau de langage (ML). Si le groupe AC permet d'étudier le rôle des déficits langagiers dans le développement des habiletés numérique, le groupe ML examine le rôle de l'expérience et de l'enseignement scolaire des mathématiques (Nys et al., 2013).

Les participants de notre étude sont âgés de 5 ans 11 mois à 27 ans 9 mois. Au total, 56 sujets ont participé à notre étude. Nous avons retiré les données de deux d'entre eux avec qui nous n'avions pas pu mener l'expérience jusqu'à son terme.

Les parents de chaque enfant ont été contactés par mail ou par courrier et ont fait parvenir un talon réponse l'autorisant à participer à notre expérience (Annexe 1).

1.1. Le groupe d'enfants dysphasiques

1.1.1. Les critères d'inclusion et d'exclusion

Avant de débiter notre expérience, nous avons vérifié que les sujets dysphasiques répondaient à certains critères. A ce jour, le diagnostic de dysphasie a été posé pour l'ensemble des participants du groupe DYS par une équipe pluridisciplinaire.

Nous nous sommes appuyées sur la définition par exclusion de la dysphasie pour déterminer les critères d'exclusion de ce groupe : le trouble du langage oral ne doit pas être expliqué par un déficit auditif, un retard général de développement, un trouble neurologique, des troubles envahissants de développement ou encore un QI non verbal faible (Parisse & Maillart, 2006, Bishop, 1992, Tallal et al., 1985). Les sujets avec des troubles associés ont été écartés de notre étude.

Les deux participants bilingues ont effectué l'ensemble de leur scolarité en langue française et présentent les caractéristiques langagières de la dysphasie dans les deux langues pratiquées.

1.1.2. Présentation des sujets dysphasiques de l'étude

Le groupe dysphasiques (DYS) est composé de 18 sujets âgés de 8 à 16,5 ans. La moyenne d'âge est de 162,72 mois. Le groupe inclut 8 filles et 10 garçons. Le ratio fille/garçon est donc de 1,25:1. Cet échantillon reste proche du ratio moyen des études qui est de 2,8 :1 (Leonard, 2014). Ils sont originaires de différentes régions françaises (Bretagne, Midi-Pyrénées Languedoc Roussillon, Pays-de-la-Loire, Nord-Pas-de-Calais Picardie). Les participants ont des profils scolaires variés : certains sont scolarisés en milieu ordinaire, avec ou sans accompagnement d'un(e) auxiliaire de vie scolaire, certains bénéficiant également d'un suivi au sein d'un Service d'Éducation Spéciale et de Soins à Domicile (SESSAD), alors que d'autres bénéficient d'un enseignement en classe d'Unité Localisée pour l'Inclusion Scolaire (ULIS) « Trouble Du Langage ».

La plupart de ces sujets bénéficient actuellement d'une prise en charge orthophonique et tous en ont bénéficié. Les modalités de prise en charge orthophonique sont variables : certains sont suivis en libéral, d'autres dépendent de structures médico-sociales et l'intensité de la prise en charge varie d'une à quatre séances hebdomadaires.

Groupe: Dysphasique	Sexe :	âge (années; mois)	Cursus
0	G	16;6	seconde générale
0	F	13;1	5ème ULIS
0	G	16;1	seconde professionnelle
0	F	14;10	4ème ULIS
0	G	13;10	4ème
0	G	11;2	6ème
0	F	13;7	5ème ULIS
0	F	8	CE1
0	G	13;01	5ème ULIS
0	G	8;11	CLIS
0	F	14;2	4ème
0	G	16;6	première scientifique
0	G	13;8	5ème ULIS
0	F	13;9	4ème
0	F	15;3	3ème ULIS
0	G	13;6	5ème ULIS
0	F	14;10	4ème ULIS
0	G	13 ;4	4ème ULIS

Tableau n°1 : Récapitulatif des caractéristiques de la population dysphasique (DYS).

Enfin, nous devons signaler que même si nous avons sélectionné un échantillon de sujets dysphasiques en respectant ces critères d'inclusion et d'exclusion, nous n'obtenons toutefois pas un échantillon homogène : les troubles dysphasiques et les différents degrés d'atteintes demeurent hétérogènes.

1.2. Les groupes contrôles

1.2.1. Les critères d'exclusion et d'inclusion

Les participants inclus dans les groupes contrôles n'ont pas de difficulté scolaire, ils sont scolarisés en milieu ordinaire et n'ont jamais été pris en charge par un orthophoniste.

1.2.2. Présentation des groupes contrôles

Les groupes contrôles (AC et ML) sont composés de 36 sujets (20 garçons et 16 filles) âgés de 6 à 27 ans. Ils sont originaires de différentes régions françaises (Bretagne, Midi-Pyrénées Languedoc Roussillon, Pays-de-la-Loire, Nord-Pas-de-Calais Picardie).

Groupe: âge chronologique	Sexe	âge (années; mois)	Cursus
1	G	8;4	CE2
1	G	8;7	CE2
1	G	10;6	CM2
1	G	8,11	CE2
1	F	12;2	5ème
1	F	13,11	4ème
1	F	13;7	4ème
1	F	13,8	4ème
1	F	13;8	4ème
1	F	13;9	4ème
1	F	13;9	3ème
1	G	14;2	3ème
1	G	14;10	3ème
1	G	15;10	seconde générale
1	G	15;7	seconde générale
1	G	16;3	Première littéraire
1	G	17;1	Première technologique
1	F	17;3	terminale scientifique

Tableau n°II : Récapitulatif des caractéristiques de la population contrôlé âge chronologique (AC).

N° sujet	Groupe: même langage	Sexe	âge (années; mois)	Cursus
10025	2	G	6;6	CP
10015	2	F	7;2	CE1
10011	2	G	8;11	CE2
1006	2	F	8;7	CE2
1016	2	F	7;10	CE1
10009	2	G	9	CM1
10003	2	F	9;6	CM1
10013	2	G	9;7	CM1
1012	2	G	9;9	CM1
10007	2	F	11;4	6ème
1014	2	F	12;9	5ème
10039	2	G	12;7	5ème
1015	2	F	14;4	3ème
1010	2	G	14;6	3ème
1005	2	G	16;8	Première Scientifique
3001	2	G	18;11	Terminale Scientifique
10019	2	G	23 ; 5	postbac
10037	2	F	27,9	postbac

Tableau n°III : Récapitulatif des caractéristiques de la population contrôlé même langage (ML).

2. Procédure et Matériel

2.1. Procédure de passation

Les passations ont débuté en septembre 2015 pour finir au cours du mois de février 2016.

Chaque épreuve est réalisée individuellement en présence d'un examinateur. La durée d'une passation étant estimée à 1h45, nous avons décidé d'administrer notre protocole en deux fois afin de maintenir l'attention des sujets (Annexe 2).

Elles ont eu lieu dans un lieu calme au domicile des sujets ou dans des établissements scolaires ou médicaux après accord des directeurs d'établissements.

2.2. Matériel

Le testing est composé de deux groupes d'épreuves aux objectifs distincts. Tout d'abord, nous avons constitué une batterie de type « papier-crayon » de pré-test langagiers et cognitifs afin de vérifier les aptitudes intellectuelles non verbales, le niveau de compréhension lexicale, la mémoire visuo-spatiale et la mémoire auditivo-verbale. Les résultats obtenus à ces épreuves nous permettront d'apparier correctement le groupe cible aux groupes contrôles. Enfin, des épreuves de « type

papier-crayon » et informatisées de pré-requis mathématiques, de capacités numériques exactes et approximatives ont été sélectionnées dans le but d'évaluer le lien entre les capacités numériques et le niveau de langage chez les sujets des trois groupes.

2.2.1. La batterie de pré-testing

2.2.1.1. Compréhension lexicale

La première épreuve standardisée utilisée est l'échelle de vocabulaire en images Peabody (EVIP ; Dunn et al., 1993) qui mesure le niveau du lexique en réception. Créée en anglais dans les années 50, elle a été traduite et adaptée à des canadiens francophones en 1991. L'EVIP est constituée de deux versions (version A et version B). Pour éviter l'éventuel effet re-test, nous avons décidé d'administrer la version B aux trois groupes.

L'épreuve permet d'obtenir un score brut qui peut être converti en score normalisé et en âge lexical. L'âge lexical est utilisé, dans cette étude, pour appairer les sujets dysphasiques du groupe cible avec les sujets contrôles de même niveau de langage (ML) alors que le score normalisé permet de révéler le retard de langage chez les sujets dysphasiques par rapport aux enfants de même âge chronologique (AC), et vérifie également les habiletés linguistiques attendues pour les sujets des groupes contrôles.

Cependant, le test est valide et fidèle selon les critères de validité psychométrique des tests (Piérart, 2013). Autre avantage de l'EVIP pour notre testing, elle est étalonnée par tranches d'âge précises de 2 ans 6 mois à l'âge adulte et correspond ainsi à l'ensemble de nos sujets. Un inconvénient existe cependant quant aux scores bruts supérieurs à 142 : le manuel indique que les étalonnages ne sont plus représentatifs.

2.2.1.2. Aptitudes intellectuelles non verbales

Les aptitudes cognitives non verbales ont été vérifiées à l'aide du subtest de l'épreuve des matrices de la partie non-verbale de l'Echelle d'Intelligence de Wechsler pour Enfants et Adolescents, 4e Edition (Weschler, 2003). Le sujet doit identifier la partie manquante d'un problème visuel parmi 4 items proposés. Ce test

est composé de 41 items et dispose d'un critère de départ (âge) et d'un critère d'arrêt (4 réponses fausses consécutives sur 5).

Le subtest propose un étalonnage pour les individus de 4 ans 11 mois à 21 ans couvrant ainsi la population de l'étude. Il a été démontré que les Matrices sont de bonnes mesures de l'aptitude cognitive générale (Naglieri, 1999 cité par Weschler, 2003). L'intervention du langage dans ce test étant réduite, il vérifie pour les trois groupes testés la présence d'un éventuel retard non-verbal qui pourrait inférer sur les compétences numériques.

2.2.1.3. Empan de pattern visuel

La mémoire à court-terme visuo-spatiale a été évaluée grâce à l'épreuve papier crayon développée par Wilson et collaborateurs (1987) et décrite par Adams et Gathercole (2000).

Ce test est composé d'une série de matrices, dans lesquelles la moitié des carrés ont été noircis de façon aléatoire. Chaque cible est présentée à l'enfant pendant 2 secondes avant de disparaître. L'enfant doit alors attendre deux secondes supplémentaires pour reproduire de mémoire la cible sur un livret de matrices vierge. Initialement, un carré de quatre cases dont deux noircies est présenté. Au fil de l'épreuve, le nombre de carrés constituant la matrice augmente. Le test mesure un empan pouvant aller d'un minimum de 2 à un maximum de 15. Trois items différents de complexité identique constituent chaque niveau. L'enfant valide un niveau lorsque deux des trois matrices sont correctement restituées. On considère le dernier niveau réussi comme un indicateur de l'empan visuo-spatial de l'enfant.

Nous avons décidé de procéder à une passation informatisée de l'épreuve afin de contrôler précisément le temps d'exposition au stimulus.

Nous avons inclus cette épreuve afin de vérifier l'efficacité de la mémoire visuo-spatiale des enfants des différents groupes, aptitude notamment nécessaire à l'épreuve d'estimation, incluse dans notre testing.

2.2.1.4. Mémoire auditivo-verbale

La mémoire auditivo-verbale a été vérifiée à l'aide d'une épreuve subtest de l'Echelle Clinique de la Mémoire pour Enfant (CMS ; Cohen, 2001). Il s'agit d'une

épreuve de répétition de chiffres à l'endroit. L'examineur doit énoncer un chiffre par seconde et indiquer avec la voix la fin de la série.

L'épreuve débute par la répétition de deux chiffres puis elle se complexifie par l'augmentation du nombre de chiffres à restituer dans l'ordre. Chaque niveau est constitué de deux items différents de longueur identique. L'enfant accède au niveau suivant en validant au moins un item sur deux. L'épreuve se termine lorsque l'enfant échoue aux deux items du même niveau. L'empan auditivo-verbal correspond au dernier niveau réussi par l'enfant.

Selon Noël (2005), les épreuves de cette échelle peuvent être utilisées de façon isolée pour évaluer les capacités de la mémoire auditivo-verbale.

L'objectif de cette épreuve est de contrôler l'effet éventuel du déficit auditivo-verbal sur les capacités numériques.

2.2.2. La batterie des compétences numériques

Les tâches expérimentales numériques se divisent en trois parties : une première évalue les gnosies, compétences transversales du développement numérique, une seconde explore les compétences numériques exactes et une dernière analyse enfin les compétences numériques approximatives. A travers ces différentes épreuves, et dans une perspective développementale, notre objectif est de déterminer l'influence du langage sur les différentes habiletés numériques.

2.2.2.1. Évaluation des compétences numériques transversales

Notre protocole inclut un test d'évaluation de compétences numériques transversales.

Selon Fayol (1998), la performance à l'épreuve de gnosies digitales est prédictive des habiletés arithmétiques. La première épreuve choisie correspond donc à l'épreuve de la main homologue de la batterie des gnosies de Galifret-Granjon (1964) inspirée de Benton, Hutcheon et Seymour (1951).

Cet exercice se déroule de la sorte : on demande à l'enfant de poser sa main à plat sur la table, les doigts légèrement écartés. Cette main sera cachée de sorte que l'enfant ne la voie pas. Face à lui, on dispose un dessin de cette main. L'observateur touche isolément chaque doigt de l'enfant avec son index. Puis, l'enfant montre le doigt touché sur le dessin de la main homologue. On note un point pour chaque doigt

correctement reconnu. A la fin de l'épreuve, on obtient un score sur 20. Chaque doigt sera touché de manière isolée mais à raison de deux fois afin d'augmenter la validité de la réponse. La main droite et la main gauche doivent être testées successivement.

Cette épreuve va nous permettre de qualifier le score perceptivo-tactil des enfants dysphasiques. Des troubles de la perception des doigts pouvant expliquer notamment des difficultés pour se représenter des concepts numériques (Kinsbourne, Warrington 1978 cité par Fayol 2013).

2.2.2.2. Évaluation des compétences numériques exactes

Un des tests utilisés pour évaluer les compétences numériques exactes est le Test Diagnostique des Compétences de Base en Mathématiques (TEDI-MATH ; Van Nieuwenhoven, C., Gregoire, J. & Noel, M.-P., 2001).

Le comptage

Pour déterminer le niveau d'acquisition de la chaîne numérique (Fuson, 1988), nous proposons d'abord l'épreuve de comptage. Les différents aspects du comptage sont évalués pour un aperçu précis des compétences : compter avec une borne supérieure, compter avec une borne inférieure, compter avec des bornes supérieure et inférieure, compter à rebours, compter par pas. Chaque consigne est évaluée sur deux points, le score maximal au subtest est de 12. Toute erreur de comptage (omission, ajout, substitution, non respect des bornes) entraîne une note nulle à l'épreuve.

Le comptage faisant appel au système de représentation verbale du nombre (Dehaene, 1995) et donc au langage, nous nous attendons à un score plus faible chez les enfants dysphasiques par rapport aux enfants de même âge chronologique. En effet, des études ont révélé une maîtrise limitée de la chaîne verbale numérique (Fazio, 1996) et des difficultés de manipulation de celle-ci (Cowan et al., 2005, Donlan et al., 2007) chez les enfants dysphasiques.

Le transcodage

La compréhension du système numérique est ensuite évaluée par deux épreuves de transcodages du TEDI-MATH. Il sera demandé à l'enfant de lire et d'écrire 20 nombres. Ces exercices permettent de déterminer la capacité de l'enfant

à passer soit du code verbal au code arabe (dictée), soit du code arabe au code verbal (lecture).

Alors que nous nous attendons à observer un effet plafond à ces différentes épreuves chez les enfants du groupe AC, les épreuves seront sans doute sensibles pour les enfants du groupe ML. Nous pourrions ainsi comparer les résultats du groupe des DYS à ces deux groupes contrôles.

Le calcul

Pour évaluer les compétences arithmétiques exactes, qui occupent une place centrale dans le développement des mathématiques, nous avons utilisé le Tempo-Test Reckenen (TTR ; De Vos, 1992). Ce test, décrit notamment par Lafay (2015), est un outil d'évaluation de la fluence arithmétique pour les quatre opérations (addition, soustraction, multiplication et division). Les enfants les plus jeunes ne pouvant accéder aux opérations de multiplication et division, seules les résolutions d'addition et de soustraction seront proposées dans notre testing. De plus, la résolution d'addition est déjà un bon prédicteur des habiletés mathématiques générales (Geary, 2011 cité par Lafay, 2015).

Quarante opérations disposées en colonnes sont présentées à l'enfant sous forme écrite. Elles sont ordonnées par niveau de difficulté. Si les opérations les plus simples font appel à la mémoire des faits arithmétiques (e.g., $2 + 2$), les opérations les plus complexes (e.g., $28 + 44$) mobilisent quant à elles des procédures de calcul (Lafay, 2015).

Le sujet doit réaliser le plus d'additions/soustractions possible en une minute. Nous mesurerons ainsi les capacités de calcul mental sous contrainte temporelle pour appréhender la vitesse de résolution.

Des normes néerlandaises (du CP à la troisième) et québécoises (pour les enfants de 8-9 ans) sont disponibles. Cependant, des différences entre pays (transparence de la langue, facteurs culturels, programme scolaire etc.) décrites par Lafay (2015) peuvent apparaître. Ainsi, nous nous attacherons à comparer uniquement les scores bruts obtenus par les enfants de notre étude.

Le calcul mental fait appel à de nombreux processus cognitifs (mémoire à court terme, connaissance des symboles numériques verbaux, gnosies digitales, fonctions exécutives). De fortes corrélations ont été montrées entre des difficultés phonologiques et les compétences d'arithmétiques exactes (Nys et al., 2013).

Nous nous attendons donc à ce que les enfants dysphasiques présentent des capacités numériques exactes plus faibles que les groupes contrôles sans difficulté langagière. Ainsi, ces résultats seraient en accord avec ceux obtenus par l'équipe de Nys (2013).

2.2.2.3. Compétences numériques approximatives

Une tâche d'estimation informatisée créée par Méjias, Grégoire, Mussolin, Rousselle et Noël (2012) a été utilisée pour évaluer les compétences numériques approximatives.

Dans cette expérience, il est demandé à l'enfant d'estimer (sans compter) des numérosités dans quatre conditions (deux conditions non symboliques et deux conditions symboliques). Si la modalité de sortie (production de points à l'aide d'un potentiomètre de même taille) est identique pour les quatre blocs, la modalité d'entrée est différente pour chaque épreuve (Figure 4).

Les deux conditions d'approximation non-symbolique se présentent ainsi :

(1) Une condition homogène (Ho) pour laquelle un ensemble de points noirs de tailles identiques apparaît pendant 1000 ms sur un carré de fond blanc de taille constante. La surface et le périmètre ne sont pas contrôlés dans cette modalité. La surface covarie donc avec la numérosité. Comme les points sont de la même taille, le participant peut s'appuyer sur des indices visuo-spatiaux pour estimer le nombre de points (Rousselle et al., 2004 cités par Mejjias et al. 2012).

(2) Une condition hétérogène (He) pour laquelle des points noirs de tailles différentes apparaissent pendant 1000 ms sur un carré de fond gris de taille constante. Les points noirs de diamètres extrêmes (le plus petit et le plus grand) sont toujours présents. Pour chaque numérosité proposée, la même quantité de surface est noircie. Dans cette modalité, les variables physiques (surface et périmètre) sont contrôlées.

Dans ces deux conditions, aucun traitement verbal n'est a priori requis. Elles permettent donc d'évaluer les capacités d'estimation non-verbales des participants.

Les deux conditions d'approximation symbolique se présentent ainsi :

(3) Une condition symbolique « nombres verbaux oraux » (NVO) pour laquelle les mots-nombres sont énoncés par une linguiste. Au total, quarante-deux vidéos sont présentées à l'enfant.

(4) Une condition symbolique « nombres arabes » pour laquelle des nombres inscrits en noir sur fond gris apparaissent pendant 1000 ms au milieu de l'écran.

Pour chaque épreuve, sept magnitudes (8, 12, 16, 21, 26, 34 et 64) sont présentées chacune six fois. Différentes configurations ou vidéos sont présentées pour chaque numérosité. Leur présentation est aléatoire et gérée par un logiciel. Ce dernier permet également d'enregistrer le temps de réponse et la réponse du sujet pour chaque item.

Les quatre conditions ont été administrées au cours d'une même session suivant un carré latin pour éviter l'effet d'ordre. Pour chaque essai, une croix de fixation apparaît pendant 1000 ms pour annoncer l'arrivée du stimulus. La cible est ensuite affichée pendant 1000 ms. Après celle-ci, un écran gris servant de transition apparaît pendant 500 ms. Le participant est alors invité à produire sa réponse sur un écran gris à l'aide du potentiomètre (calibré de 0 à 255 points). Il lui est demandé de répondre le plus rapidement possible, sans comptage. Lorsque l'enfant est satisfait de sa réponse, il doit la valider en appuyant sur le bouton gris du potentiomètre. Ensuite, une instruction apparaît invitant l'enfant à remettre le potentiomètre sur la position 0.

Avant de commencer chaque modalité, un entraînement de quatre cibles différentes (15, 25, 50, 75) est proposées à l'enfant pour se familiariser à l'expérience et s'assurer de sa bonne compréhension. Pendant cette phase de pré-test, le participant reçoit un feedback correspondant à la réponse correcte. Ce feedback lui permet de calibrer son estimation et par conséquent améliore ses performances (Izard et al., 2008).

Ces quatre conditions vont nous fournir des indications particulières quant aux capacités d'estimation qui devraient dépendre des modalités d'entrée.

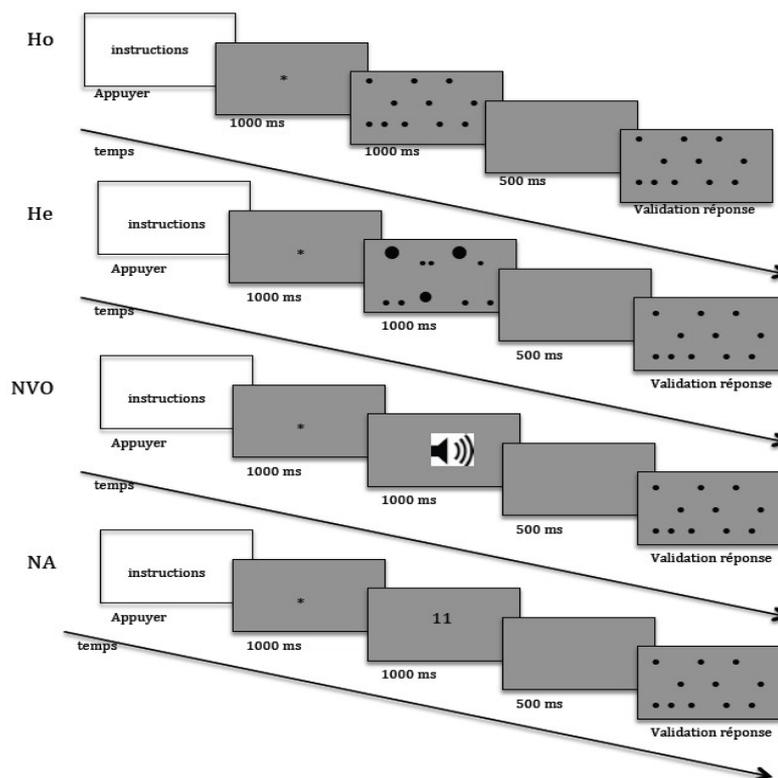


Figure n°4 : Illustration du déroulement de chaque condition d'estimation

Pour cette épreuve d'estimation, nous nous attendons à observer des dissociations de performance chez les sujets dysphasiques entre les conditions symboliques (Ho et He) et les conditions non symboliques (NVO et NA). Si les conditions non symboliques (Ho et He) ne font pas intervenir de processus verbaux, les habiletés numériques entre les groupes AC et DYS devraient être similaires. En revanche, le groupe DYS devrait présenter des performances déficitaires pour la condition symbolique NVO puisqu'ils présentent des difficultés pour traiter des sons langagiers (Tallal et al., 1985). Pour la condition NA, certains chercheurs expliqueraient les difficultés numériques observées chez les enfants dysphasiques par un déficit dans le traitement des informations symboliques. Si l'hypothèse se confirme, les performances du groupe DYS à cette épreuves seront particulièrement échouées.

Résultats

Dans cette partie, nous présenterons les résultats obtenus aux différentes épreuves ainsi que le traitement statistique effectué. L'objectif de notre étude est d'analyser les compétences numériques exactes et approximatives des sujets dysphasiques. Les compétences numériques approximatives, innées, devraient être préservées alors que les compétences exactes, dépendantes de l'apprentissage du langage devraient être altérées. De plus, nous évaluerons les facteurs qui améliorent l'acuité numérique et les corrélations entre langage et précision du SNA.

1. Appariement

Pour comparer statistiquement le groupe cible (DYS) au groupe contrôle de même âge chronologique (AC), nous avons contrôlé les variables âge et sexe en choisissant nos participants selon des critères relatifs à ces variables (Tableau IV).

La moyenne d'âge est de 162,72 mois pour le groupe DYS et 161 mois pour le groupe AC. Chaque groupe est constitué de 8 filles et 10 garçons.

	Populations DYS et AC
Variable âge	$p = .346$
Variable sexe	$p = 1.00$

Tableau n°IV : Comparaison statistique des deux populations dysphasiques et âge chronologique sur les variables de l'âge et du sexe.

Les groupes AC et DYS ont une moyenne d'âge et une répartition des sexes similaires. **Le groupe AC est donc correctement apparié au groupe DYS.**

Pour la comparaison statistique du groupe DYS avec le second groupe contrôle de même niveau de langage (ML), nous avons contrôlé deux variables : score brut à l'EVIP et sexe (Tableau V).

A L'EVIP, les sujets du groupe DYS obtiennent un score brut moyen de 117, 22 et le groupe ML, un score brut moyen de 130,60 (Tableau VII page 59). Chaque groupe est constitué de 8 filles et 10 garçons.

	Populations DYS et AC
Variable score brut à l'EVIP	$p = 1.00$
Variable sexe	$p = 1.00$

Tableau n°V : Comparaison statistique des deux populations dysphasiques et âge chronologique sur les variables de l'âge et du sexe.

Les sujets DYS et ML ont un niveau similaire de compréhension lexicale et la répartition des sexes entre les deux groupes est respectée. **Le groupe ML est donc correctement apparié au groupe DYS.**

2. Compétences approximatives

Dans les quatre tâches d'estimation, pour chaque participant et pour chacune des sept numérosités présentées, nous pouvons mesurer un score d'erreurs (moyenne des écarts entre la réponse du sujet et la numérosité cible en valeur absolue). Une analyse ANOVA (4conditions X 7numérosités X 3groupes) a mis en évidence trois effets : l'effet de numérosité, l'effet de la condition et l'effet de groupe.

Nous détaillerons ces effets, pour ensuite analyser les propriétés du SNA au sein des trois groupes pour comprendre dans quelle mesure les aptitudes numériques des enfants DYS diffèrent de celles des enfants au développement typique.

2.1. Effets mesurés

2.1.1. Effet de numérosité

Les analyses révèlent un effet principal de la numérosité ($F(6,306) = 80.759 ; p \leq .001$). Les scores d'erreur augmentent avec la magnitude cible.

Cette augmentation reflète la variabilité scalaire du système, c'est à dire que la variabilité des réponses augmente proportionnellement avec la grandeur de la cible. Cette propriété est inhérente du système approximatif (Cordes et al., 2001). Les enfants de notre étude ont donc correctement réalisé les tâches d'estimation.

2.1.2. Effet de condition

Par ailleurs nous notons que cette analyse révèle un effet principal de la condition ($F(3,153) = 3.188 ; p = .025$). Le score d'erreurs des estimations selon les conditions pour l'ensemble des sujets ($N = 54$) croît selon cet ordre : NVO, NA puis He et enfin Ho. Les sujets sont donc moins précis dans les conditions NVO et NA.

Les conditions symboliques sont donc moins réussies que les conditions non-symboliques (Annexe 3).

2.1.3. Effet de groupe

Enfin, l'ANOVA mesure un effet principal du groupe ($F(1,51) = 4.436$; $p = .017$). Les analyses post hoc permettent de montrer une différence significative entre les groupes DYS et ML ($p = .014$) et DYS et AC ($p = .012$).

Le groupe DYS est globalement moins précis que les groupes contrôles (ML et AC). De plus, le score d'erreurs révèle que le groupe DYS est significativement moins précis que les groupes contrôles (Annexe 4).

2.1.4. Conclusion intermédiaire

En conclusion, même si les enfants du groupe DYS sont capables de procéder à des tâches d'estimation, ils sont moins précis que les deux autres groupes.

En outre, un effet de condition a été mis en évidence. Nous allons donc tenter de comprendre cet effet.

2.2. Les groupes face aux épreuves d'estimation

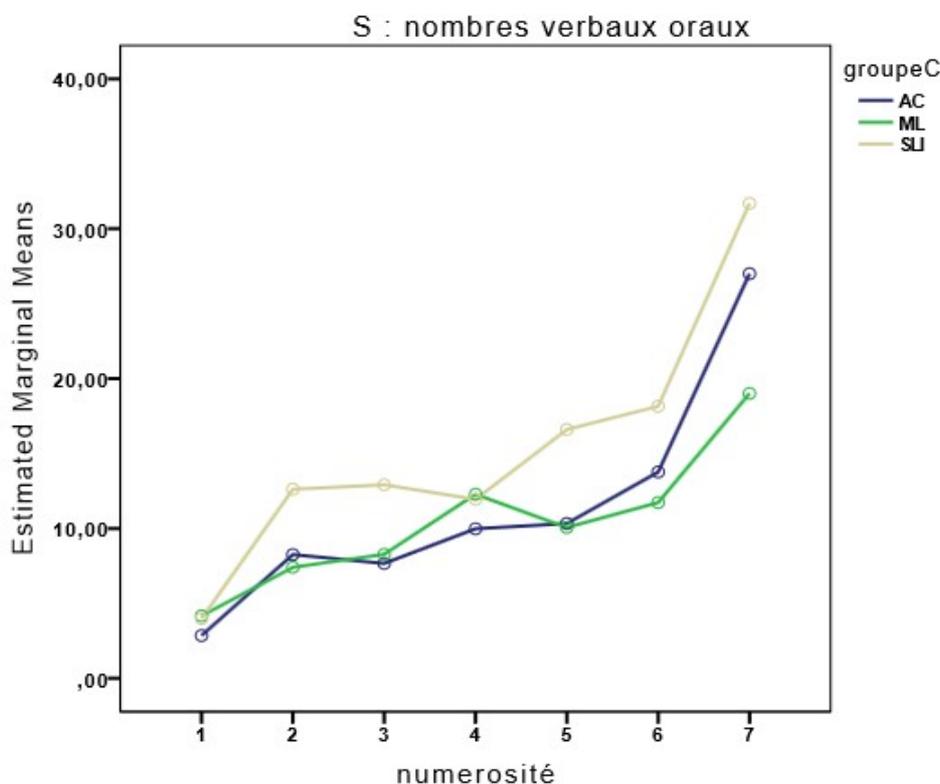
Même si l'ANOVA précédemment réalisée n'a pas permis de mettre en évidence une interaction entre les groupes et les conditions, nous avons examiné de plus près le comportement de chaque groupe dans chaque condition.

En effet, nous cherchons à déterminer dans quelle mesure un déficit langagier influence la représentation sémantique du nombre. Au regard du modèle du triple code, nous supposons que le déficit langagier entraîne un déficit du code verbal : les estimations qui utilisent un code symbolique (NVO et NA) devraient être moins précises chez les enfants du groupe DYS que chez les enfants du même âge chronologique. En revanche, nous prévoyons que les tâches non symboliques seront mieux réussies par les enfants du groupe DYS.

Nous évaluerons enfin les corrélations entre les conditions d'estimation symboliques et non symboliques pour les trois groupes afin de vérifier leurs interactions au regard de notre modèle théorique.

2.2.1. Les conditions avec entrées symboliques

2.2.1.1. La condition NVO

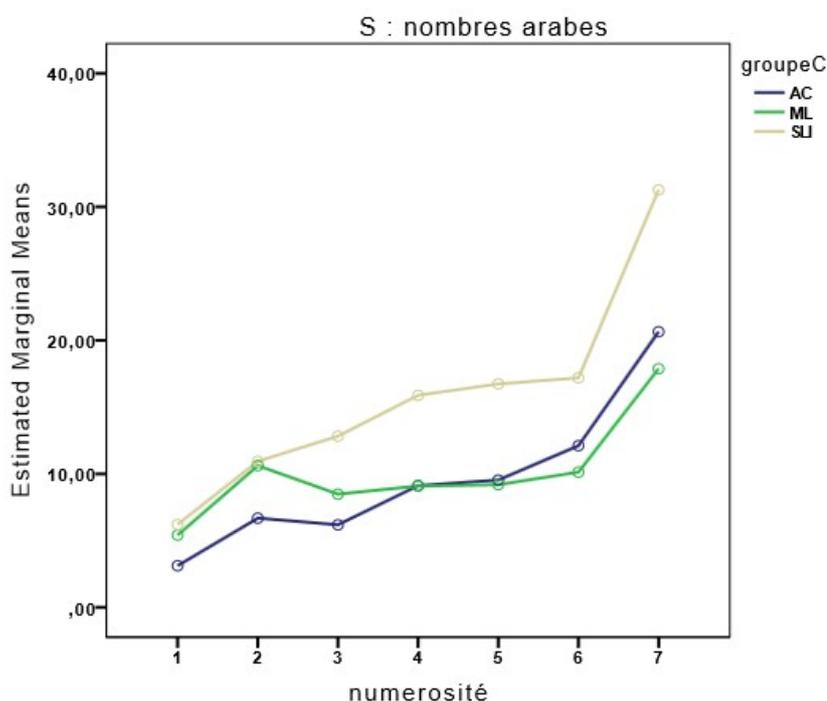


Graphique n°1 : Mesure d'erreurs pour les trois groupes dans les 7 numérosités de la condition NVO

Pour la condition **NVO**, une ANOVA à mesures répétées à deux facteurs (7 numérosités x 3 groupes) montre un effet de numérosité ($F(6,306) = 23.493$; $p \leq .001$). En revanche, nous ne mesurons pas d'effet de groupe.

Donc dans la condition NVO, les enfants DYS ne se comportent pas différemment des autres groupes contrôles.

2.2.1.2. La condition NA



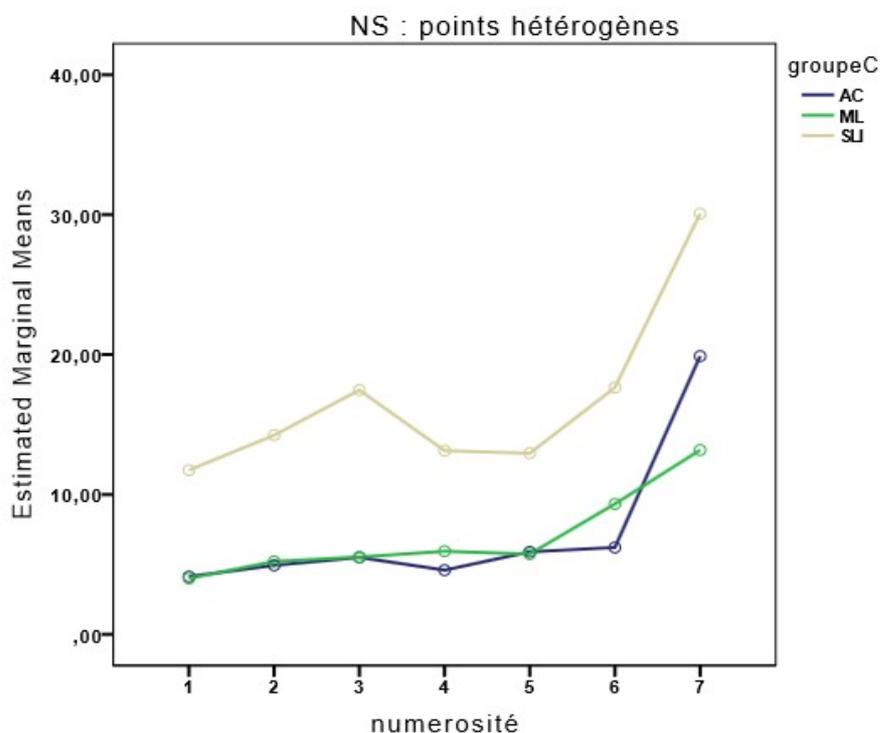
Graphique n°II : Mesure d'erreurs pour les trois groupes dans les 7 numérosités de la condition NA

Une ANOVA à mesures répétées à deux facteurs (7 numérosités x 3 groupes) montre un effet de numérosité ($F(6,306) = 27.742$; $p \leq .001$) et un effet marginal du groupe ($F(1,51) = 2.692$; $p = .077$). Une analyse post hoc révèle que les groupes AC et DYS sont significativement différents ($p = .042$), que les groupes ML et DYS sont marginalement différents ($p = .060$) alors que les groupes ML et AC ne le sont pas ($p = .871$).

Donc dans la condition NA, le groupe DYS est moins précis que les groupes contrôles.

2.2.2. Les conditions avec entrée non-symbolique

2.2.2.1. La condition He



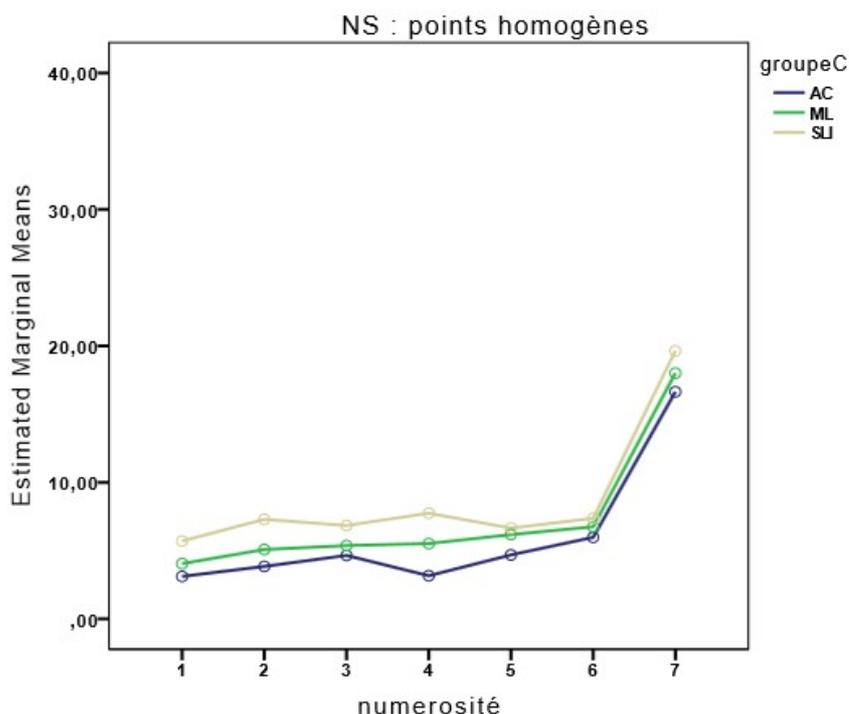
Graphique n°III : Mesure d'erreurs pour les trois groupes dans les 7 numérosités de la condition He

Une ANOVA à mesure répétée (7 numérosités X 3 groupes) montre un effet de numérosité ($F(6,306) = 31.426$; $p \leq .001$), un effet marginal du groupe ($F(1,51) = 2.520$; $p = .090$) et une interaction groupe X numérosité ($F(12,306) = 1.832$; $p = .043$). Cela signifie que les groupes ne se comportent pas de la même manière en fonction des numérosités.

L'analyse post-hoc révèle que le groupe SLI est marginalement différent des groupes AC ($p = .062$) et ML ($p = .054$). Les groupes contrôles ne sont pas significativement différents ($p = .949$).

Donc dans la condition He, le groupe DYS est moins précis que les groupes contrôles.

2.2.2.2. La condition Ho



Graphique n°IV : Mesure d'erreurs pour les trois groupes dans les 7 numérosités de la condition Ho

Pour la condition Ho, une ANOVA à mesures répétées à deux facteurs (7 numérosités x 3 groupes) montre un effet de numérosité ($F(6,306) = 65.288$; $p \leq .001$) mais pas d'effet de groupe : il n'existe pas de différence significative entre les groupes DYS et AC ($p = .067$), ni entre les groupes DYS et ML ($p = .321$) ni entre les groupes contrôles ($p = .390$).

Donc dans la condition Ho, les enfants DYS ne se comportent pas différemment des autres groupes contrôles.

2.2.3. Conclusion intermédiaire

En conclusion, les enfants DYS sont donc moins précis dans les tâches d'estimation avec entrée non symbolique He et symbolique NA .

2.2.4. Corrélation entre les conditions

Pour l'ensemble des sujets ($N = 54$), la condition NVO est significativement corrélée à la condition NA ($p = .001$) et à la condition Ho ($p = .024$). De plus, la

condition NA est significativement corrélée à la condition Ho ($p = .030$). En revanche, la condition He n'est corrélée à aucune autre condition.

Pour l'ensemble des sujets, la précision des estimations dans les conditions symboliques (NA et NVO) et la condition non symbolique Ho corrèle.

Pour les enfants du groupe DYS, seule la condition NA et la condition NVO sont corrélées ($p = .001$). Les conditions He et Ho ne sont corrélées à aucune autre condition (Tableau VI).

	NVO	NA	HO
DYS (N=18)			
HE	P = .956	P = .538	P = .877
NVO		P = .001 **	P = .270
NA			P = .608

Tableau n°VI : Corrélation entre les conditions pour le groupe DYS

Chez les enfants du groupe DYS, la précision des estimations dans les conditions symboliques (NA et NVO) sont corrélées entre elles. Cependant, la précision des estimations dans les conditions non-symboliques ne sont pas corrélées entre elles.

2.3. Analyse de la précision du système numérique approximatif (N=54)

2.3.1. Hypothèse de l'existence d'un lien entre la précision du SNA et l'âge

Pour l'ensemble des sujets, l'âge est uniquement corrélé aux conditions NVO ($p = .031$), et Ho ($p = .005$). Notons que la condition He n'est jamais corrélée à l'âge.

Lorsque nous analysons toutefois précisément les corrélations entre l'âge et les conditions selon les populations nous observons d'une part des corrélations avec les conditions NVO ($p = .014$) et NA ($p = .002$) dans la population témoin (N = 36) qui n'existent pas dans le groupe DYS. D'autre part, nous révélons pour le groupe DYS l'existence d'une unique corrélation entre l'âge et la condition Ho ($p = .001$), qui

bénéficie d'un traitement visuo-spatial et qui est partagée par les groupes contrôles ($p = .011$).

Donc, si l'âge améliore la précision du SNA chez les enfants sans troubles du langage, ce n'est pas le cas pour la population du groupe DYS. Nous émettons ainsi l'hypothèse qu'un trouble du langage persistant ne permet pas de préciser le SNA.

2.3.2. Hypothèse de l'existence d'un lien entre la précision du SNA et les performances aux épreuves numériques

Chez l'ensemble des sujets ($N = 54$) :

- le comptage est significativement corrélé aux conditions NVO ($p = .007$) et Ho ($p = .001$).

- les activités de transcodages sont corrélées aux conditions NVO ($p = .002$), NA ($p = .014$) et Ho ($p = .001$).

- le score total au TTR est corrélé aux conditions NVO ($p = .004$), NA ($p = .002$) et Ho ($p = .001$).

- la réussite aux gnosies digitales est corrélée aux conditions Ho ($p = .025$) et NVO ($p = .001$).

Les compétences numériques pour l'ensemble de la population sont corrélées à la précision du SNA dans les conditions NVO et Ho, souvent dans la condition NA mais la condition non-symbolique He n'est jamais corrélée aux épreuves numériques.

2.3.3. Hypothèse d'un lien entre la précision du SNA et les épreuves d'empan

Pour l'ensemble des sujets, la précision des estimations est corrélée à l'empan auditivo-verbal seulement pour la condition NA ($p = .018$).

L'empan visuo-spatial est lui corrélé uniquement à la condition Ho ($p = .001$).

Donc, une imprécision des estimations dans la condition Ho devra être analysée au regard de la mesure de l'empan visuo-spatial ; tout comme une imprécision des estimations dans la condition NVO devra être analysée au regard de la mesure de l'empan auditivo-verbal.

2.3.4. Hypothèse d'un lien entre la précision du SNA et le langage

Chez l'ensemble des sujets (N = 54), le score brut à l'EVIP est corrélé aux conditions NVO ($p = .002$), NA ($p = .002$) et Ho ($p = .001$).

Donc, dans notre étude, meilleur est le niveau de compréhension lexicale, meilleures sont les estimations.

2.3.5. Conclusion pour la précision du SNA

Cette première analyse nous renseigne sur les paramètres qui influencent la précision du SNA dans l'ensemble de la population. Les estimations sont d'autant plus précises que les performances numériques exactes ou le lexique réceptif sont bons.

L'empan visuo-spatial est fortement corrélé à la condition Ho et l'empan auditivo-verbal à la condition NVO.

Toutefois, nous observons des dissociations : pour le groupe DYS, l'âge n'est pas corrélé à la précision des estimations alors que c'est le cas pour les groupes contrôles. **Nous émettons ainsi l'hypothèse qu'un trouble du langage persistant ne permet pas de préciser le SNA.**

Pour enrichir notre étude, nous allons chercher des dissociations à la faveur d'une analyse comparative des performances du groupe DYS au regard des groupes contrôles (AC et ML).

3. Résultats aux épreuves de pré-testing

Mesures	Dysphasiques	Contrôles	
	(DYS) (n=18)	Âge chronologique (AC) (n=18)	Niveau de langage (ML) (n=18)
	Moyenne (ET)	Moyenne (ET)	Moyenne (ET)
Langage			
Score brut à l'EVIP	117.22 (21.71)	146.06 (21.42)	130.60 (28.13)
Mémoire visuo-spatiale			
Empan visuo-spatial	5.94 (1.21)	6.88 (1.37)	5.55 (1.72)
Mémoire auditivo-verbale			
Empan auditivo-verbal	4.33 (.76)	6.22 (1.21)	5.55 (1.50)
Aptitudes intellectuelles non-verbales			
Score brut au WISC IV(matrices)	44.55 (8.63)	59.00 (11.51)	55.61 (7.99)

Tableau n°VII : Moyennes (M) et écarts-types (ET) des trois groupes aux épreuves contrôles.

3.1. Langage

Comme nous l'avons vu précédemment, les groupes ML et DYS ne présentent pas de scores bruts significativement différents à l'EVIP ($p = .100$). La différence des résultats entre ML et AC est marginale ($p = .059$). En revanche, on observe une différence significative du score brut à l'EVIP entre les groupes AC et DYS ($p = .001$).

Le groupe DYS a une compréhension lexicale inférieure au groupe AC et similaire au groupe ML.

3.2. Aptitudes intellectuelles non verbales

Les sujets du groupe DYS ont des performances non-verbales inférieures au groupe AC ($p = .001$) mais similaires à celles du groupe ML ($p = .095$). Par ailleurs, le groupe AC a des performances significativement supérieures à celles du groupe ML. ($p = .049$).

Dans notre étude, les difficultés éventuelles numériques chez les DYS ne peuvent donc être expliquées par des aptitudes non verbales faibles.

3.3. Résultat à l'empan visuo-spatial

Une analyse ANOVA à un facteur inter-sujet a été menée sur la variable empan visuo-spatial pour comparer les performances des trois groupes d'enfants à l'épreuve de mémoire visuo-spatiale de notre testing. Celle-ci montre une différence significative entre les moyennes d'empan visuo-spatial dans les trois groupes ($F(2,53) = 4.027 ; p = .024$).

Des analyses a posteriori (LSD) indiquent que la moyenne des empan visuels est significativement plus basse dans le groupe ML que dans le groupe AC ($p = .008$). En revanche, si la différence des moyennes à l'empan visuo-spatial entre les groupes DYS et AC est marginale ($p = .056$) elle n'est pas significative entre les groupes DYS et ML ($p = .425$).

Les enfants plus jeunes (ML) ont un empan visuo-spatial moindre. En ce qui concerne les enfant du groupe DYS, si leur empan moyen est comparable aux enfants contrôle ML, il est en revanche plus petit que celui du groupe AC.

3.4. Résultat à l'empan auditivo-verbal

Une analyse ANOVA à un facteur intergroupe sur le score à l'empan auditivo-verbal souligne un effet significatif entre la moyenne des performance des trois groupes d'enfants à l'épreuve de mémoire auditivo-verbales ($F(2,53) = 11.453$; $p < .001$).

Les analyses post hoc (LSD) mettent en évidence que la moyenne de l'empan auditivoverbal est significativement plus faible chez les enfants dysphasiques par rapport aux enfants de même âge chronologique ($p = 0.001$) mais aussi par rapport à celui des enfants de même niveau de langage ($p = .04$).

Le groupe d'enfants dysphasiques a un empan auditivo-verbal inférieur à celui des enfants de même âge chronologique et de même niveau de langage.

3.5. Conclusions pour les épreuves de pré-test

Concernant le groupe DYS, les scores à l'épreuve d'aptitudes intellectuelles non-verbales et le score à l'empan visuo-spatial sont comparables à ceux du groupe ML et inférieur à celui du groupe AC.

Par ailleurs, l'empan auditivo-verbal moyen du groupe DYS est inférieur à celui des deux groupes contrôles.

4. Les épreuves de compétences numériques

Mesures	Dysphasiques	Contrôles	
	(DYS) (n=18)	Âge chronologique (AC) (n=18)	Niveau de langage (ML) (n=18)
	Moyenne (ET)	Moyenne (ET)	Moyenne (ET)
Gnosies digitales	17.89 (3.31)	19.56 (1.34)	19.17 (1.47)
Comptage	11.33 (1.14)	11.83 (.38)	11.67 (.69)
Transcodages			
ESD	19.22 (2.10)	19.89 (.32)	19.22 (2.37)
LVH	18.72 (2.74)	20.01(.001)	19.22 (2.26)
Total	37.94 (4.82)	39.89 (.32)	38.40 (4.59)
Tempo-test Rekenen			
TTR additions	20.67 (6.90)	25.44 (6.02)	21.56 (8.23)
TTR soustractions	15.50 (6.78)	20.61 (6.40)	17.78 (7.82)
TTR total	36.17 (13.42)	46.06 (11.93)	39.33 (15.60)

Tableau n°VIII : Moyennes et écarts-types des trois groupes aux épreuves de compétences numériques.

4.1. Capacité pré-symbolique, gnosies digitales

Une comparaison (ANOVA) sur la variable du score à l'épreuve met en évidence une différence des performances perceptivo-tactiles entre les trois groupes ($F(2,53) = 2.76$; $p = .073$).

Une analyse post hoc (LSD) montre que les enfants DYS ont des résultats significativement plus faibles que les enfants du groupe AC ($p = .029$) et ne diffèrent pas de ceux du groupe ML ($p = 0.91$). Les résultats des groupes contrôles ne diffèrent pas entre eux ($p = 0.60$). Le score de dispersion montre des résultats plus hétérogènes chez le groupe cible que chez les groupes contrôles. La présence d'éventuels troubles associés, fréquents chez les enfants dysphasiques et notamment la dyspraxie (Hill, 1998) pourrait expliquer cette hétérogénéité.

Les enfants dysphasiques ont donc des performances perceptivo-tactiles digitales inférieures aux enfants de même âge chronologique et similaires aux enfants de même niveau linguistique.

4.2. Comptage

Une ANOVA à un facteur groupe a été réalisée sur la variable du score de comptage. Elle ne montre pas de différence significative entre les scores moyens de l'épreuve de comptage des trois groupes ($F(2,53) = 1.831, p = .71$).

Le niveau de comptage n'est donc pas significativement différent entre les trois groupes.

Les enfants dysphasiques de notre étude ont donc un niveau de comptage comparable aux enfants de même niveau de langage et de même âge chronologique.

4.3. Compréhension du système numérique, transcodages

4.3.1. Lecture à voix haute

Une analyse ANOVA à un facteur groupe sur le score en lecture à voix haute de nombres ne met pas en évidence de différence significative entre les trois groupes ($F(2,53) = 1.773 ; p = .180$).

4.3.2. Ecriture sous dictée

Une analyse ANOVA à un facteur intergroupe sur le score en écriture sous dictée n'indique pas de différence significative entre les trois groupes ($F(2,53) = .791 ; p = .46$).

4.3.3. Transcodages

Une analyse ANOVA à un facteur intergroupe sur le score en transcodage n'indique pas de différence significative entre les trois groupes ($F(2, 53) = 1.239 ; p = .298$)

Le groupe d'enfants dysphasiques a donc des performances globales de transcodages similaires aux enfants de même niveau de langage et de même âge chronologique.

4.4. Calcul

Une analyse ANOVA entre les trois groupes menée sur le score total aux épreuves du TTR (addition et soustraction) montre une différence significative entre les trois groupes ($F(2,53) = 2.433$; $p = .098$).

Une analyse post hoc indique une différence significative entre les enfants du groupe DYS et les enfants contrôles AC ($p = .036$). En revanche, on n'observe pas de différence significative entre les enfants du groupe DYS et ceux du groupe ML ($p = .492$) ni entre les groupes ML et AC ($p = .148$).

Les enfants dysphasiques de notre groupe ont des compétences exactes significativement plus faibles que celles des enfants de même âge chronologique et similaires à celles des enfants de même niveau linguistique.

4.4.1. Additions du Tempo-Test Rekenen

La résolution des différents faits arithmétiques ne faisant pas appel à des processus identiques (Lee & Kang, 2002), deux ANOVA ont été réalisées.

La première, avec la variable "score addition", ne signale pas une différence significative entre les trois groupes ($F(2,53) = 2.300$; $p = .111$).

Une analyse post hoc (LSD) met en évidence une différence significative entre les enfants dysphasiques et les enfants de même âge chronologique ($p = .049$). En revanche, la moyenne des scores entre les enfants du groupe DYS et les enfants du groupe ML n'est pas significativement différente ($p = .709$). Il en est de même pour les groupes ML et AC ($p = .107$).

Les performances des enfants dysphasiques à cette épreuve d'addition sont donc significativement inférieures à celles des enfants de même âge chronologique.

4.4.2. Soustractions du Tempo-Test Rekenen

La seconde ANOVA, concerne la variable "score soustraction". L'analyse indique une différence significative entre les trois groupes de l'étude ($F(2,53) = 2.39$; $p = .102$).

L'analyse post hoc des résultats révèle une différence significative entre les enfants dysphasiques et les enfants contrôles de même âge chronologique ($p = .$

034). En revanche, les scores ne sont pas significativement différents entre les enfants dysphasiques et les enfants de même niveau de langage ($p = .335$).

Il n'existe pas de différence significative des résultats en soustractions entre les groupes ML et AC ($p = .232$).

Les performances des enfants du groupe DYS à l'épreuve chronométrée de soustractions sont donc inférieures à celles des enfants de même âge contrôle et similaires à celles des enfants de même niveau de langage.

4.5. Conclusions pour les épreuves de compétences numériques

D'une part, cette deuxième analyse comparative ne révèle pas de différence dans le niveau de maîtrise du comptage par les enfants du groupe DYS ni dans les performances en transcodages. Ces résultats seront toutefois discutés : l'épreuve n'est pas chronométrée et ne rend pas compte des techniques compensatoires observables pour les transcodages de grands nombres ou le support au comptage.

D'autre part, les performances perceptivo-tactiles digitales des enfants du groupe DYS sont inférieures à celles des enfants de même âge chronologique et similaires à celles des enfants de même niveau linguistique, comme leurs performances en faits arithmétiques.

5. Corrélations entre les épreuves

5.1. Taille des empan

5.1.1. Empan visuo-spatial

Nous avons vu précédemment que les enfants du groupe DYS sont marginalement plus faibles que les enfants du groupe AC à l'épreuve de mémoire visuo-spatiale. Or cette épreuve est corrélée pour l'ensemble de la population à la condition d'estimation H_0 ($p = .001$).

Nous avons également étudié le lien entre les performances arithmétiques et l'empan visuo spatial : chez les groupes témoins comme chez le groupe DYS, l'empan visuo-spatial est corrélé aux transcodages ($p = .009$) et aux calculs en additions ($p = .033$) et soustractions ($p = .046$).

5.1.2. Empan auditivo-verbal, mémoire de travail

Nous avons précédemment vu que les sujets du groupe DYS ont une mémoire de travail auditivo-verbale moindre que les enfants des groupes contrôles. Or cette épreuve est corrélée pour l'ensemble de la population à la condition d'estimation NA ($p = .018$).

Nous avons également étudié le lien entre les performances arithmétiques et l'empan auditivo-verbal : chez les groupes témoins l'empan est corrélé aux calculs additifs et soustractifs ($p = .001$) et au comptage ($p = .026$). Pour le groupe DYS nous trouvons une corrélation avec les soustractions au TTR ($p = .012$) et la lecture à voix haute de chiffres ($p = .051$). Notons que l'empan AV est marginalement corrélé au score total à l'épreuve de transcodage ($p = .060$).

Les épreuves qui font intervenir le code arabe semblent exiger une mobilisation de la mémoire de travail auditivo-verbale.

5.1.3. Conclusion

Les faiblesses des enfants du groupe DYS en empan visuo-spatial ou empan auditivo-verbal peuvent être en cause dans la faiblesse de leurs performances numériques.

5.2. Lexique

Nous avons vu précédemment que le groupe DYS a un score à l'EVIP inférieur au groupe AC et marginalement inférieur au groupe ML.

Par ailleurs, pour toute la population le score à l'EVIP est corrélé aux conditions NVO ($p = .002$), NA ($p = .002$) et Ho ($p = .001$).

Pour le groupe DYS, le score à l'EVIP est corrélé à toutes les tâches numériques et à l'empan auditivo-verbal.

Le score à l'EVIP augmente avec la précision des estimations dans les conditions à entrée symboliques et semble être lié à la performance aux tâches numériques.

5.3. Gnosies

L'âge est corrélée aux gnosies pour le groupe tout-venant mais pas pour le groupe DYS. Donc, les enfants du groupe DYS n'améliorent pas leurs représentations pré-symboliques perceptivo-tactiles avec l'âge.

Or les gnosies sont très corrélées chez les DYS aux transcodages ($p = .006$) Enfin, les gnosies pour l'ensemble de la population sont corrélées à la condition NVO.

Le lien entre les transcodages de représentations symboliques et les représentations pré-symbolique digitales est pertinent. De même, ces représentations semblent être liées à la précision de le SNA.

Discussion

L'objectif principal de ce mémoire est de participer à la compréhension de la représentation du nombre chez les enfants dysphasiques. Plus largement, nous tenterons de contribuer à l'étude de l'implication des capacités langagières sur les compétences numériques exactes et approximatives.

De nombreuses études se sont intéressées aux compétences numériques exactes des enfants dysphasiques. Elles révèlent une dissociation entre la compréhension de la conception du nombre et la représentation numérique verbale (Nys et al., 2013). En effet, si la compréhension du principe de comptage est préservée chez les enfants dysphasiques, la chaîne verbale est limitée et difficilement manipulable (Cowan et al., 2005). D'autres auteurs rapportent également des troubles de récupération des faits arithmétiques (Fazio 1996), des procédures de comptage immatures (Koponen et al., 2006) ou encore des difficultés de dénombrement (Fazio 1994, Koponen 2006).

En revanche, peu de recherches ont été consacrées aux capacités numériques approximatives chez les enfants dysphasiques. Si les études de Donlan (1998, 1999, 2007) rapportent des performances déficitaires dans des tâches de comparaison de nombre (NA) et concluent à un système numérique approximatif moins précis chez ces enfants, Nys et collaborateurs (2013) nuancent ces résultats. Les capacités approximatives du nombre dans les tâches de comparaisons chez les enfants dysphasiques seraient liées à l'entrée des stimuli : ces enfants auraient des compétences préservées si l'entrée est non symbolique (tâche de comparaison de points) et déficitaires si l'entrée est symbolique (tâche de comparaison NA). Les capacités de comparaison symboliques se précisant avec l'âge chez ces enfants, les difficultés pour les tâches d'estimations à entrée symbolique seraient liées à un manque d'expérience et non à des difficultés de traitement des symboles (Nys et al., 2013).

D'après l'étude de Nys (2013), les capacités numériques approximatives seraient préservées alors que les capacités numériques exactes seraient déficitaires chez les enfants dysphasiques (Nys et al., 2013). Ces conclusions rejoindraient la théorie de Dehaene qui postule l'existence de deux systèmes numériques pour le traitement de grandes quantités : un système numérique inné de base de représentations numériques approximatives indépendant du langage et un système numérique exact qui, sous l'influence du langage et de l'enseignement, permettrait l'acquisition des compétences numériques exactes (Dehaene, 2001).

1. Notre étude

Pour étudier la précision du SNA, l'ensemble des études répertoriées dans la littérature ont été réalisées à l'aide de tâches de comparaison qui permettent uniquement un choix binaire. Les résultats obtenus par ces tâches ne sont pas généralisables pour l'étude du SNA (Smets et al., 2015). En revanche, la tâche d'estimation est davantage sensible aux différences individuelles entre les groupes laissant une plus grande liberté de production pour les réponses.

Dans cette étude, les compétences numériques approximatives sont évaluées à partir de quatre tâches d'estimation distinctes par les stimuli (deux conditions non symboliques : Ho, He ; deux conditions symboliques NVO et NA). De plus, notre batterie compte des épreuves évaluant les compétences linguistiques (lexique en réception), les compétences numériques exactes (transcodage, comptage), une épreuve pré-symbolique (gnosies) et des épreuves d'empans (auditivo-verbal et visuo-spatial).

Ainsi, afin de déterminer si les compétences linguistiques influencent le développement des compétences numériques exactes et approximatives, les capacités numériques et les capacités linguistiques d'enfants dysphasiques (groupe cible) ont été comparées à celles d'enfants de même âge chronologique (AC) et de même niveau linguistique (ML).

L'ensemble des données ont été analysées pour répondre à ces deux questions centrales :

- 1) Les résultats aux épreuves évaluant les capacités numériques approximatives sont-ils identiques chez les enfants dysphasiques et chez les enfants du même âge chronologique ?
- 2) Si les résultats aux épreuves d'estimation chez les enfants dysphasiques sont plus faibles, quels sont les facteurs qui peuvent expliquer ce déficit ?

2. Rappel des hypothèses au regard de la théorie de Dehaene (1992)

2.1. Epreuves de compétences numériques exactes

Les performances des enfants dysphasiques seront déficitaires par rapport à celles des enfants contrôles de même âge chronologique validant ainsi l'influence du langage pour la construction du système numérique exact.

2.2. Epreuves de compétences numériques approximatives

2.2.1. Les conditions non symbolique (Ho et He)

Les enfants dysphasiques auront des compétences égales aux enfants du groupe AC soutenant ainsi l'hypothèse de l'indépendance du SNA et du langage.

•

2.2.2. Les conditions symboliques (NVO et NA)

Si nous supposons que le déficit langagier entraîne un déficit du code verbal : l'estimation NVO serait donc plus imprécise chez les enfants du groupe DYS que chez les enfants du groupe AC.

Concernant NA, si les chiffres arabes activent la même ligne numérique mentale qui code les numérosités non symboliques sans recodage verbal (Dehaene 1992), les enfants dysphasiques devraient donc avoir des capacités d'estimation NA similaires aux enfants AC. Cependant, si on observe une différence, avant de conclure à l'influence du langage, nous devons vérifier s'il s'agit d'un manque d'expérience de manipulation du nombre symbolique de ces enfants dysphasiques (Nys et al., 2013).

En revanche, si le développement de la représentation du nombre est lié au langage, les compétences numériques approximatives chez les enfants dysphasiques devraient être inférieures à celles des enfants de même âge chronologique et ce, dans les quatre conditions de l'épreuve d'estimation.

3. Principaux résultats

3.1. Les compétences numériques approximatives pour le groupe DYS

Dans la littérature, il semble admis que la qualité des représentations approximatives des enfants SLI est équivalente à celle des enfants contrôles de même âge chronologique (Koponen et al., 2006).

Au regard de la numérosité libre, l'augmentation du score d'erreur témoigne d'une structuration des représentations numériques sur une ligne numérique mentale (Dehaene, 1995). La précision des estimations est toutefois moindre pour le groupe DYS et en particulier dans les conditions NA et He.

Selon ces premières données, le langage soutiendrait le développement du sens du nombre. Cependant, ces résultats sont-ils vérifiés chez l'ensemble de notre population ? Existe-t-il aussi d'autres facteurs influençant la précision du SNA ?

3.2. Les facteurs influençant la précision du SNA

3.2.1. Les compétences numériques exactes

Lorsque nous considérons l'ensemble de la population, nous trouvons une corrélation entre la précision de le SNA dans les conditions symboliques (NA, NVO) et non symboliques (Ho) et le score au TTR, mais également avec le score en transcodages. Le niveau de comptage est en outre corrélé à la précision des estimations dans les conditions Ho et NVO. Ces résultats confortent donc ceux d'Halberda et collaborateurs (2008) qui mettent en évidence un lien potentiel entre la précision du SNA et la réussite en mathématiques.

Des études (Holloway & Ansari 2009 ; Lonnemann, Linkersdörfer, Hasselhorn, & Lindberg 2011 ; Mundy & Gilmore 2009 citées par Mussolin et al., 2014) rapportent un lien négatif entre la précision du SNA et les capacités mathématiques pour la comparaison de numérosités non symboliques. Cependant, nous remarquons que l'ensemble de ces recherches ont été réalisées avec des tâches de comparaisons de petites numérosités (inférieures à 10).

Nos résultats tendent à confirmer l'hypothèse de Mussolin et collaborateurs (2014) : le SNA serait donc moins engagé dans la comparaison de petites numérosités mais davantage dans les grandes numérosités. Travailler avec des

grandes numérosités rendrait donc l'épreuve d'estimation de notre testing davantage sensible pour l'étude du SNA.

Les données de notre expérience couplées aux recherches actuelles semblent donc confirmer l'existence d'un lien entre capacité d'approximation et performance mathématique. Cependant, ces données ne fournissent pas d'indice sur les liens de causalité entre la performance mathématique et la précision du SNA.

3.2.2. L'âge

Nous observons un effet d'âge dans la population sans trouble du langage : les enfants plus âgés sont plus précis dans les tâches d'estimation. Ces données sont confirmées par de nombreuses expériences (Libertus, Feigenson, & Halberda 2011 ; Gilmore, Mc Carthy, & Spelke 2010 ; Inglis, Attridge, Batchelor, & Gilmore 2011, cités par Mussolin 2014) : on observe une forte amélioration des capacités de discrimination approximative du nombre au cours des premières années de vie, suivie d'une amélioration progressive jusqu'à l'âge adulte.

Cet effet semble être, par une maturation de la zone du cerveau responsable du SNA, indépendante du langage (Piazza, 2010). Or, contrairement à l'étude de Nys et collaborateurs (2013), nous notons une absence de l'effet de l'âge chez les enfants du groupe DYS. Bien que leurs capacités numériques exactes s'améliorent au fil du temps, leurs performances dans les tâches d'estimation n'augmentent pas.

L'âge, l'expérience et l'enseignement explicite des nombres ne seraient donc pas les seuls responsables de la précision du SNA. Comme le remarque Durkin (2013), la persistance des difficultés numériques des enfants SLI ne peut être considérée indépendamment du langage.

3.2.3. Le niveau linguistique

Selon Dehaene (2001), la représentation sémantique du nombre est indépendante du langage. Or, pour l'ensemble de la population de notre étude, plus le niveau lexical est élevé, plus l'estimation est précise.

Ces données sont à mettre en lien avec les résultats de l'épreuve d'estimation : même si les enfants du groupe DYS sont capables d'estimer des nombres, leurs compétences approximatives sont plus faibles que celles de leurs pairs.

Ainsi, ces résultats témoignent de l'influence du langage sur la précision du sens du nombre.

3.3. Recherche de liens de causalité pour le groupe DYS

Les compétences numériques approximatives des enfants du groupe DYS n'augmentent pas avec l'âge et restent inférieures à celles de leurs pairs. Nous allons donc tenter de comprendre les facteurs pouvant entraver ces performances.

3.3.1. Les compétences numériques exactes du groupe DYS

3.3.1.1. Le comptage

Selon Nys et collaborateurs (2013), la maîtrise de la comptine numérique est une compétence socle pour l'accès aux habiletés numériques. Pour le groupe DYS, les capacités de comptage sont fortement corrélées aux résultats des différentes épreuves de compétences numériques exactes (transcodage, calcul).

Cette analyse confirme l'interdépendance du niveau de comptage et des autres capacités numériques exactes.

3.3.1.2. Niveau de comptage pour le groupe DYS

Les données actuelles convergent vers l'existence de difficultés persistantes en comptage chez les enfants SLI (Cowan, 2008 ; Koponen 2006).

Dans notre étude, l'analyse comparative ne révèle pas de différence entre le niveau de maîtrise du comptage des enfants du groupe DYS par rapport à leur pairs. La population testée étant plus âgée, l'effet plafond de l'épreuve peut expliquer ce résultat.

En revanche, nous relevons qualitativement une lenteur dans ce groupe. Ces observations sont appuyées par l'étude de Fazio (1999) : si la comptine peut se préciser pour les enfants SLI vers l'âge de 11 ans, il note la persistance d'un déficit en vitesse de récupération. Notre épreuve d'évaluation du comptage n'étant pas chronométrée, nous n'avons pas pu objectiver cette donnée.

3.3.1.2.1. Hypothèses explicatives

Selon Fayol (2013), la longueur des unités lexicales de la chaîne de comptage semble jouer un rôle dans leur rétention et implique une charge cognitive dans les tâches qui font intervenir la mémoire de travail auditivo-verbale. De plus, le déficit de mémoire de travail auditivo-verbale des enfants SLI est pour certains à l'origine du trouble numérique.

Si dans notre étude, les enfants du groupe DYS ont effectivement un empan auditivo-verbal très chuté, l'empan auditivo-verbal n'est pas corrélé au niveau de comptage. Les résultats ne nous permettent pas de relier les difficultés de l'empan auditivo-verbal aux performances de comptage chez les enfants du groupe DYS.

Selon Koponen (2006), le niveau de vocabulaire est corrélé au comptage verbal. Dans notre étude, nous remarquons que le score brut à l'EVIP est corrélé aux capacités de comptage. Cette analyse conforte les recherches de Koponen.

Dans notre étude, pour les enfants du groupe DYS, le niveau de comptage est corrélé au lexique en réception mais pas à l'empan auditivo-verbal. Une épreuve plus sensible portant sur de plus grands nombres et chronométrée devrait être réalisée pour confirmer ou infirmer le lien entre comptage et l'empan auditivo-verbal.

3.3.1.3. Corrélation entre le comptage et les épreuves d'estimation

Rousselle et collaborateurs (2004) ont montré que des enfants avec de mauvaises capacités de comptage n'étaient pas en capacité de discriminer des collections visuelles. Cette étude suggère un lien bi-directionnel entre les capacités de comptage et d'approximations. Le comptage permettrait également d'élaborer une ligne analogique précise et exacte (Fazio, 1996).

Dans notre étude, l'épreuve NVO est fortement corrélée au niveau de comptage. Le code oral s'active dans cette condition ce qui pourrait expliquer le lien avec les capacités de comptage, lesquelles influencent également la condition Ho (non symbolique). De plus, nous observons que les enfants DYS sont moins précis dans les grandes estimations que leurs pairs et ce, dans toutes les conditions. Ces résultats sont peut-être à relier avec leur difficulté de comptage dans les grands nombres. Ces hypothèses devront être objectivées grâce à une épreuve d'évaluation du comptage plus sensible.

La maîtrise du code oral permet d'accéder à une meilleure précision dans la condition verbale NVO et non verbale Ho.

Notre étude n'a pas permis d'objectiver l'existence de difficultés de comptage chez les enfants DYS. L'existence d'un lien entre capacités de comptage et d'approximations dans des conditions verbales et non verbales a été en revanche objectivée.

3.3.2. Le transcodage

3.3.2.1. Niveau des transcodages pour le groupe DYS

Chez l'enfant SLI, il existe selon la littérature des dissociations entre la maîtrise des codes arabe et auditivo-verbal.

Dans notre étude, le groupe d'enfants dysphasiques a des performances globales de transcodages similaires aux enfants de même niveau de langage et de même âge chronologique. Il nous paraît cependant important d'apporter à cette analyse objective une précision clinique : les difficultés rencontrées par les enfants du groupe DYS dans les transcodages de grands nombres ne sont pas objectivées par cette épreuve. Il serait intéressant de réévaluer la maîtrise des grands nombres avec une épreuve plus fine. De plus, nous remarquons que si l'ensemble des enfants tout-venant obtiennent la note plafond (20/20) après l'âge de 8 ans, cette note n'est obtenue que plus tard pour les enfants du groupe DYS.

3.3.2.1.1. Hypothèses explicatives

Selon le modèle ADAPT de Barouillet (2002), le transcodage des nombres ne nécessite pas de passer par une représentation de la quantité à laquelle le nombre réfère mais engage des processus asémantiques. De plus, Imbo (2014) met en lien les capacités de transcodages et la faiblesse de la mémoire de travail. Dans notre étude, les capacités de transcodages ne sont pas corrélées aux résultats de l'empan auditivo-verbal mais sont liées aux résultats de l'EVIP (lexique en réception) et à l'empan visuo-spatial. D'après nos résultats, le langage serait impliqué dans les activités de transcodage.

En conclusion, la connaissance des chiffres arabes des sujets DYS de notre étude est confirmée. En revanche, nos observations qualitatives et l'influence du langage dans les résultats de transcodage ne soutiennent pas la possibilité d'un transcodage asémantique, avancé par le modèle de Barouillet (2002) et Dehaene (1995).

3.3.2.2. Corrélation entre les transcodages et les estimations

Dans notre étude, les capacités de transcodages sont fortement corrélées aux capacités d'estimations dans les conditions NVO, NA et Ho. Cette analyse tend à confirmer l'existence d'un lien entre les capacités numériques exactes et les capacités numériques approximatives (Halberda et al., 2008).

Les enfants du groupe DYS ont des résultats significativement différents de ceux des deux groupes contrôles dans les conditions NA. Nys et collaborateurs (2013) émettent l'hypothèse que les difficultés d'approximation du nombre arabe viennent d'une expérience numérique moindre, due au niveau scolaire. Or, ici, nous notons que les enfants dysphasiques ont des capacités de transcodages similaires aux groupes contrôles. Ainsi, les résultats significativement différents des enfants du groupe DYS dans la condition NA ne peuvent être expliqués par une méconnaissance des chiffres arabes.

3.3.3. Niveau des compétences arithmétiques pour le groupe DYS

La littérature s'accorde sur les déficits arithmétiques précoces et persistants (Fazio 1999 ; Nys et al., 2013) chez les enfants SLI.

Nos résultats, mesurés à l'aide de l'épreuve du TTR, sont en accord avec les études précédentes : les enfants dysphasiques de notre groupe ont des compétences arithmétiques significativement plus faibles que celles des enfants de même âge chronologique.

Pour Koponen (2006), les enfants du groupe DYS auraient un niveau supérieur aux enfants de même niveau linguistique (vitesse et précision). Ces résultats ne sont pas retrouvés dans notre étude qui conforte plutôt l'étude de Cowan (2008) : les deux groupes ont un niveau similaire. Qualitativement, nous relevons une bonne précision chez les enfants DYS. Ces observations laissent supposer que leurs résultats inférieurs seraient dus à des stratégies coûteuses en temps (Fazio 1999 ; Koponen 2006). Une comparaison temps/précision objective aurait été intéressante pour répondre à ces interrogations.

3.3.3.1. Hypothèses explicatives

Les difficultés arithmétiques des enfants SLI sont la résultante du déficit linguistique (Donlan et al., 2007 ; Nys 2013). Pour l'équipe de Nys, seuls les déficits

en phonologie expliquent ce résultat. Dans notre étude, le score à l'EVIP, évaluant le niveau de lexique en réception corrèle au niveau arithmétique : le niveau lexical semble ainsi déterminer les compétences arithmétiques des enfants DYS.

Dans la littérature, une corrélation entre niveau de calcul et mémoire auditivo-verbale est aussi évoquée (Fazio 1999 ; Camos 2006). Nos résultats sont en accord pour les enfants tout-venants mais pas pour les enfants DYS. Chez ces derniers, si les résultats en opération soustractives sont corrélés à l'empan auditivo-verbal, ce n'est pas le cas pour les opérations additives. Or, les opérations additives reposeraient sur une stratégie linguistique de récupération des mots-nombres et les soustractions dépendraient d'un traitement visuo-spatial (Lee & Kang 2002). De plus, nous n'observons pas de dissociation de résultats entre les deux types d'opérations.

Nous émettons l'hypothèse que les enfants du groupe DYS ont élaboré des stratégies compensatoires de résolution de faits arithmétiques, en raison de la faiblesse de leur mémoire auditivo-verbale. Cela expliquerait l'absence de corrélation entre ces deux épreuves.

3.3.3.2. Corrélation entre les compétences arithmétiques et les épreuves d'estimation

Les capacités arithmétiques sont fortement corrélées aux épreuves d'estimation des conditions NVO, NA et Ho. Ces résultats semblent donc confirmer l'existence d'un lien entre les capacités d'approximations et les performances mathématiques mais n'indiquent pas les liens entre le niveau de calcul et la précision du SNA.

3.3.4. Conclusion intermédiaire à propos des compétences numériques exactes pour le groupe DYS

La moyenne d'âge de la population du groupe DYS étant de 13 ans, leurs compétences numériques de base (comptage, transcodage) semblent donc se normaliser avec le temps. Cependant, nos observations révèlent des difficultés dans les grands nombres. Les difficultés arithmétiques des enfants DYS décrites dans la littérature sont retrouvées dans notre étude. Ces compétences sont fortement corrélées aux épreuves numériques approximatives.

3.4. Les gnosies digitales, outils pré-symboliques

3.4.1. Les gnosies digitales pour les enfants du groupe DYS

Fayol (1998) avance un lien chez l'enfant entre les performances perceptivo-tactiles et les compétences arithmétiques.

Les performances perceptivo-tactiles digitales des enfants du groupe DYS sont inférieures à celles des enfants de même âge chronologique et similaires à celles des enfants de même niveau linguistique, comme c'est le cas pour leurs performances en faits arithmétiques.

Cependant, contrairement aux enfants du groupe tout-venant, le niveau des gnosies n'est pas corrélé au score du calcul exact concernant le groupe DYS. De plus, les enfants de ce groupe n'améliorent pas leurs représentations pré-symboliques perceptivo-tactiles avec l'âge alors que leurs résultats en calcul exact s'améliorent. D'autres facteurs doivent donc expliquer le résultat des performances arithmétiques chez les enfants DYS.

Les capacités pré-symboliques sont déficitaires et persistantes chez les enfants du groupe DYS. L'existence de troubles associés persistants peut expliquer ce résultat. Si nos résultats confirment un lien entre performances perceptivo-tactiles et compétences arithmétiques chez les enfants tout-venants, ce lien n'existe pas chez les enfants DYS qui utilisent sans doute d'autres stratégies pour la résolution de calcul.

3.4.2. Corrélation entre gnosies digitales et épreuves d'estimation

Chez les DYS, les capacités perceptivo-tactiles ne s'améliorent pas avec l'âge à l'image des compétences approximatives. Le support visuel et psychomoteur à la représentation analogique du nombre serait-il un facteur pour la précision du SNA ? Pour l'ensemble de la population, les gnosies sont corrélées aux conditions NVO et Ho.

3.5. Déficit symbolique

Certains auteurs ont supposé que les difficultés numériques observées chez les enfants SLI sont expliquées par un déficit dans le traitement des informations numériques (Kamhi, 1981; Morehead & Ingram, 1973; Stone & Connell, 1993 cité par Nys et al., 2013). Selon cette hypothèse, nous aurions observé des performances

altérées chez les enfants dysphasiques dans les tâches approximatives symboliques (NVO et NA) et des performances préservées chez dans les tâches d'approximations non symboliques (Ho et He). Or, dans dans notre étude, nous ne notons pas de dissociation de performances stricte entre les épreuves non symboliques (He, Ho) et les épreuves symboliques (NA, NVO). En effet, les enfants du groupe DYS sont moins performants que leurs pairs dans les épreuves He et Na.

Les résultats ne corroborent pas l'hypothèse d'un déficit symbolique.

3.6. Déficits linguistiques et capacités approximatives

3.6.1. Condition hétérogène (He)

Le sens du nombre est indépendant du langage (Dehaene, 1995). Ainsi, l'hypothèse de notre mémoire était que les enfants DYS auraient des performances d'approximation similaires aux enfants d'âge chronologique dans les tâches non symbolique (Ho et He). Or, ils sont significativement moins précis dans la condition He.

3.6.1.1. Hypothèses explicatives

Dans la condition He, les paramètres physiques sont contrôlés : les variables physiques continues de points varient avec la numérosité. Ainsi, l'enfant perçoit toujours la même quantité noircie pour toutes les numérosités. Il existe donc une incongruence visuo-spatiale. A titre comparatif, la condition Ho où les paramètres physiques ne sont pas contrôlés (la surface noircie augmente avec les numérosités) est davantage réussie. Ces résultats rejoignent les observations de Lafay (2013) : les estimations sont plus précises lorsqu'il existe une congruence visuo-spatiale.

Les données laissent donc supposer que les enfants dysphasiques sont plus sensibles aux paramètres physiques qu'aux numérosités. D'ailleurs leur calepin visuo-spatial est plus efficient que l'empan auditivo-verbal. Cette compétence serait-elle surinvestie par ces enfants ?

Pour expliquer la différence significative avec les enfants des groupes contrôles, suggérons qu'il est possible que les enfants tout-venants aient recours à un recodage verbal pour accéder à des représentations sémantiques du nombre plus précises.

3.6.2. Condition nombre arabe (NA)

Les nombres arabes seraient traités par un module de représentation arabe, distinct et autonome du module verbal (Dehaene, 1995). Or, dans notre étude, les enfants dysphasiques sont significativement moins précis dans la condition NA.

3.6.2.1. Hypothèses explicatives

Si Nys et collaborateurs (2013), émettent l'hypothèse d'un manque d'expérience scolaire pour expliquer les performances déficitaires en comparaison de NA, dans notre étude cette hypothèse ne peut s'appliquer. En effet, les capacités d'approximation en NA chez les DYS sont aussi inférieures à celles des enfants ML. Par ailleurs, ils ont un niveau de connaissance des nombres similaires aux enfants AC et ML. Nous notons également que la condition NA est fortement corrélée à l'EVIP. D'après ces résultats, le traitement du NA pourrait nécessiter un traitement verbal.

La condition NVO étant réussie, nous pouvons émettre l'hypothèse d'une surcharge cognitive. L'épreuve d'empan auditivo-verbal nous renseigne particulièrement sur le coût cognitif des transcodages : une mobilisation de la mémoire de travail auditivo-verbale forte est requise. Or, rappelons que cette mémoire est déficitaire pour le groupe DYS. Aussi, l'épreuve d'estimation en condition NA est significativement échouée pour le groupe DYS. Donc nous émettons l'hypothèse que cette épreuve requiert un recodage auditivo-verbal très coûteux sur le plan cognitif, ce qui altérerait la précision des estimations.

3.7. Conclusion intermédiaire de la discussion

D'après le modèle du triple code, le développement du langage et l'enseignement sont essentiels pour développer les capacités numériques exactes. Les difficultés de comptage, transcodage et de calcul des enfants dysphasiques observées dans de nombreuses expériences (Fazio, 1994, 1996, 1999 ; Arvedson, 2002 ; Cowan et al., 2005 ; Koponen et al., 2006 ; Donlan et al., 2007 ; Durkin et al., 2013) valident cette théorie. Toutefois, les résultats de notre étude sont plus contrastés : si nous notons des difficultés dans les tâches de calcul pour les enfants dysphasiques, ces derniers obtiennent des performances similaires à celles des sujets des groupes contrôles pour les tâches de comptage et de transcodage. Si

nous considérons l'épreuve chronométrée du calcul comme la plus sensible, les performances en compétences exactes des enfants dysphasiques sont déficitaires par rapport à celles des enfants contrôles de même âge chronologique validant ainsi, l'influence du langage pour la construction du système numérique exact.

Selon Dehaene (1995), les capacités d'approximation du nombre sont innées et indépendantes du langage. Cette hypothèse est partiellement validée dans notre étude. En effet, les analyses montrent que les enfants dysphasiques sont capables de réaliser des estimations attestant d'une représentation sémantique en une ligne numérique mentale. Cependant, elles sont davantage imprécises et significativement différentes dans deux conditions (symboliques NA et non symbolique He). Le langage permettrait de préciser la représentation sémantique du nombre. Les résultats s'accordent donc peu à la conception de Dehaene.

4. Critiques méthodologiques

4.1. Le testing

D'abord, les épreuves du Tedimath en transcodage et en comptage sont peu sensibles. En effet, elles ne sont pas étalonnées pour l'étendue d'âge de notre population et nous observons un effet plafond à ces épreuves. L'analyse qualitative nous permet de répertorier des tendances observées pour le groupe DYS.

D'une part, à l'épreuve de transcodages, plusieurs enfants de ce groupe ont spontanément eu recours à l'utilisation des doigts pour maintenir la quantité. Cette observation est liée à la surcharge cognitive mise en jeu par cette épreuve qui ne transparait pas quantitativement : ces techniques compensatoires sont efficaces. Même si elles ralentissent le traitement, le fait que les épreuves ne soient pas chronométrées ne permet pas de rendre compte de cet effet.

De plus, à l'épreuve de comptage, les scores du groupe DYS et du groupe AC ne sont pas significativement différents mais l'analyse qualitative nous montre qu'il existe un effet plafond : les enfants du groupe AC ont un score très élevé. La différence des scores n'est donc pas significative mais si l'on analysait plus précisément la tâche de comptage, en ajoutant des items et notamment des items concernant les grands nombres, une distinction dans la maîtrise du comptage apparaîtrait certainement.

Ensuite, lorsque nous considérons les normes correspondant aux scores à l'EVIP, nous notons une moyenne haute pour la population témoin. Notons que l'EVIP a été étalonnée à partir d'une population canadienne. Ces résultats pourraient nous questionner sur notre appariement mais il n'existe pas de différence significative entre les groupes lorsque l'on considère cette variable. Nos groupes sont correctement appariés. De plus, les normes de l'EVIP sont à manier avec précaution : il a été démontré qu'elles sous-estiment le vocabulaire des enfants franco-québécois âgés de six à douze ans car l'échantillon d'étalonnage inclut de nombreux enfants bilingues (Thodardottir, Kehayia, Lessard, Sutton, & Trudeau, 2010).

La sélection d'une épreuve de lexique en réception pour rendre compte d'un niveau linguistique global est également critiquable : nous aurions pu proposer un corpus d'épreuves et établir un score composite comme c'est le cas dans quelques études mais la conséquence d'un allongement du testing sur les performances des enfants aurait généré un autre biais. De plus, nous nous sommes accordés avec la littérature scientifique qui utilise de manière générale l'EVIP dans ce type d'études. Toutefois, il nous semble pertinent de questionner ce choix. Nys et collaborateurs (2013) établissent d'ailleurs que parmi les épreuves linguistiques, ce sont les épreuves phonologiques qui sont le plus corrélées aux capacités numériques.

Enfin, nous nous interrogeons sur la pertinence de la condition He pour l'évaluation des compétences numériques approximatives. En effet, chez l'ensemble de la population, aucune corrélation n'a été retrouvée entre celle-ci et les autres épreuves numériques (NVO, NA, Ho et compétences numériques exactes). Dans cette condition, les paramètres physiques contrôlés rendent l'estimation plus difficile à réaliser. Les sujets se sont sans doute appuyés davantage sur le perceptif plutôt que le numérique.

4.2. Échantillon de population

Le recrutement de notre échantillon de population constitue un biais : concernant la population témoin, il aurait fallu procéder à un tirage au sort pour que cet échantillon soit représentatif. Nous avons pour des raisons pratiques décidé de recruter dans nos départements de résidence.

En outre, nous avons pu recruter des participants dans notre entourage direct ou par l'intermédiaire de réseaux, ce qui constitue un biais de niveau socio-culturel.

Initialement, nous avons décidé de recruter des enfants âgés de six à quinze ans. C'est la rencontre de grands adolescents dysphasiques qui a fait évoluer notre recrutement. Nous étions en particulier intéressées par la question de l'effet de l'âge sur les compétences numériques de ces enfants. L'étude d'une population de grands enfants, rare dans la littérature, constitue finalement une force en nous permettant de nous intéresser aux déficits qui persistent au cours du temps. Notons qu'il existe une étude complémentaire menée par Aude Gérardy, étudiante en Master de logopédie de l'Université Catholique de Louvain-la-Neuve. Elle s'intéresse dans le même temps à des enfants dysphasiques belges, plus jeunes.

Le groupe DYS est également hétérogène selon le critère de la scolarité : certains enfants bénéficient d'aménagements pédagogiques ou d'enseignement spécialisé alors que d'autres sont en inclusion sans aménagements.

Enfin, une variable non mesurée est la présence ou l'absence d'antécédents de prise en charge orthophonique des déficits numériques.

5. Apport au champ de l'orthophonie

Nous avons vu précédemment que les estimations des enfants du groupe DYS en condition NA sont significativement inférieures à celles des enfants des groupes contrôles.

Selon Nys et collaborateurs (2013), ce déficit peut être interprété comme signe d'un manque d'entraînement à la manipulation des nombres arabes chez la population avec trouble du langage. Dans cette optique, les modalités de prise en charge orthophonique des difficultés numériques des enfants avec une dysphasie pourraient s'appuyer sur un entraînement de la manipulation des nombres arabes. Concrètement on proposera au patient de s'entraîner à positionner des nombres arabes sur une modélisation de la ligne numérique mentale. On pourra éventuellement entraîner l'enfant à positionner les résultats des calculs écrits.

En outre, si l'on postule que la difficulté des enfants dysphasiques en estimations de nombres arabes relève du déficit linguistique, et plus particulièrement d'une charge en mémoire auditivo-verbale tributaire du recodage verbal opéré lors de la tâche, alors ce serait un entraînement des transcodages, un renforcement des liens entre les représentations en modalité auditivo-verbale, arabe, analogique et éventuellement pré-symbolique (représentation canonique des doigts pour les petites

numérosités) qui serait envisagé dans la prise en charge. Ainsi, en renforçant ces transcodages, nous renforçons l'accès aux représentations auditivo-verbales et facilitons le recodage verbal. Nous espérons ainsi améliorer l'acuité du SNA pour les deux conditions symboliques.

Par ailleurs, il existe une étude pilote sur le programme « Rightstart » d'éveil à la numératie, menée en Finlande. Il s'agit d'une étude cas-témoin comportant deux groupes : l'un constitué de neuf enfants avec trouble spécifique du langage et scolarisés dans l'enseignement spécialisé (moyenne d'âge = 6,11 ans), l'autre constitué de 29 enfants sans trouble du langage (moyenne d'âge = 6,2 ans). Le pré-test de l'étude comporte des épreuves de raisonnement non-verbal (matrices de Raven), une épreuve de lexique en réception (adaptation finnoise de l'EVIP), des épreuves d'évaluation des compétences numériques de base (comptage, connaissances conceptuelles du nombre, classification, sériation, correspondance terme à terme) et la batterie standardisée d'évaluation des habiletés numériques et de calcul « BANUCA » qui recense une épreuve chronométrée de comparaison de grands nombres, des épreuves de calculs, de raisonnement arithmétique et de transcodages. Le programme « RightStart » repose sur plusieurs principes fondamentaux. D'une part, le système linguistique qui régit les noms des nombres est transparent (e.g., « quatorze » se dit « dix-quatre »). Nous avons vu précédemment que les enfants chinois étaient plus précocement meilleurs dans la connaissance des noms des nombres, Le programme a d'autre part pour principe d'encourager l'enfant à recourir au subitizing pour l'identification de petites numérosités et le recours à des groupements par 5 ou 10 objets lors de l'identification de grandes numérosités. Enfin, la visualisation et la manipulation de matériel concret sont permanentes et la progression va du concret (abaques) vers des représentations plus abstraites (cartes, nombres arabes). Les enfants de l'étude ont amélioré significativement leur comptage, leurs compétences en comparaison de grandes magnitudes codées en nombres arabes et leurs performances en résolution de faits arithmétiques. Le déficit persiste toutefois dans les tâches de raisonnement arithmétique et dans les transcodages de grandes numérosités. Nous avons choisi de présenter cette étude dans la mesure où ses résultats nous semblent particulièrement intéressants au regard de notre étude et aussi parce que les principes fondamentaux sont applicables en rééducation.

Conclusion

Notre étude avait pour but d'identifier dans la population d'enfants dysphasiques la nature des compétences numériques préservées et celle des compétences déficitaires. Au delà, il s'agissait de préciser les données de la littérature, actuellement peu nombreuses, au sujet des représentations numériques approximatives des enfants avec trouble langagier. Ces données nous renseignent sur le développement même de la cognition numérique chez le sujet typique.

En comparant les résultats du groupe d'enfants dysphasiques à ceux des groupes d'enfants de même âge chronologique ou de même niveau linguistique, nous contrôlons les effets de la maturation. L'échantillon final comporte 36 sujets contrôles et 18 sujets dysphasiques. Nous avons fait passer un protocole papier-crayon d'épreuves de compétences numériques exactes, de compétences cognitives générales et une épreuve informatisée d'estimation de numérosités dans quatre conditions.

Nous avons ensuite procédé à l'analyse statistique des données afin de répondre à nos hypothèses.

Nos résultats suggèrent que les enfants avec trouble du langage ont un système de représentation approximatif (SNA) moins précis que les enfants sans trouble du langage. Ce système s'organise toutefois structurellement de la même manière que celui de leurs homologues, selon une ligne numérique mentale. Cependant, la précision du SNA n'est pas corrélée à l'âge pour notre groupe DYS. Donc, la persistance du trouble langagier restreint l'acuité numérique.

En particulier, le système approximatif en modalité « nombre arabe » est très déficitaire pour ce groupe. Nous avons cherché à comprendre pourquoi.

Nos analyses suggèrent que le SNA se précise avec le langage et avec la maîtrise des compétences numériques exactes. La littérature suggère que les compétences en comptage, transcodages et résolution de faits arithmétiques sont déficitaires chez les enfants avec trouble langagier. Nous ne retrouvons que partiellement ces résultats dans la tâche arithmétique et pas dans les tâches de comptage et transcodages réussies par l'ensemble de notre population d'étude. Toutefois, ce résultat est discutable car les épreuves plafonnent et n'objectivent ni les temps de latence observés, ni la faible maîtrise des grands nombres ni l'utilisation de stratégies compensatoires.

Enfin, les analyses témoignent d'un coût cognitif dans certaines activités : les transcodages, l'estimation de nombres arabes, et la résolution de faits arithmétiques

sont corrélées à la mémoire de travail auditivo-verbale très déficitaire chez les enfants dysphasiques. Nous suggérons donc que l'activité d'estimation en condition symbolique fait intervenir un recodage verbal systématique.

Ces résultats nous renseignent sur les déficits des patients avec trouble du langage mais mériteraient de s'étendre aux stratégies utilisées par ces patients. En effet, par l'observation et la rencontre avec ces enfants et leurs parents, nous avons pu comprendre que les stratégies de compensations sont mises en place chez ces enfants. Il nous paraît très intéressant d'établir une recherche à ce sujet. D'autres poursuites de mémoire seraient particulièrement intéressantes concernant la validation d'un protocole de rééducation des compétences numériques chez des enfants présentant un trouble spécifique du langage oral. Nous proposons plusieurs perspectives : d'une part celle d'un entraînement des compétences pré-symboliques comme catalyseur du développement des codes symboliques qui aurait un effet direct sur les transcodages et donc sur la précision du SNA ; d'autre part celle de l'entraînement systématisé des transcodages (des trois codes : auditivo-verbal, arabe et analogique) avec l'hypothèse d'une amélioration de l'acuité des représentations approximatives dans les modalités symboliques ; enfin, celle d'un entraînement au placement de nombres arabes sur une ligne numérique mentale.

Bibliographie

Abboud, S., Maidenbaum, S., Dehaene, S., & Amedi, A. (2015). A number-form area in the blind. *Nature Communications*, 6, 6026.

Adams, A.-M. & Gathercole, S.-E. (2000). Limitations in working memory: implications for language development. *International Journal of Language and Communication Disorders*, 35, 1, 95-116.

American Psychiatric Association, DSM-IV-TR. (2000). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders*. Paris, Elsevier-Masson.

Arvedson, P. J. (2002). Young children with specific language impairment and their numerical cognition. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 45(5), 970–982.

Baroody, A. J., & Dowker, A. (2003). *The development of arithmetic concepts and skills: Constructing Adaptive Expertise*. Erlbaum, Mahwah, New Jersey.

Barrouillet, P. (2002). Un nouveau modèle de transcodage des nombres : aspects développementaux, neuropsychologiques et computationnels, 105–108.

Benton, A.L., Hutcheon, J., Seymour, E. (1951). Arithmetic ability, finger-localization capacity and right-left discrimination in normal and defective children. *Am J Orthopsychiatry*. 21, 756-766

Berteletti, I., Lucangeli, D., Piazza, M., Dehaene, S., & Zorzi, M. (2010). Numerical estimation in preschoolers. *Developmental Psychology*, 46(2), 545-551.

Bishop, D. V. (1992). The underlying nature of specific language impairment. *Journal of child psychology and psychiatry*, 33(1), 3–66.

Bishop, D. V., North, T., & Donlan, C. (1996). Nonword repetition as a behavioural marker for inherited language impairment: evidence from a twin study. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines*, 37(4), 391-403.

Bishop, D. V. M., & Snowling, M. J. (2004). Developmental Dyslexia and Specific Language Impairment: Same or Different? *Psychological Bulletin*, 130(6), 858-886.

Botting, N., & Conti-Ramsden, G. (2001). Non-word repetition and language development in children with specific language impairment (SLI). *International Journal of Language & Communication Disorders*, 36(4), 421-432.

Botting, N., Faragher, B., Simkin, Z., Knox, E., & Conti-Ramsden, G. (2001). Predicting pathways of specific language impairment: what differentiates good and poor outcome? *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines*, 42(8), 1013-1020.

Brin, F. (2011). *Dictionnaire d'orthophonie*. Isbergues : Ortho Edition.

Chevrie-Muller, C. (2007). *Le langage de l'enfant aspects normaux et pathologiques*. Issy-les-Moulineaux: Elsevier Masson.

Camos, V., Fayol M., Lacert P., Bardi A., Laquière C. (1998). *Le dénombrement chez des enfants dysphasiques et des enfants dyspraxiques*. ANAE

Camos, V. (2006). Les premiers apprentissages. In P. Barrouillet & V. Camos (Eds), *La cognition mathématique chez l'enfant* (pp.71-86). Marseille : Solal.

Camos, V. (2011). La cognition numérique chez l'animal et le bébé. In M. Habib (Eds.), *Calcul et Dyscalculies : des modèles à la rééducation* (pp.17-28). Issy-les-Moulineaux : Elsevier Masson.

Carey, S. (2001). Cognitive foundations of arithmetic: Evolution and ontogenesis. *Science*, 282(5389), 641-642.

Carey, S. (2004). Bootstrapping & the origins of concepts, *Daedalus*, 133(1), 59-68.

CIM-10 / ICD-10. (2000) *Classification internationale des troubles mentaux et des troubles du comportement : critères diagnostiques pour la recherche*. Paris : Masson.

Cohen, M. J. (2001). *CMS - Echelle clinique de mémoire pour enfants*. Paris : Editions du Centre de Psychologie Appliquée.

Conti-Ramsden, G., St Clair, M.-C., Pickles, A., & Durkin, K. (2012). Developmental Trajectories of Verbal and Nonverbal Skills in Individuals With a History of Specific Language Impairment: From Childhood to Adolescence. *Journal of Speech Language and Hearing Research*, 55(6), 1716.

Cordes, S., Gelman, R., Gallistel, C. R., & Whalen, J. (2001). Variability signatures distinguish verbal from nonverbal counting for both large and small numbers. *Psychonomic Bulletin & Review*, 8(4), 698-707.

Cowan, R., Donlan, C., Newton, E.-J., & Llyod, D. (2005). Number Skills and Knowledge in Children With Specific Language Impairment. *Journal of Educational Psychology*, 97(4), 732.

Cowan, R. (2008). Why children differ in their mathematical attainment at primary school? *Anales De Psicología*, 24(2), 180-188.

Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44, 1-42.

Dehaene, S., & Akhavein, R. (1995). Attention, automaticity, and levels of representation in number processing. *Journal of experimental psychology : learning, Memory and Cognition*, 21(2), 314-326.

Dehaene, S., & Cohen, L. (1995). Towards an anatomical and functional model of number processing. *Mathematical Cognition*, 1, 83-120.

Dehaene, S. (2001). Précis of « number sense ». *Mind and Language*.

Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., & Cohen, L. (2003). Tree parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology*, 20(3-6), 487-506.

Dehaene, S. (2003). The neural basis of the Weber–Fechner law: a logarithmic mental number line. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(4), 145-147.

Dehaene, S. (2004). Arithmetic and the brain. *Current Opinion in Neurobiology*, 14(2), 218-224.

Dehaene, S. (2010). *La bosse des maths: quinze ans après*. Paris: O. Jacob.

De Vos, T. (1992). Tempo Test Rekenen (TTR). Nijmegen: Berkhout

De Weck, G. (1996). *Troubles du développement du langage : perspectives pragmatiques et discursives*. Lausanne-Paris: Delachaux et Niestlé

Di Luca, S., & Pesenti, M. (2011). Finger Numeral Representations : More than Just Another Symbolic Code. *Frontiers in Psychology*, 2.

Donlan, C. (1998). Number without language? Studies of children with specific language impairments. In C. Donlan (Eds.), *The development of mathematical skills* (pp. 255–274). Hove: Psychology Press.

Donlan, C., & Gourlay, S. (1999). The importance of nonverbal skills in the acquisition of place-value knowledge: Evidence from normally-developing and language-impaired children. *British Journal of Developmental Psychology*, 17, 1–19.

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.

Dunn, L.M., Thériault-Whalen, C.M., and Dunn, L.M. (1993) Echelle de Vocabulaire en Images Peabody. Toronto: Psycan.

Durkin, K., Mok, P. L. H., & Conti-Ramsden, G. (2013). Severity of specific language impairment predicts delayed development in number skills. *Frontiers in Psychology*, 4.

Fayol, M. (1998). Predicting arithmetical achievement from neuro-psychological performance: a longitudinal study. *Cognition*, 68(2), B63-B70.

Fayol, M. (2013). *L'acquisition du nombre*. Paris : Presses universitaires de France.

Fazio, B. B. (1994). The Counting Abilities of Children With Specific Language Impairment: A Comparison of Oral and Gestural Tasks. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 37(2), 358–368.

Fazio, B. B. (1996). Mathematical abilities of children with specific language impairment: a 2-year follow-up. *Journal of Speech and Hearing Research*, 39(4), 839-849.

Fazio, B. B. (1999). Arithmetic calculation, short-term memory, and language performance in children with specific language impairment: a 5-year follow-up. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research: JSLHR*, 42(2), 420-431.

Feigenson, L., Dehaene, S., & Spelke, E. (2004). Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(7), 307-314.

Fey, M. E., & Leonard, L. B. (1983). Pragmatic skills of children with specific language impairment. In T. Gallagher and C. Prutting (Eds.), *Pragmatics issues: Assessment and intervention* (pp. 65-82). San Diego: College-Hill Press.

Fuson, K. C. (1988). *Children's Counting and Concepts of Number*. New York, NY: Springer New York.

Gelman, R., & Gallistel, C. R. (1978). *The child's understanding of number*. Cambridge, Mass: Harvard University Press.

Gelman, R., & Butterworth, B. (2005). Number and language: how are they related? *Trends in Cognitive Sciences*, 9(1), 6-10.

Gérard, C.-L. (1993). *L' enfant dysphasique: évaluation et rééducation*. Bruxelles: De Boeck Université.

Graciabafalluy, M., & Noel, M.-P. (2008). Does finger training increase young children's numerical performance? *Cortex*, 44(4), 368-375.

Habib M. (2011). *Calcul et dyscalculies: Des modèles à la rééducation*. Issy-les-Moulineaux: Elsevier Masson.

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.

Hill, E.-L. (1998). A dyspraxic deficit in specific language impairment and developmental coordination disorder? Evidence from hand and arm movements. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 40(6), 388-395.

Hill, E.-L. (2001). Non-specific nature of specific language impairment: a review of the literature with regard to concomitant motor impairments. *International Journal of Language & Communication Disorders / Royal College of Speech & Language Therapists*, 36(2), 149-171.

Imbo I., Vanden Bulcke C., De Brauwer J., & Fias W. (2014) Sixty-four or four-and-sixty? The influence of language and working memory on children's number transcoding. *Front. Psychol.* 5:313.

Izard, V., Pica, P., Spelke, E., & Dehaene, S. (2008). Comment les nombres se répartissent dans l'espace? Une intuition originelle logarithmique. *Médecine sciences: M/S*, 24(12), 1014–1016.

Jordan, N. C., Kaplan, D., Ramineni, C., & Locuniak, M. N. (2009) Early math matters: Kindergarten number competence and later mathematics outcomes. *Developmental Psychology*, 45, 850-867.

Kleemans, T., Segers, E., & Verhoeven, L. (2011). Cognitive and linguistic precursors to numeracy in kindergarten: Evidence from first and second language learners. *Learning and Individual Differences*, 21(5), 555-561.

Kleemans, T., Segers, E., & Verhoeven, L. (2012). Naming speed as a clinical marker in predicting basic calculation skills in children with specific language impairment. *Research in Developmental Disabilities*, 33(3), 882-889.

Kohnert, K., Windsor, J., & Ebert, K. D. (2009). Primary or « specific » language impairment and children learning a second language. *Brain and Language*, 109(2-3), 101-111.

Koponen, T., Mononen, R., Rasanen, P., & Ahonen, T. (2006). Basic numeracy in children with specific language impairment: Heterogeneity and connections to language. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 49(1), 58–73.

Koponen, T., Aunola, K., Ahonen, T., & Nurmi, J.-E. (2007). Cognitive predictors of single-digit and procedural calculation skills and their covariation with reading skill. *Journal of Experimental Child Psychology*, 97(3), 220-241.

Lafay, A., Saint-Pierre, M.-C., & Macoir, J. (2013). Développement des systèmes numériques non symboliques et prédicteurs de réussite mathématique. *Glossa*, 112, 1-17.

Lafay, A., Saint-Pierre, M.-C., & Macoir, J. (2015). Revue narrative de littérature relative aux troubles cognitifs numériques impliqués dans la dyscalculie développementale: Déficit du sens du nombre ou déficit de l'accès aux représentations numériques mentales? *Canadian Psychology/Psychologie Canadienne*, 56(1), 96-107.

Law, J., Boyle, J., Harris, F., Harkness, A., & Nye, C. (2000). Prevalence and natural history of primary speech and language delay: findings from a systematic review of the literature.

Leclercq, A.-L., & Maillart, C. (2014). Dysphasie: Réflexions autour de la définition et des critères diagnostiques. *Les entretiens de Bichat: les entretiens d'orthophonie 2014: Les« dys », état de l'art et orientations cliniques.*

Lee, K.-M., & Kang, S.-Y. (2002). Arithmetic operation and working memory: differential suppression in dual tasks. *Cognition*, 83(3), B63-B68.

Leonard, L.-B. (1981). Facilitating linguistic skills in children with specific language impairment. *Applied Psycholinguistics*, 2, 89-118.

Leonard, L.-B. (2014). Children with Specific Language Impairment and their Contribution To the Study of Language Development. *Journal of child language*, 41(01), 38-47.

Leslie, A.-M., Gelman, R., & Gallistel, C.-R. (2008). The generative basis of natural number concepts. *Trends in Cognitive Sciences*, 12(6), 213-218.

Maillart C. (2012). *Les dysphasies de l'évaluation à la rééducation*. Issy-les-Moulineaux: Elsevier Masson.

Mazzocco, M.-M.-M., & Thompson, R.-E. (2005), Kindergarten Predictors of Math Learning Disability. *Learning Disabilities Research & Practice*, 20: 142–155.

Mazeau, M. (2014). *Neuropsychologie et troubles des apprentissages chez l'enfant du développement typique aux dys-* (Neuropsychologie). Paris: Elsevier-Masson.

Monfort, M. (2001). *L'intervention dans les troubles graves de l'acquisition du langage et les dysphasies développementales une proposition de modèle interactif*. Isbergues: Ortho Edition.

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*, 18(6), 550-575

Mussolin, C., Nys, J., Leybaert, J., & Content, A. (2014). How approximate and exact number skills are related to each other across development: A review. *Developmental Review*

Noël M.-P. (2005). *La dyscalculie trouble du développement numérique de l'enfant*. Marseille: Solal.

Noël, M.-P. (2011). la dyscalculie développementale : déficits cognitifs sous-jacents et bases neurofonctionnelles. In M. Habib (Eds.), *Calcul et Dyscalculies : des modèles à la rééducation*. Issy-les-Moulineaux : Elsevier Masson.

Nys, J., Content, A., & Leybaert, J. (2013). Impact of Language Abilities on Exact and Approximate Number Skills Development: Evidence From Children With Specific Language Impairment. *Journal of Speech Language and Hearing Research*, 56(3), 956.

Oram, J., Fine, J., Okamoto, C., & Tannock, R. (1999). Assessing the Language of Children With Attention Deficit Hyperactivity Disorder. *American Journal of Speech-Language Pathology*, 8(1), 72.

Olswang, L. B., Rodriguez, B., & Timler, G. (1998). Recommending Intervention for Toddlers with Specific Language Learning Difficulties *American Journal of Speech-Language Pathology*, (7), 23-32

Parisse, C., & Maillart, C. (2006). Interférences entre phonologie et syntaxe en pathologie développementale du langage. *Langage et l'Homme (Le): Recherches Pluridisciplinaires sur le Langage*, 41.

Pesenti, M., & Seron, X. (2000). *Neuropsychologie des troubles du calcul et du traitement des nombres*. Marseille: Solal.

Pesenti, M., Seron, X., & Noel, M.-P. (2000). Les troubles du calcul et du traitement des nombres. In X. Seron & M. Van der Linden (Eds.). *Traité de Neuropsychologie Clinique* (pp. 355-371) . Marseille: Editions Solal.

Piazza, M. (2010). Neurocognitive start-up tools for symbolic number representations. *Trends in Cognitive Sciences*, 14(12), 542–551

Piazza, M., Pica P., Izard V., Spelke E., & Dehaene, S. (2013). Education enhances the acuity of the nonverbal approximate number system. *Psychol Sci*, 24(6):1037-1043.

Pica, P. (2004). Exact and Approximate Arithmetic in an Amazonian Indigene Group. *Science*, 306(5695), 499-503.

Piérart, B. (2013). Compétences langagières lexicales et phonologiques des dysphasiques : délai ou différence ? *Développements*, 15(2), 4.

Poncelet, M., Majerus, S., & Van der Linden, M. (2009). *Traité de neuropsychologie de l'enfant*. Marseille: Solal.

Rescorla, L. (2009). Age 17 Language and Reading Outcomes in Late-Talking Toddlers: Support for a Dimensional Perspective on Language Delay. *Journal of Speech Language and Hearing Research*, 52(1), 16.

Revkin, S. K., Piazza, M., Izard, V., Cohen, L., & Dehaene, S. (2008). Does subitizing reflect numerical estimation? *Psychological Science*, 19(6), 607–614.

Rice, M. L., & Wexler, K. (1996). Toward tense as a clinical marker of specific language impairment in English-speaking children. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 39(6), 1239–1257.

Ringard, J.-C. (2000). *A propos de l'enfant« dysphasique » l'enfant« dyslexique »*. Ministère de l'éducation nationale.

Rousselle, L., Palmers, E., & Noël, M. (2004). Magnitude comparison in preschoolers: what counts? Influence of perceptual variables. *Journal of Experimental Child Psychology*, 87(1), 57–84

Schelstraete, M.-A. (2008). Eléments de réponse à la demande du PMS de Wavre : Quelques indications destinées à aider les centres PMS à suspecter un tableau dysphasique chez un enfant ou un adolescent. *Les Cahiers de la SBLU*, 30, 20-30.

Schelstraete, M.-A., Anne, B., Emilie, C., & Christine, N. (2011). *Traitement du langage oral chez l'enfant interventions et indications cliniques*. Issy-les-Moulineaux: Elsevier Masson.

Schuele, C. M. & Hadley, P. (1999). Potential advantages of introducing specific language impairment to families. *American Journal of Speech-Language Pathology*, 8(1), 11-22.

Seghin, L. (2014). *La représentation des nombres chez les enfants dysphasiques. Mémoire de master de logopédie non publié*, Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve.

Siegel, L.S., Lees, A., Allan, L., & Bolton, B. (1981). Non-verbal assessment of piagetian concepts in preschool children with impaired language development. *Educational Psychology*, 1(2), 153-158.

Simon, O., Mangin, J.-F., Cohen, L., Le Bihan, D., & Dehaene, S. (2002). Topographical layout of hand, eye, calculation, and language-related areas in the human parietal lobe. *Neuron*, 33(3), 475–487.

Smets K., Sasanguie D., Szűcs D., Reynvoet B. 2015. The effect of different methods to construct non-symbolic stimuli in numerosity estimation and comparison. *Journal of Cognitive Psychology*. vol.27 (3), pp. 310-325

Stark, R. E., & Tallal, P. (1981). Selection of Children with Specific Language Deficits. *Journal of Speech and Hearing Disorders*, 46(2), 114.

Tager-Flusberg, H., & Cooper, J. (1999). Present and Future Possibilities for Defining a Phenotype for Specific Language Impairment. *Journal of Speech Language and Hearing Research*, 42(5), 1275.

Tallal, P., Stark, R.-E., & Mellits, D.-U. (1985). The relationship between auditory temporal analysis and receptive language development: Evidence from studies of developmental language disorder. *Neuropsychologia*, 23(4), 527-534.

Thordardottir, E.-T., Kehayia, E., Lessard, N., Sutton, A. & Trudeau, N. (2010). Typical performance on tests of language knowledge and language processing of French-speaking 5-year-olds. *Canadian Journal of Speech Language Pathology and Audiology*, 34(1), 5-16.

Vanderwaele, C. (2008). *La qualité des représentations sémantiques des nombres chez l'enfant avec Trouble du Développement du Langage*. (Mémoire). Université Libre de Bruxelles

Van Nieuwenhoven, C., Grégoire, J. & Noël, M.-P. (2001). *TEDI-MATH, Test Diagnostique des Apprentissages de base en Mathématiques*. Paris, Editions du Centre de Psychologie Appliquée.

Von Aster, M.-G., & Shalev, R.-S. (2007). Number development and developmental dyscalculia. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 49(11), 868-873.

Wechsler, D. (2003). *Wechsler intelligence scale for children (4th ed.)*. San Antonio, TX: Psychological Corporation.

Wilson C.-A. (1987) Yeast phosphoglycerate kinase: investigation of catalytic function by site-directed mutagenesis. *Biochem J*, 241(2) : 609-14.

Wynn, K. (1992). Children's acquisition of the number words and the counting system. *Cognitive Psychology*, 24(2), 220-251.

Xu, F., Spelke, E.-S. & Goddard, S. (2005), Number sense in human infants. *Developmental Science*, 8: 88-101.

Yoder, P.-J., Spruytenburg, H., Edwards, A., & Davies, B. (1995). Effect of verbal routine contexts and expansions on gains in the mean length of utterance in children with developmental delays. *Language, Speech, and Hearing Services in Schools*, 26(1), 21-32.

Liste des annexes

Annexe n°1 : Lettre adressée aux parents et enfants contactés

Annexe n°2 : Trame du protocole individuel pour l'administrateur

Annexe n°3 : Effet de la condition

Annexe n°4 : Effet de groupe

Annexe n°5 : Plaquette explicative de l'étude