

L'exploration des capacités numériques de base chez les enfants, adolescents et jeunes adultes porteurs d'une Trisomie 21

Auteur : Delvaux, Eloïse

Promoteur(s) : Attout, Lucie

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

Diplôme : Master en sciences psychologiques, à finalité spécialisée en psychologie clinique

Année académique : 2017-2018

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/5643>

Avertissement à l'attention des usagers :

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

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



Université de Liège

Faculté de Psychologie, Logopédie et Sciences de l'Éducation

**L'exploration des capacités
numériques de base chez les enfants,
adolescents et jeunes adultes porteurs
d'une Trisomie 21**

Sous la direction du Docteur Lucie ATTOUT

Lecteurs : Professeur Annick COMBLAIN

Mr. Jean-Marc MAGAIN

Mémoire présenté par Eloïse DELVAUX

en vue de l'obtention du diplôme de Master en Sciences Psychologiques à
finalité spécialisée en Psychologie Clinique, filière Neuropsychologie Clinique

Année académique 2017 – 2018



Université de Liège

Faculté de Psychologie, Logopédie et Sciences de l'Éducation

**L'exploration des capacités
numériques de base chez les enfants,
adolescents et jeunes adultes porteurs
d'une Trisomie 21**

Sous la direction du Docteur Lucie ATTOUT

Lecteurs : Professeur Annick COMBLAIN

Mr. Jean-Marc MAGAIN

Mémoire présenté par Eloïse DELVAUX

en vue de l'obtention du diplôme de Master en Sciences Psychologiques à
finalité spécialisée en Psychologie Clinique, filière Neuropsychologie Clinique

Année académique 2017 – 2018

REMERCIEMENTS

Je tenais tout d'abord à remercier Mme. Lucie Attout, ma promotrice, pour sa grande disponibilité, son écoute et son encadrement tout au long de ce travail.

Je souhaite également remercier Mme. Annick Comblain ainsi que Mr. Jean-Marc Magain, lecteurs de ce mémoire, pour l'attention portée à cette étude.

Merci aux directeurs des différentes infrastructures pour leur précieuse aide dans le recrutement des participants ainsi que pour leur accueil lors des séances de testing. Merci aussi aux familles ayant accepté que leur enfant participe à l'étude et ayant pris de leur temps pour me recevoir à leur domicile.

Je souhaiterais également remercier les enfants et adolescents porteurs de trisomie 21 pour leur bonne humeur, leur gentillesse et leur implication dans les épreuves.

Finalement, j'aimerais remercier ma famille et mes amis pour leurs encouragements et plus particulièrement, merci à mes parents pour leur soutien inconditionnel tout au long de ce travail.

TABLE DES MATIÈRES

I.	INTRODUCTION	5
II.	LE CONTEXTE THEORIQUE.....	7
1.	La Trisomie 21 ou Syndrome de Down	7
1.1.	Définition et caractéristiques.....	7
1.2.	Profil cognitif	9
1.2.1.	Le développement intellectuel	9
1.2.2.	Les capacités langagières et visuo-spatiales	10
1.2.3.	La mémoire à court terme	12
1.2.4.	Les capacités d'apprentissage	13
2.	Les capacités numériques de base.....	15
2.1.	Les processus de quantification	15
2.1.1.	Le subitizing	15
2.1.2.	Le dénombrement.....	16
2.1.3.	Le « Système Numérique Approximatif » (ANS, <i>Approximate Number System</i>)	19
2.2.	Le Système Général de la Magnitude	22
2.3.	L'implication des processus de quantification dans l'apprentissage mathématique	23
2.3.1.	L'implication du subitizing	24
2.3.2.	L'implication du Système Numérique Approximatif (ANS).....	24
3.	Les capacités numériques de base chez les personnes porteuses de Trisomie 21	26
3.1.	Une altération du subitizing et un retard de l'ANS comme source des difficultés mathématiques	26
3.2.	Les difficultés langagières comme source des difficultés mathématiques	29
3.3.	Le dénombrement chez l'enfant porteur de Trisomie 21	32
3.4.	Conclusion	34
III.	OBJECTIFS ET HYPOTHESES	35
IV.	METHODOLOGIE.....	38
1.	Les participants	38
1.1.	Le groupe expérimental (groupe T21)	38
1.2.	Le groupe contrôle	39

2.	Description du protocole de recherche.....	41
2.1.	Evaluation de l'efficacité intellectuelle.....	41
2.1.1.	Similitudes	41
2.1.2.	Vocabulaire	42
2.1.3.	Cubes.....	42
2.1.4.	Identification de concepts	43
2.1.5.	EVIP.....	43
2.2.	Evaluation de la mémoire à court terme verbale et visuo-spatiale.....	44
2.2.1.	La mémoire à court terme verbale	44
2.2.1.1.	Empan de lettres	44
2.2.1.2.	Catégorisation	44
2.2.2.	La mémoire à court terme visuo-spatiale	45
2.2.2.1.	Simultanée.....	45
2.2.2.2.	Séquentielle	45
2.3.	Evaluation du niveau de développement mathématique.....	45
2.3.1.	Tâche « Donne-moi ».....	46
2.3.2.	Fluences de calculs verbaux oraux avec support imagé.....	46
2.3.3.	Litanie	46
2.3.4.	Dénombrement rapide.....	47
2.4.	Evaluation des traitements quantitatifs	47
2.4.1.	Comparaison non-symbolique de la magnitude.....	47
2.4.1.1.	Comparaison de quantités continues (non numériques)	48
2.4.1.1.1.	Modalité visuelle : Longueur	48
2.4.1.1.2.	Modalité auditive : Durée	49
2.4.1.2.	Comparaison de quantités discrètes (numériques).....	49
2.4.1.2.1.	Modalité visuelle : Collection d'éléments simultanés	49
2.4.1.2.2.	Modalité visuelle : Séquence de points	50
2.4.1.2.3.	Modalité auditive : Séquence de sons	50
2.4.2.	Subitizing	51
3.	La procédure.....	53
4.	Traitement des résultats.....	54

V.	INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS.....	56
1.	Efficienc e intellectuelle, mémoire à court terme et développement mathématique	56
2.	Epreuves de comparaison non-symbolique de la magnitude	59
3.	Epreuve de Subitizing	62
VI.	DISCUSSION	65
1.	Hypothèses : littérature et résultats	65
1.1.	Le subitizing.....	65
1.2.	Le Système Numérique Approximatif (ANS).....	66
1.2.1.	Comparaison de Longueur et Comparaison de Durée	67
1.2.2.	Collection d'éléments simultanés	70
1.2.3.	Séquence de points et Séquence de sons.....	71
1.2.4.	Conclusion	73
1.3.	Efficienc e intellectuelle et mémoire à court terme : modalités visuelle et auditive.....	75
1.4.	Le niveau de développement mathématique	76
2.	Perspectives cliniques	78
3.	Limites de l'étude.....	81
VII.	CONCLUSION	84
VIII.	BIBLIOGRAPHIE.....	86

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX :

Tableau 1 : <i>Données démographiques, par groupe.....</i>	39
Tableau 2 : <i>Moyenne, écart-type et range du total des réponses correctes pour les épreuves d'efficiency intellectuelle, de mémoire à court terme (MCT) et de développement mathématique (DM), par groupe.....</i>	57
Tableau 3 : <i>Moyenne, écart-type et range des fractions de Weber (w) aux épreuves de comparaison non-symbolique de la magnitude, par groupe.....</i>	60
Tableau 4 : <i>Moyenne, écart-type et range du taux de réponses correctes (exprimé en pourcentages) pour les épreuves de comparaison non-symbolique de la magnitude, par groupe.....</i>	60
Tableau 5 : <i>Réponse moyenne, écart-type et range pour l'épreuve de Subitizing, par numérosité et par groupe.....</i>	63

FIGURES :

Figure 1 : <i>Taux de réponses correctes pour chaque numérosité de l'épreuve de Subitizing, par groupe.....</i>	63
--	-----------

I. INTRODUCTION

Dans la littérature, il est largement admis que les personnes porteuses de trisomie 21 présentent un profil cognitif qui leur est propre. En effet, nombreuses sont les études mettant en évidence, chez ces individus, un retard mental (Comblain & Thibaut, 2009), un retard de développement langagier (Abbeduto et al., 2001 ; Cardoso-Martins et al., 1985 ; Comblain & Thibaut, 2009 ; Tager-Flusberg, 1999), un déficit de mémoire à court terme verbale (Comblain & Thibaut, 2009 ; Rondal & Comblain, 2001) ou encore des difficultés d'apprentissage (Comblain & Thibaut, 2009 ; Meyer, 2015 ; Tager-Flusberg, 1999). Parmi ces difficultés d'apprentissage, les difficultés mathématiques éprouvées par les personnes porteuses de trisomie 21 sont celles qui nous intéressent le plus. En effet, ces individus semblent éprouver d'importantes difficultés dans l'apprentissage mathématique (habiletés arithmétiques, comptage, connaissances mathématiques, etc.) en comparaison à des enfants tout-venant (Camos, 2009 ; Nye, Fluck & Buckley, 2001 ; Paterson et al., 1999 ; Paterson et al., 2006 ; Sella, Lanfranchi & Zorzi, 2013). Plus spécifiquement, plusieurs auteurs postulent que la plupart des personnes porteuses du syndrome n'atteignent pas le niveau attendu concernant les capacités numériques de base, lesquelles sont nécessaires à l'apprentissage arithmétique ultérieur (Bochner, Outhred, Pieterse & Bashash, 2003, cités par Meyer, 2015 ; Shepperdson, 1994). Les difficultés mathématiques présentées par les personnes porteuses de trisomie 21 pourraient donc trouver leur origine dans l'altération de ces capacités numériques de base (à savoir, le subitizing, le dénombrement et le Système Numérique Approximatif). Cependant, très peu d'études ont investigué l'implication de ces capacités numériques de base dans les difficultés mathématiques retrouvées chez les personnes porteuses du syndrome et par conséquent, l'origine de leurs difficultés demeure incertaine.

L'objectif de cette étude sera donc d'investiguer plus en profondeur ces capacités numériques de base afin de mieux approcher l'origine des difficultés mathématiques présentes dans le profil des personnes porteuses de trisomie 21. Pour ce faire, nous allons évaluer les capacités numériques de base en ciblant plus particulièrement le subitizing ainsi que le Système Numérique Approximatif. Diverses épreuves faisant appel à ces capacités (épreuves de Subitizing et de comparaison non-symbolique de la magnitude) seront administrées à deux groupes de participants : un groupe

expérimental composé de 29 participants porteurs de trisomie 21 et un groupe contrôle composé de 29 participants tout-venant de même âge mental que les participants du groupe expérimental. Un contraste entre les modalités visuelle et auditive sera réalisé afin de mettre en évidence un éventuel lien entre l'une ou l'autre modalité et les capacités numériques de base. Par ailleurs, en plus des épreuves évaluant les capacités numériques de base, nous nous intéresserons également à d'autres aspects plus généraux du profil cognitif tels que l'efficacité intellectuelle ou encore la mémoire à court terme verbale et visuo-spatiale, lesquelles pourraient avoir un impact sur les performances aux épreuves évaluant les capacités numériques de base. Via l'administration de ces différentes épreuves, nous espérons ainsi pouvoir mieux cibler l'origine des difficultés mathématiques présentées par les personnes porteuses de trisomie 21. Si l'on parvient à cibler leur profil de forces et de faiblesses au niveau des capacités numériques de base, nous parviendrons également mieux à expliquer leurs difficultés mathématiques. De ce fait, nous pourrions proposer différentes pistes cliniques afin de leur fournir un apprentissage et une éventuelle revalidation qui soient le plus en adéquation possible avec leur profil.

II. LE CONTEXTE THEORIQUE

1. La Trisomie 21 ou Syndrome de Down

1.1. Définition et caractéristiques

La trisomie 21 (T21), aussi appelée Syndrome de Down, est une des principales causes de déficience intellectuelle et le plus fréquent des syndromes génétiques (Comblain & Thibaut, 2009). Appelée tout d'abord « Mongolisme » par le Docteur Langdon Down, la trisomie 21 doit son nom au Docteur Jérôme Lejeune qui introduit ce terme suite à la découverte d'un chromosome surnuméraire sur la 21^{ème} paire de chromosomes (Dunn, 1991). Ce syndrome génétique résulte de la triplication complète ou partielle du chromosome 21, ce qui signifie que la personne porteuse du syndrome possède 3 chromosomes 21 au lieu de 2 (et donc 47 chromosomes au total au lieu de 46). L'anomalie chromosomique que constitue la trisomie 21 résulte d'une non-disjonction des chromosomes lors de la première division cellulaire et peut donner lieu à trois types différents de trisomie 21, toutes causées par la présence d'un chromosome surnuméraire. La première et la plus fréquente (95%), la trisomie homogène libre, résulte d'une erreur de distribution des chromosomes lors de la première division cellulaire et affecte l'entièreté des cellules du corps. Ainsi, un chromosome 21 supplémentaire est présent dans chacune des cellules du corps de la personne atteinte du syndrome. La seconde forme de trisomie 21, la trisomie mosaïque (2%), se produit lors de la seconde division cellulaire et ne touche pas toutes les cellules du corps. Il y a donc une coexistence entre des cellules formées de 46 chromosomes et d'autres, porteuses de la trisomie 21, formées de 47 chromosomes. Dans la dernière forme de trisomie 21, la trisomie par translocation (3%), on ne retrouve que deux chromosomes 21 libres, le troisième étant transloqué sur un autre chromosome (généralement le 14). Ce type de trisomie est le seul où l'un des deux parents est porteur du chromosome résultant de la translocation sans être atteint lui-même de trisomie. Un faible pourcentage de cas de trisomie 21 résulte donc d'un risque familial et non pas d'un accident non héréditaire (Meyer, 2015 ; Perbet, 2000).

Il n'existerait pas de différence majeure aux niveaux cognitif et langagier entre ces trois formes de trisomie. Néanmoins, les personnes atteintes de trisomie mosaïque seraient susceptibles d'être moins affectées (Perbet, 2000). En effet, dans ce type de

trisomie, nous pouvons observer des résultats légèrement plus élevés sur le plan de l'efficacité intellectuelle (Cuilleret, 2017).

Grâce aux procédures de dépistage, de diagnostic précoce et à la pratique de l'interruption volontaire, la trisomie 21, dont l'incidence était autrefois estimée à 1 cas sur 750 naissances, affecte actuellement 1 naissance sur 1500 dans les pays industrialisés (Comblain & Thibaut, 2009). Différents facteurs de risque existent et parmi eux, la maternité tardive est le plus important (incidence 1:100 si > 40 ans). En effet, le risque d'avoir un enfant porteur de trisomie 21 augmente avec l'âge des parents et cela peut s'expliquer par le fait que les ovules produits par des femmes plus âgées sont plus susceptibles de donner lieu à des accidents lors de la division cellulaire. Le fait d'avoir déjà donné naissance à un enfant porteur du syndrome représente également un facteur de risque. Enfin, être porteur du gène de translocation représente un facteur de risque familial pour la forme de trisomie par translocation (Meyer, 2015).

Les caractéristiques des individus porteurs de trisomie 21 sont nombreuses et leur développement est atypique. Tout d'abord, un retard du développement physique est très caractéristique et se traduit par une hypotonie généralisée, une nuque raccourcie, un nez aplati, une petite tête aplatie derrière, un visage rond, des yeux bridés et des paupières inférieures larges, des dents petites et généralement mal placées, une langue épaisse (macroglossie), une fissuration linguale, de petites oreilles, des pieds et des mains raccourcis, des doigts avec un pli unique et profond, des cheveux raides et clairsemés (alopécie) et une peau sèche qui ride facilement (Comblain & Thibaut, 2009 ; Rondal, 2010). Sur le plan physiologique, ces personnes peuvent présenter des malformations des organes et des articulations donnant lieu à des problèmes articulaires, des anomalies cardiaques, des leucémies, des anomalies hormonales (hypothyroïdie) et des problèmes sensoriels (pouvant affecter l'apprentissage et le développement cognitif). Un retard moteur et un vieillissement prématuré sont également caractéristiques, bien que l'espérance de vie ait augmenté (environ 60 ans) ces dernières années, notamment grâce aux progrès de la médecine. Par ailleurs, les personnes porteuses du syndrome présentent des risques de développer des troubles du spectre autistique (TSA) (Comblain & Thibaut, 2009). Finalement, au niveau neuroanatomique, les techniques d'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) ainsi que les autopsies ont permis de mettre en évidence une altération de différents substrats cérébraux. En effet, les personnes atteintes du syndrome présentent une

réduction de certaines structures cérébrales telles que le cortex préfrontal, les régions temporales (essentiellement caractérisées par un hippocampe particulièrement touché et réduit) et le cervelet. De plus, une augmentation de la matière grise sous-corticale, une réduction de la matière blanche au niveau temporal ainsi qu'un retard dans le processus de myélinisation sont également observés. Néanmoins, les régions pariétales semblent être relativement préservées (Aylward et al., 1997 ; Tager-Flusberg, 1999). Il semblerait toutefois que le cerveau des enfants porteurs de trisomie 21 ne soit pas distinguable, à la naissance, de celui des enfants tout-venant. La différenciation n'émergerait que quelques mois après la naissance (6 mois environ) (Tager-Flusberg, 1999).

Il est à noter que la symptomatologie retrouvée dans la trisomie 21 est de nature probabiliste, ce qui signifie que chacun des symptômes a une probabilité d'être exprimé à un degré variable selon les individus et que par conséquent, aucun individu porteur du syndrome ne présente l'entièreté de ces caractéristiques. De plus, aucun symptôme n'est pathognomonique (c'est-à-dire, spécifique à la trisomie 21) et c'est donc plutôt l'ensemble des symptômes qui est caractéristique du syndrome (Pueschel, 1995 ; Rondal et al., 2006 ; cités par Rondal, 2010).

1.2. Profil cognitif

Généralement, le développement cognitif des personnes porteuses de trisomie 21 se réalise selon une séquence développementale typique. Bien qu'une variabilité interindividuelle existe, un certain profil de forces et de faiblesses est observé chez la plupart des individus porteurs du syndrome (Comblain & Thibaut, 2009 ; Määttä, Tervo-Määttä, Taanila, Kaski & Iivanainen, 2006).

1.2.1. Le développement intellectuel

La trisomie 21 est l'une des principales causes de déficience intellectuelle. En effet, les personnes porteuses du syndrome présentent toutes une déficience intellectuelle mais cependant, une importante variabilité interindividuelle existe. Ainsi, la déficience intellectuelle peut aller de légère à profonde selon les individus, bien que la majorité présente une déficience intellectuelle allant de modérée à sévère. Le QI des adultes est

compris entre 25 et 55 avec une limite supérieure d'âge mental d'environ 7 – 8 ans (Comblain & Thibaut, 2009).

L'évolution du niveau intellectuel des personnes affectées par le syndrome se fait de manière curvilinéaire. Cela signifie qu'entre l'âge de 1 et 15 ans, nous pouvons observer une progression rapide de l'âge mental et qu'ensuite, cette progression est plus lente mais peut toutefois s'observer jusqu'à l'âge de 30 – 35 ans avant de se terminer en plateau (Comblain & Thibaut, 2009).

1.2.2. Les capacités langagières et visuo-spatiales

Dans la littérature, il est largement admis que le domaine verbal représente une faiblesse importante dans le profil cognitif des personnes porteuses de trisomie 21 en comparaison au domaine visuo-spatial qui semble, quant à lui, relativement préservé (en comparaison à l'âge mental mais non à l'âge chronologique) (Abbeduto et al., 2001 ; Grieco, Pulsifer, Seligsohn, Skotko & Schwartz, 2015). Effectivement, chez les individus porteurs du syndrome, un pattern consistant de faiblesses dans le domaine verbal en comparaison au domaine visuo-spatial est observé. Ainsi, les enfants trisomiques continuent à faire des progrès au niveau des habiletés cognitives non-verbales alors que les habiletés verbales tendent à décliner durant l'adolescence et l'âge adulte (Grieco et al., 2015). D'une manière générale, le langage (que ce soit le langage expressif ou réceptif) est plus altéré que les capacités cognitives non-verbales chez les personnes porteuses de trisomie 21 (Abbeduto et al., 2001).

Concernant le domaine langagier, si un retard de développement important est observé, tous les domaines ne sont pas touchés de façon équivalente. Effectivement, 65% des personnes porteuses de trisomie 21 présentent des déficits plus importants en langage expressif (production) qu'en langage réceptif (compréhension) (Miller, 1999, cité par Comblain & Thibaut, 2009).

Concernant le langage expressif, la trisomie 21 est caractérisée par un déficit spécifique de la production langagière. Une altération du langage expressif émerge tôt dans le développement et augmente en sévérité durant l'enfance (Abbeduto et al., 2001 ; Comblain & Thibaut, 2009). Beaucoup d'individus porteurs du syndrome n'acquièrent pas les compétences conversationnelles. Par ailleurs, les habiletés syntaxiques semblent sévèrement altérées chez les individus présentant assez de

compétences langagières que pour manifester ce type de difficultés (Tager-Flusberg, 1999). Les premières acquisitions langagières semblent apparaître à un âge cohérent avec le niveau général de développement cognitif mais cependant, les acquisitions ultérieures sont ralenties (Cardoso-Martins et al., 1985 ; Miller, 1995, cités par Comblain & Thibaut, 2009). Un retard dans l'acquisition des premiers mots est observé et l'acquisition de nouveau vocabulaire chez les enfants trisomiques est moindre que celle que l'on peut retrouver chez les enfants tout-venant, suggérant également une limitation au niveau des compétences lexicales. Cependant, il est à noter que les premiers mots acquis par les enfants porteurs de trisomie 21 sont similaires à ceux acquis par les enfants tout-venant (Tager-Flusberg, 1999). Au fil des années, l'écart entre la courbe développementale des enfants trisomiques et celle des enfants tout-venant se creuse, bien qu'une grande variabilité interindividuelle existe (Comblain & Thibaut, 2009).

Par ailleurs, selon Tager-Flusberg (1999), les enfants porteurs de trisomie 21 présenteraient des déficits au niveau de la communication non-verbale (pointage, attention conjointe, etc.). Or, ces compétences non-verbales semblent être un prérequis pour l'acquisition ultérieure des capacités de communication verbale. Des déficits de communication non-verbale chez les enfants trisomiques pourraient alors expliquer leurs difficultés langagières ultérieures et, par conséquent, leurs difficultés à communiquer verbalement.

Comme énoncé précédemment, la compréhension du langage est, quant à elle, moins altérée que la production, bien qu'elle reste tout de même déficitaire. De cette manière, la compréhension du langage reste limitée et les personnes porteuses du syndrome s'aident d'indices lexicaux et contextuels afin de donner du sens à ce qui leur est énoncé. Il va de soi que des difficultés de compréhension du langage peuvent impacter négativement d'autres aspects de la cognition, tels que l'apprentissage et la mémoire (Grieco et al., 2015).

Concernant à présent les habiletés visuo-spatiales, il est largement admis que ces dernières sont relativement préservées en comparaison à l'âge mental, mais non à l'âge chronologique des individus affectés par le syndrome. Le domaine visuo-spatial, en comparaison au domaine langagier, représenterait alors une force dans leur profil cognitif. Les enfants et adultes porteurs du syndrome obtiennent d'ailleurs de meilleurs résultats dans des tâches visuo-spatiales en comparaison à des tâches numériques ou

linguistiques. De plus, les habiletés visuo-spatiales demeurent relativement préservées, même face au déclin cognitif. Ainsi, l'organisation globale semble satisfaisante, bien que des difficultés au niveau des détails internes aux représentations visuo-spatiales soient décrites. Les personnes porteuses de trisomie 21 tendraient donc à utiliser une approche globale afin d'analyser l'information visuo-spatiale (Bellugi, Lichtenberger, Mills, Galaburda & Korenberg, 1999 ; Grieco et al., 2015 ; Paterson, 2001).

1.2.3. La mémoire à court terme

En ce qui concerne la mémoire à court terme chez les personnes atteintes du syndrome, il semblerait que tous les aspects ne soient pas touchés de façon équivalente. En effet, selon Comblain et Thibaut (2009), la mémoire à court terme visuo-spatiale serait mieux préservée que la mémoire à court terme verbale. C'est donc le versant auditif de la mémoire à court terme qui serait le plus perturbé et caractérisé par un empan de chiffres n'évoluant pas ou peu avec l'âge chronologique (Rondal & Comblain, 2001). Par ailleurs, plusieurs auteurs démontrent l'existence d'un effet de longueur de mots ainsi que d'un effet de similarité phonologique (aussi bien en présentation auditive que visuelle), témoignant de l'utilisation d'un code phonologique par les sujets atteints de trisomie 21 (Broadley, MacDonald & Buckley, 1995 ; Comblain, 1996, citée par Comblain & Thibaut, 2009). La mise en évidence de ces effets atteste d'une similarité entre le fonctionnement de la mémoire verbale à court terme chez les enfants porteurs de trisomie 21 et chez les enfants tout-venant (Comblain & Thibaut, 2009 ; Rondal & Comblain, 2001). Néanmoins, ces individus possèdent des performances en mémoire à court terme verbale plus faibles que ce qui pourrait être attendu compte tenu de leur niveau d'habiletés verbales ou de leur niveau intellectuel général (Jarrold & Baddeley, 2001).

En résumé, l'empan de mémoire phonologique à court terme est bien réduit chez les personnes porteuses de trisomie 21 et ce, en comparaison à ce qu'il devrait être sur la base de l'âge chronologique mais aussi de l'âge mental. En effet, cet empan semble ne pas dépasser, à l'âge adulte, celui d'un enfant de 4 ans. L'élévation de cet empan est liée à l'élévation de l'âge mental, mais non de l'âge chronologique (Rondal & Comblain, 2001). De plus, ces performances faibles en mémoire à court terme verbale semblent finalement être un problème spécifique lié à la trisomie 21. Plusieurs

hypothèses ont été avancées afin d'expliquer ces faibles performances mais aucune d'entre elles n'a pu être confirmée. Parmi ces hypothèses, l'on pouvait notamment retrouver l'impact des difficultés auditives ou encore des problèmes d'articulation, largement présentés par les individus porteurs du syndrome (Jarrold & Baddeley, 2001).

1.2.4. Les capacités d'apprentissage

Il est admis que les personnes porteuses de trisomie 21 présentent des difficultés d'apprentissage de sévérité variable en comparaison aux personnes ayant un développement cognitif typique. Les principales différences n'émergent que plusieurs mois après la naissance. De ce fait, les apprentissages précoces, bien que réduits chez les personnes porteuses du syndrome, semblent relativement normaux. Ce n'est qu'après la première année de vie que des déficits plus importants peuvent s'observer (Comblain & Thibaut, 2009 ; Meyer, 2015 ; Tager-Flusberg, 1999).

Comme énoncé précédemment, l'hippocampe est particulièrement touché dans la trisomie 21. Cette structure étant impliquée dans la cognition spatiale, la flexibilité des apprentissages ainsi que dans la consolidation de ce qui a été antérieurement appris, nous nous attendons à observer des difficultés dans ces types d'apprentissage en particulier (c'est le cas notamment de la mémoire et des apprentissages de manière générale) (Comblain & Thibaut, 2009 ; Tager-Flusberg, 1999).

Toutefois, les personnes porteuses de trisomie 21 montrent une capacité à apprendre de nouvelles habiletés, bien que cet apprentissage puisse différer de la population d'enfants tout-venant ou même des individus de même niveau intellectuel (Grieco et al., 2015). Dès lors, les compétences scolaires sont peu, voire pas du tout enseignées au profit de compétences plus pragmatiques telles que l'autonomie, la socialisation ou encore le langage (Meyer, 2015).

Par ailleurs, comme énoncé précédemment, il est admis que l'apprentissage visuo-spatial est meilleur que l'apprentissage verbal, ce qui est consistant avec le profil cognitif typique que l'on peut retrouver chez les personnes porteuses du syndrome (Grieco et al., 2015). Plus spécifiquement, ces dernières éprouvent essentiellement des difficultés dans l'apprentissage des mathématiques ainsi que de la lecture (Camos, 2009). Au niveau numérique, le déficit est sévère et ce, à plusieurs niveaux (habiletés

arithmétiques, comptage, connaissances mathématiques) (Nye, Fluck & Buckley, 2001). Finalement, bien que des progrès soient possibles, la plupart des personnes porteuses du syndrome n'atteignent pas le niveau attendu concernant les capacités numériques de base (Bochner, Outhred, Pieterse & Bashash, 2003, cités par Meyer, 2015 ; Shepperdson, 1994).

L'objet de ce mémoire portant plus particulièrement sur les capacités numériques de base chez les enfants porteurs de trisomie 21 ; nous reviendrons plus en détails sur la question après avoir présenté ce que sont ces capacités numériques de base, lesquelles sont nécessaires à l'apprentissage arithmétique ultérieur.

2. Les capacités numériques de base

2.1. Les processus de quantification

La quantification est la capacité à chiffrer une quantité et à ainsi fournir le cardinal (symbole utilisé pour représenter la numérosité) exact ou approximatif d'une collection. Elle est primordiale pour l'acquisition des activités arithmétiques ultérieures. Trois types de traitement de l'information numérique sont distingués : le subitizing (pour les collections de moins de 5 objets), le dénombrement et le Système Numérique Approximatif (pour les collections de plus de 5 objets) (Barouillet & Camos, 2006 ; Lépine & Camos, 2004).

2.1.1. Le subitizing

Le premier type de traitement de l'information numérique, le subitizing, peut être défini comme étant un processus spécifique de quantification de petites quantités (jusqu'à 4 objets) permettant de quantifier rapidement et efficacement une petite quantité sans la dénombrer. Ce processus permet d'enregistrer les caractéristiques spatio-temporelles jusqu'à trois ou quatre éléments ; ce qui permet alors de les quantifier immédiatement. Le subitizing a la particularité de garder une trace individuelle de chaque objet, mais pas de se représenter des groupes d'objets comme étant des ensembles. Ce processus considère donc plusieurs objets comme étant « un objet et un autre objet » plutôt que comme un ensemble d'objets (Xu, 2002). Le subitizing est de plus en plus rapide avec l'âge (1150ms chez l'enfant de 6 ans contre 600ms les adultes), pratiquement sans erreur et fait appel aux traitements pré-attentionnels (processus parallèle). Ce processus de quantification n'est donc pas une estimation mais bien un processus perceptif sûr d'appréhension immédiate de la numérosité, une reconnaissance. On remarque d'ailleurs une augmentation linéaire des temps de reconnaissance pour les collections supérieures à 4 objets alors que ces temps sont stables pour les collections inférieures à 3 ou 4 objets (quantités *subitizables*) (Mandler & Shebo, 1982 ; Meyer, 2015).

Cependant, le statut de ce processus de subitizing reste encore controversé et les auteurs ne s'accordent pas sur la question. Mandler et Shebo (1982) proposent tout d'abord un modèle du subitizing reposant sur la reconnaissance de configurations

canoniques ou de patrons perceptifs. De cette manière, des configurations spatiales canoniques peuvent être reconnues en parallèle : 1 est représenté par un point, 2 est représenté par une ligne et 3 est représenté par un triangle. La numérosité « 4 » peut également être *subitizée* si les 4 objets forment un quadrilatère ou un triangle avec un point à l'intérieur. Au-delà de 4 objets, la variabilité des configurations augmente, ce qui compromettrait la capacité de reconnaissance immédiate. D'autres auteurs (Trick & Pylyshyn, 1993, 1994) postulent quant à eux que l'information accessible au subitizing n'est pas géométrique mais bien abstraite. Lors de l'étape pré-attentive du traitement visuel (correspondant au subitizing), des marqueurs spatiaux, appelés les FINSTs (« FINGers of INSTanciation), s'associeraient aux objets. Ainsi, pour déterminer la cardinalité d'une petite collection, les individus rapporteraient le nombre de FINSTs activés sans avoir à diriger leur attention vers les objets. Selon ces auteurs, les adultes ne disposeraient que de 4 FINSTs et ne pourraient alors pas utiliser le subitizing au-delà de 4 objets (Lépine & Camos, 2004).

Finalement, il est à noter que le subitizing est soumis à différentes contraintes. La première est le fait que les objets à *subitizer* doivent être suffisamment espacés et occuper des positions distinctes et rapidement identifiables dans l'espace. Des cibles emboîtées, par exemple, ne peuvent pas être *subitizées*. Le subitizing est également influencé par la régularité et la concentricité des collections d'objets. Ensuite, ce processus n'est effectif que lorsque les objets sont distingués les uns des autres sans effort, il n'est donc pas opérant lorsqu'un processus sériel attentionnel est nécessaire pour isoler les cibles. Finalement, le subitizing ne devient effectif qu'avec l'acquisition des premiers mots-nombres pour désigner précisément les petites quantités de 3 ou 4 objets. Il semble également lié à la fréquence des situations dans lesquelles ces petites quantités sont rencontrées et aux différentes formes représentationnelles courantes qui existent (Barouillet & Camos, 2006 ; Lépine & Camos, 2004 ; Meyer, 2015).

2.1.2. Le dénombrement

Le second type de traitement de l'information numérique, le dénombrement, est un processus permettant de déterminer exactement le cardinal d'un ensemble, quelle qu'en soit sa taille. Ce processus est une activité composite nécessitant de connaître le nom des nombres dans le bon ordre (activité verbale), de pointer avec le doigt ou le

regard chaque objet de l'ensemble (activité motrice digitale ou visuelle) et de coordonner ces deux activités simultanément. De cette manière, l'activité de dénombrement peut être analysée selon trois composantes : (1) l'énumération de la chaîne numérique, (2) le repérage du « déjà compté » par rapport au « encore-à-compter » et (3) la coordination de ces deux activités afin d'éviter les doubles comptages ou les oublis. C'est entre 2 et 5 ans que se mettrait progressivement en place la capacité à discriminer et à conserver en mémoire les indices permettant de distinguer les éléments déjà traités de ceux qu'il reste à traiter (Potter & Levy, 1968, cités par Fayol, 1990). Dès l'âge de 5 ans, le dénombrement deviendrait alors une procédure, c'est-à-dire que l'intégration de ces différentes composantes ne nécessiterait plus de contrôle volontaire, ni d'allocation de ressources. L'on peut alors affirmer que le dénombrement est une procédure efficace précocement et peu coûteuse. Ce processus se manifeste en même temps que l'émergence du langage (vers l'âge de 2 ans) et est essentiel dans l'acquisition des habiletés numériques ultérieures (Lépine & Camos, 2004 ; Meyer, 2015).

Le dénombrement intervient lorsque le nombre de cibles dépasse le nombre d'objets *subitizables* ou lorsque les objets n'occupent pas des positions distinctes dans l'espace. Ainsi, il peut être utilisé pour n'importe quelle configuration mais la durée de ce dernier ainsi que le nombre d'erreurs augmentent proportionnellement avec la taille de la collection à dénombrer. Ce processus est sous-tendu par des traitements attentionnels faisant intervenir des routines visuelles opérant de façon sérielle en déplaçant volontairement le foyer attentionnel d'item en item. Il est cependant à noter que le dénombrement est soumis à plusieurs contraintes. En effet, ce processus de quantification ne peut se développer qu'une fois les premières connaissances numériques symboliques orales consolidées. De plus, ce processus dépend des possibilités de la chaîne numérique ; il n'est effectivement pas possible de dénombrer des quantités qui dépassent la longueur de cette chaîne (Meyer, 2015).

Deux points de vue théoriques s'opposent quant à l'émergence du dénombrement dans l'enfance : la théorie dite des « principes-en-premier » et celle dite des « principes-après ». La première est proposée par Gelman et Gallistel (1978) et postule qu'il existerait des principes innés guidant le dénombrement et existant chez l'enfant avant même qu'il n'ait une quelconque expérience de dénombrement. Ces principes sont au nombre de cinq : (1) le principe de correspondance terme à terme (chaque

élément compté est associé à une et une seule étiquette verbale), (2) le principe d'ordre stable (l'endroit duquel démarre le dénombrement n'a pas d'importance), (3) le principe de cardinalité (le dernier mot-nombre prononcé représente le cardinal de la collection), (4) le principe d'abstraction (la nature des éléments comptés n'a pas d'influence sur le cardinal) et (5) le principe de non pertinence de l'ordre dans lequel sont comptés les objets. L'enfant aurait alors une connaissance implicite de ces principes et c'est l'utilisation répétée de ces derniers qui permettrait l'amélioration du dénombrement. La seconde théorie (la théorie des « principes-après »), décrite par Fuson (1988) ou encore Siegler et Shipley (1987), postule au contraire que les principes sont progressivement assimilés par l'enfant sans qu'il n'y ait une connaissance implicite de ces derniers. Dans ce cas, c'est la répétition des procédures de dénombrement acquises par imitation qui permettrait l'acquisition progressive des principes. Le dénombrement serait tout d'abord une activité sans but, une routine, dont l'enfant ne découvre les liens avec la cardinalité que plus tard. Finalement, les auteurs s'accordent pour dire que les principes énoncés dans la théorie des « principes-en-premier » sont nécessaires pour accéder au dénombrement mais qu'il faudrait cependant attendre l'âge de 4 ans pour que ces derniers soient maîtrisés ; ce qui va dans le sens de la théorie des « principes-après » (Barouillet & Camos, 2006 ; Lépine & Camos, 2004 ; Meyer, 2015).

Néanmoins, un point commun entre ces deux points de vue théoriques existe. En effet, tous deux postulent que les enfants posséderaient, dès la naissance, une certaine sensibilité au nombre qui serait un fondement aux apprentissages arithmétiques, sans en être directement la structure. Le lien entre le dénombrement et la cardinalité trouverait son origine dans le subitizing. Effectivement, des études ont démontré que des jeunes enfants sont capables de détecter des différences entre deux numérosités appartenant à l'intervalle du subitizing (entre 1 et 4 objets) mais pas au-delà de ces numérosités *subitizables* (Barouillet & Camos, 2006). Ainsi, en appliquant une routine à des collections *subitizables*, les enfants pourraient associer le dernier mot-nombre énoncé avec le cardinal obtenu grâce au subitizing (Klahr & Wallace, 1976 ; cités par Lépine & Camos, 2004). Le subitizing serait donc lié au dénombrement et permettrait d'acquérir la notion de cardinalité, bien que son statut reste controversé (Barouillet & Camos, 2006 ; Lépine & Camos, 2004).

2.1.3. Le « Système Numérique Approximatif » (ANS, *Approximate Number System*)

Le dernier type de traitement de l'information numérique correspond à un système appelé « Système Numérique Approximatif » (ANS, *Approximate Number System*) permettant de quantifier de façon approximative la numérosité de grands ensembles (sans les dénombrer). Ce système permet donc de réaliser des estimations de manière rapide, globale, imprécise et innée (ou du moins, très précoce). L'ANS est sollicité lorsqu'il n'y a pas assez de temps que pour dénombrer et que la taille des collections dépasse les quatre éléments *subitizables* (Fayol, 2012). Face à une collection de taille importante, le processus de subitizing serait submergé ; tout un chacun ne focaliserait donc plus son attention sur chaque objet de la collection mais appréhenderait les propriétés de cette collection telles que l'arrangement spatial, la densité, la numérosité, etc. (Xu & Spelke, 2000). Par ailleurs, l'on observe une augmentation des erreurs et de la variabilité dans les réponses avec la taille de la collection (tendance à sous-estimer la numérosité) mais néanmoins, la précision de l'ANS augmente avec l'âge (Chillier, 2002, cité par Meyer, 2015 ; Huntley-Fenner, 2001). Etant nécessaire précocement et tout au long de la vie, l'ANS est considéré comme étant la procédure de quantification la plus fréquente (Meyer, 2015). Il est également à noter que l'ANS, tout comme le subitizing, est très influencé par l'arrangement spatial des éléments et dépend donc largement des attributs perceptifs des collections.

Par ailleurs, l'ANS permet de se représenter les nombres de manière approximative sous un format analogique (c'est-à-dire, non-symbolique) (Meyer, 2015). Ce système permet de se représenter les grandes numérosités comme étant des ensembles et n'a pas de limite de taille, contrairement au processus de subitizing (Xu, 2002). Cette représentation est généralement assimilée à une ligne numérique mentale sur laquelle les petites quantités sont représentées à gauche et les grandes quantités, à droite. De cette manière, les nombres évoquent une position dans l'espace, au-delà de la quantité à laquelle ils se rapportent. Généralement, le pattern des estimations (générées par l'ANS) des jeunes enfants est caractérisé par une représentation logarithmique, c'est-à-dire qu'ils ont tendance à surestimer les petits nombres (les positionner trop à droite sur une ligne numérique) et à sous-estimer les plus grands (les positionner trop à gauche sur une ligne numérique). Avec l'augmentation de l'âge et de l'éducation, les enfants passent de cette représentation logarithmique à une représentation formelle et

linéaire permettant un placement précis des nombres sur une ligne numérique (Feigenson, Dehaene & Spelke, 2004 ; Lanfranchi, Berteletti, Torrisi, Vianello & Zorzi, 2014).

L'ANS permet également, notamment grâce à cette représentation sous forme de ligne numérique mentale, d'estimer des nombres et de les comparer rapidement sans devoir les dénombrer. Cette représentation linéaire est soumise à la loi de Weber-Fechner qui correspond à une compression logarithmique des représentations numériques mentales lorsque les quantités réelles augmentent. En d'autres termes, au vu de l'imprécision des représentations de l'ANS, deux quantités ne peuvent pas être distinguées si la distance entre les deux est trop petite. La fraction de Weber (w) permet dès lors de mesurer l'acuité de l'ANS dans la discrimination de quantités. Plus cette fraction de Weber est faible et plus l'acuité numérique est bonne. (Halberda & Feigenson, 2008 ; Lafay, Saint-Pierre & Macoir, 2013 ; Rousselle, Dembour & Noël, 2013 ; Sella, Lanfranchi & Zorzi 2013). De plus, l'ANS permet de quantifier la taille d'une collection, la longueur, la durée, etc. tout en obéissant toujours à la même intuition du plus *versus* moins (plus *versus* moins grand, plus *versus* moins long, etc.). Il semblerait dès lors que ce Système Numérique Approximatif soit de nature amodale. Ses propriétés se transfèrent ainsi à différentes modalités sensorielles, comme par exemple les sons ou les flashes lumineux (Fernandes & Church, 1982 ; Halberda & Feigenson, 2008). Effectivement, ces stimuli présentent les mêmes caractéristiques que les ensembles de points : les réponses sont basées sur la quantité numérique et les erreurs obéissent à la loi de Weber-Fechner selon laquelle ces dernières sont proportionnelles à l'ampleur des informations (Meyer, 2015).

De cette manière, trois effets principaux ont été relevés comme caractérisant le Système Numérique Approximatif : l'effet de taille, l'effet de distance et l'effet de rapport. Le premier, l'effet de taille, postule que plus les quantités à comparer sont grandes et plus les temps de réaction augmentent (par exemple, il est plus facile et rapide de comparer 4 et 5 que 14 et 15). Le second effet, l'effet de distance, postule que plus la distance entre les quantités est grande, plus il est facile de les comparer (par exemple, des collections de 3 et 9 points sont plus facilement discriminées que des collections de 8 et 9 points). Finalement, l'effet de rapport combine les effets de taille et de distance en postulant que plus le rapport entre les quantités se rapproche de un et plus il sera difficile de les comparer (par exemple, des collections de 4 et 10

points seront plus faciles à comparer que des collections de 4 et 5 points) (Fayol, 2012 ; Meyer, 2015).

En pratique, Xu et Spelke (2000) ont montré que des enfants tout-venant de 6 mois sont capables de distinguer des collections de 8 et 16 points (ratio 1:2) mais pas de 8 et 12 points (ratio 2:3). Ils sont donc capables de discriminer de grandes quantités sur base de leur numérosité lorsque le ratio entre les deux quantités à comparer est assez grand. Les mêmes résultats ont été trouvés en utilisant des séquences de sons, suggérant alors que les limites de discrimination sont identiques dans les deux modalités, visuelle et auditive (Lipton & Spelke, 2003). D'autres chercheurs (Lipton & Spelke, 2003 ; Wood & Spelke, 2005 ; Xu & Spelke, 2000) ont montré que les enfants de 6 mois sont capables de discriminer des quantités non-symboliques dans un rapport de 1 à 2 tandis que ceux de neuf mois sont capables de discriminer ces quantités dans un rapport de 2 à 3. A nouveau, le même pattern de réponse est observé pour la modalité auditive (Lipton & Spelke, 2003). Cette même augmentation de la précision de l'ANS selon les différentes modalités sensorielles laisse à penser que c'est effectivement l'ANS en lui-même qui s'améliore, indépendamment des systèmes visuel ou auditif.

L'intuition des quantités numériques se développe donc précocement et ces limites de discrimination s'améliorent rapidement durant toute l'enfance, atteignant la limite adulte (ratio 7:8) au début de l'adolescence (Fayol, 2012 ; Halberda & Feigenson, 2008). L'ANS est donc un système qui émerge tôt dans le développement et est toujours efficient à l'âge adulte. Les enfants sont capables de traiter précocement de grandes quantités mais cependant, les compétences relatives à l'ANS sont évolutives en termes de précision et s'améliorent donc au cours du développement, bien qu'une variabilité interindividuelle existe (Lafay et al., 2013 ; Libertus, Feigenson & Halberda, 2013). Une étude longitudinale réalisée par Libertus, Feigenson et Halberda (2013) a d'ailleurs permis de démontrer que chez des enfants, à environ 6 mois d'intervalle entre la première et la seconde phase de leur étude, la précision de l'ANS a augmenté tandis que les temps de réaction y étant associé ont diminué. Les capacités de discrimination évoluent rapidement durant l'enfance et ce, bien avant la mise en place du comptage verbal et l'acquisition des habiletés arithmétiques (Lipton & Spelke, 2003).

2.2. Le Système Général de la Magnitude

Bien que l'ANS apparaisse comme étant un système majeur pour la construction des apprentissages mathématiques (nous reviendrons ultérieurement sur cette question), certains auteurs postulent l'existence d'un système général de traitement de la magnitude plutôt que d'un système spécifique aux nombres comme l'ANS (Meyer, 2015). C'est le cas de Walsh (2003), qui propose une théorie de la magnitude (ATOM, « A Theory Of Magnitude ») regroupant trois domaines qui constituent ensemble le Système Général de la Magnitude : le temps (la durée), l'espace et la numérosité. En comparaison à l'ANS, le Système Général de la Magnitude prendrait donc en compte des dimensions physiques de durée et d'espace partageant une même intuition de correspondance (plus *versus* moins grand, plus *versus* moins vite, etc.) et non exclusivement les nombres (Fayol, 2012). Des similarités entre les trois domaines constituant l'ATOM (le temps, l'espace et la numérosité) seraient indicatives de mécanismes de traitement communs. D'après Walsh (2003), les spécialisations pour le temps, l'espace et la numérosité se développeraient à partir d'un seul et même système de magnitude qui est opérant dès la naissance. Une des raisons pour laquelle Walsh (2003) postule l'existence de l'ATOM est que les trois domaines la constituant seraient localisés dans une même région cérébrale, à savoir le cortex pariétal inférieur. Plus particulièrement, plusieurs études employant des techniques d'imagerie mentale (fMRI, EEG) ont montré que les stimuli temporels et spatiaux activent le cortex pariétal inférieur droit tandis que les tâches numériques activent quant à elles le cortex pariétal de manière bilatérale (Chochon, Cohen, Van De Moortele & Dehaene, cités par Walsh, 2003 ; Rao, Mayer & Harrington, 2001 ; Simon, Mangin, Cohen, Le Bihan & Dehaene, 2002). Une activation pariétale droite dans des tâches numériques serait associée à l'estimation et à la comparaison plutôt qu'au calcul qui repose sur le langage (Cohen & Dehaene, 1997 ; Seymour, Reuter-Lorenz & Gazzaniga, 1994, cités par Walsh, 2003). De cette manière, une lésion du cortex pariétal inférieur droit va préférentiellement toucher les traitements spatiaux et temporels tandis qu'une lésion survenant à gauche va plutôt toucher les traitements numériques. Selon Dehaene (1992), seul l'hémisphère gauche est capable d'utiliser le codage verbal requis dans le calcul. En effet, l'utilisation des informations spatiales et temporelles et des informations numériques diffèrent quant à leur output : le traitement exact du nombre requière des représentations verbales ainsi qu'un output verbal tandis que les

informations spatiales et temporelles sont plus importantes pour la coordination de l'action.

Par ailleurs, plus qu'un recouvrement entre les régions cérébrales associées au temps, à l'espace et à la numérosité, des études utilisant la stimulation magnétique transcrânienne (TMS) ont montré qu'une stimulation du cortex pariétal peut causer des déficits à la fois aux tâches spatiales mais également aux tâches de comparaison numérique et de discrimination temporelle (Walsh & Pasual-Leone, 2003, cités par Walsh, 2003), ce qui va dans le sens de l'ATOM.

En résumé, l'ensemble de ces données neuropsychologiques et neurophysiologiques montrent des mécanismes de traitement communs pour le temps, l'espace et l'estimation de quantités dont la localisation se situerait dans le cortex pariétal inférieur droit. L'idée de l'ATOM est alors que la fonction principale – ou du moins, la fonction de liaison – du cortex pariétal est la nécessité de coder des informations concernant la magnitude dans le monde externe afin de pouvoir les utiliser dans l'action (Walsh, 2003). De cette manière, l'estimation et la comparaison de quantités sont étroitement liées au temps et à l'espace, formant alors un système général de traitement de la magnitude pouvant être appelé « ATOM ». Ce système pourrait être initialement impliqué dans les acquisitions numériques (Meyer, 2015).

2.3. L'implication des processus de quantification dans l'apprentissage mathématique

Comme énoncé précédemment, les différents types de traitement de l'information numérique (le subitizing, le dénombrement et l'ANS) jouent un rôle dans l'acquisition des activités arithmétiques ultérieures. Les auteurs s'intéressent plus particulièrement au rôle joué par le subitizing et le Système Numérique Approximatif (ANS) dans l'apprentissage mathématique. Selon Feigenson et al. (2004), ces deux processus de traitement de l'information numérique contribuent largement à l'apprentissage mathématique. Ils seraient inerrants, déployés de manière automatique et n'émergeraient donc pas à travers l'apprentissage ou la culture. Le subitizing et l'ANS fourniraient alors à tout individu un certain « sens du nombre » qui serait intuitif et présent chez chacun, bien avant que les apprentissages mathématiques ne se mettent en place.

2.3.1. L'implication du subitizing

Peu d'études se sont intéressées à l'implication du subitizing dans l'acquisition des habiletés mathématiques. Néanmoins, quelques études ont porté sur la nature prédictive des compétences relatives au subitizing sur le développement des habiletés mathématiques de très jeunes enfants. C'est le cas de l'étude de Lembke et Foegen (2009) dans laquelle les auteurs ont étudié le lien entre les compétences numériques de base à 5 – 6 ans et les performances à un test standardisé de mathématiques à 6 – 7 ans. Ces auteurs ont proposé 4 tâches visant à évaluer les habiletés numériques de base : *subitizer* des petits ensembles de points, comparer deux nombres arabes entre eux, trouver le chiffre manquant dans une suite et identifier des nombres arabes. Les résultats obtenus démontrent que les performances globales en mathématiques à 6 – 7 ans sont corrélées aux performances de subitizing à 5 – 6 ans ainsi qu'aux habiletés à identifier un nombre arabe et à trouver un chiffre arabe manquant dans une suite de chiffres. Il existerait donc un lien entre les mathématiques et le subitizing d'une part, et la reconnaissance du code arabe d'autre part. Cependant, précisons qu'une corrélation n'implique pas nécessairement une relation causale.

2.3.2. L'implication du Système Numérique Approximatif (ANS)

Comme énoncé précédemment, il est largement admis que l'ANS joue un rôle important dans le développement des habiletés arithmétiques. Plusieurs études ont mis en évidence un lien entre les performances mathématiques et l'ANS (impliqué dans des tâches de comparaison d'une part, et de placement de nombres sur une ligne numérique d'autre part) (Lafay et al., 2013).

Tout d'abord, plusieurs études utilisant une tâche de comparaison de nombres arabes et un test standardisé en mathématiques ont mis en évidence un lien entre les performances mathématiques et les aptitudes à accéder aux représentations numériques via l'ANS. En effet, les enfants obtenant les meilleures performances dans les tâches de comparaison de nombres arabes sont également ceux qui obtiennent les meilleures performances au test standardisé en mathématiques évalué ultérieurement (De Smedt, Verschaffel & Ghesquière, 2009 ; Durand, Hulme, Larkin & Snowling, 2005 ; Mundy & Gilmore). Ensuite, d'autres études ont porté sur la relation entre les performances arithmétiques et les habiletés à placer des nombres sur une ligne

numérique, ce qui requiert l'accès direct aux représentations numériques mentales et donc, à l'ANS. Les résultats de ces études suggèrent que la précision de la ligne numérique mentale fournit une structure conceptuelle centrale pour l'organisation d'un grand nombre de connaissances numériques et d'aptitudes arithmétiques (Booth & Siegler, 2008). Il est d'ailleurs admis que les enfants présentant des troubles d'apprentissage mathématiques génèrent souvent des représentations logarithmiques sur la ligne numérique (correspondant à une tendance à surestimer les petits nombres et à sous-estimer les plus grands) tandis que les enfants du même âge emploient déjà des représentations linéaires (permettant un placement précis des nombres sur la ligne numérique) (Lanfranchi, Berteletti, Torrisi, Vianello & Zorzi, 2014). Finalement, quelques études se sont intéressées au lien entre les performances mathématiques et les habiletés à traiter l'information numérique non-symbolique, c'est-à-dire l'ANS lui-même. Plus particulièrement, ces études proposaient des tâches de comparaison de nombres présentés de manière non-symbolique suivies, plus tard, d'un test standardisé en mathématiques. Toutes ont démontré l'existence d'un lien entre les habiletés de l'ANS et les habiletés arithmétiques. Les compétences de comparaison de nombres présentés de manière non-symbolique sont donc prédictives des performances à un test standardisé en mathématiques réalisé ultérieurement (Gilmore, McCarthy & Spelke, 2010 ; Inglis, Attridge, Batchelor & Gilmore, 2001 ; Mazzocco, Feigenson & Halberda, 2011 ; Mazzocco & Thompson, 2005 ; Mundy & Gilmore, 2009).

En résumé, ces diverses études ont démontré l'existence de liens entre les performances mathématiques globales et le Système Numérique Approximatif et, plus exactement, les représentations numériques ainsi que les habiletés à comparer des quantités présentées symboliquement ou non-symboliquement (Lafay et al., 2013). Libertus et al. (2013) ajoutent que la précision de l'ANS pourrait avoir un rôle à jouer dans la détermination des capacités mathématiques précoces, avant même que l'enfant n'ait acquis le système symbolique des nombres requis pour le comptage verbal. Il y aurait donc un lien étroit entre un certain sens primitif du nombre et le développement des capacités mathématiques plus formelles.

Après la présentation du syndrome génétique qu'est la Trisomie 21 ainsi que des capacités numériques de base, nous allons à présent discuter du développement de ces capacités numériques de base chez les personnes porteuses de trisomie 21.

3. Les capacités numériques de base chez les personnes porteuses de Trisomie 21

Comme énoncé précédemment, il est admis que les personnes porteuses de trisomie 21 présentent des difficultés en mathématiques en comparaison à des enfants tout-venant de même âge mental (Camos, 2009). Plus particulièrement, elles présentent des performances plus faibles concernant les connaissances de base en mathématiques, les capacités arithmétiques et le comptage. Ces difficultés pourraient provenir de leur niveau d'intelligence global et/ou de leur profil cognitif atypique (Sella, Lanfranchi & Zorzi, 2013). Les auteurs ne s'accordent pas sur la question et l'origine de ces difficultés mathématiques reste encore inconnue ou, du moins, incertaine.

3.1. Une altération du subitizing et un retard de l'ANS comme source des difficultés mathématiques

D'après certains auteurs, les enfants tout-venant parviennent à faire la distinction entre les numérosités 2 et 3 dès l'âge de 5 mois (Starkey & Cooper, 1980, cités par Camos, 2009) et même dès un à trois jours (Antell & Keating, 1983). Cette distinction renvoie au subitizing qui intervient dans la discrimination de petites quantités. En utilisant le paradigme d'habituation, Paterson, Brown, Gsödl, Johnson et Karmiloff-Smith (1999) ainsi que Paterson, Girelli, Butterworth et Karmiloff-Smith (2006) ont mis en évidence que les enfants porteurs de trisomie 21 (âge chronologique moyen de 2,6 ans ; âge mental moyen de 1,3 ans) ne parviennent pas à réaliser cette distinction et présenteraient donc un déficit spécifique du subitizing. Les représentations numériques seraient identiques mais se développeraient plus tard chez l'enfant porteur du syndrome en comparaison aux enfants tout-venant. Les difficultés mathématiques présentées par les enfants atteints de trisomie 21 seraient alors dues à un retard sévère au niveau des processus de plus bas niveau apparaissant tôt dans leur développement.

Dans leur étude, Sella, Lanfranchi et Zorzi (2013) évaluent à la fois le subitizing et le Système Numérique Approximatif (ANS) grâce à une tâche de comparaison selon deux conditions différentes. Dans la première condition, les sujets doivent dire si une quantité de points vue correspond à celle vue précédemment ou non (les ensembles varient de 1 à 9 points). Dans la seconde condition, les sujets doivent dire si une quantité de points vue correspond au nombre arabe présenté précédemment ou non.

Cette seconde condition permet d'évaluer l'efficacité de la routine de comptage ainsi que la compréhension du principe de cardinalité. Pour réussir la tâche, les enfants devaient donc avoir compris le principe de cardinalité. Le groupe expérimental de cette étude est composé de 21 enfants porteurs de trisomie 21 (âge chronologique moyen de 14,2 ans) appariés à des enfants tout-venant de même âge chronologique et de même âge mental (âge mental moyen de 5,4 ans). Les résultats montrent que les performances de subitizing (discrimination de petites quantités) des enfants porteurs de trisomie 21 sont altérées et ce, même en comparaison aux enfants tout-venant de même âge mental. De plus, le degré de précision de leurs réponses pour des petites quantités *subitizables* diminue avec l'augmentation des numérosités tandis qu'elle reste stable et à son maximum chez les enfants tout-venant de même âge chronologique et de même âge mental. Ces résultats peuvent s'expliquer par le fait que les enfants porteurs de trisomie 21 utilisent l'ANS pour dénombrer des petites quantités normalement *subitizables* alors que les enfants tout-venant issus des deux groupes contrôles (enfants tout-venant de même âge mental et de même âge chronologique) utilisent le processus de subitizing. Par ailleurs, un effet de rapport (stipulant que plus le rapport entre les quantités se rapproche de un et plus il sera difficile de les comparer) pour la discrimination de grandes quantités est mis en évidence chez les enfants porteurs de trisomie 21, ce qui témoignerait de l'efficacité de l'ANS. Cependant, la discrimination de grandes quantités est moins précise chez les enfants porteurs du syndrome en comparaison aux enfants tout-venant de même âge chronologique, mais pas en comparaison aux enfants tout-venant de même âge mental ; ce qui signifierait que l'ANS est effectivement préservé mais retardé chez cette population d'enfants. Les capacités numériques des enfants porteurs de trisomie 21 semblent donc alignées à celles des enfants tout-venant de même âge mental mais pas à celles des enfants tout-venant de même âge chronologique. Ces résultats vont donc, comme ceux de Paterson et al. (1999 ; 2006), dans le sens d'une altération du processus de subitizing et d'une préservation du Système Numérique Approximatif (ANS) qui est cependant sévèrement retardé en comparaison aux enfants tout-venant de même âge chronologique. Les difficultés en mathématiques retrouvées chez les enfants porteurs de trisomie 21 proviendraient alors d'une faiblesse dans les capacités numériques de base qui sont fondamentales pour l'apprentissage mathématique.

Ensuite, une étude conduite par Lanfranchi, Berteletti, Torrisi, Vianello et Zorzi (2014) a permis d'évaluer l'estimation numérique chez des enfants et adolescents porteurs de trisomie 21 grâce à une tâche dans laquelle il est demandé aux participants de placer des nombres donnés sur une ligne numérique allant de 1 à 10 ou de 0 à 100 selon la condition. Tout comme dans l'étude de Sella et al. (2013), le groupe expérimental est composé de 21 enfants porteurs de trisomie 21 (âge chronologique moyen de 14,2 ans) appariés à des enfants tout-venant de même âge chronologique et de même âge mental (âge mental moyen de 5,4 ans). Les résultats de cette étude montrent tout d'abord que pour l'intervalle allant de 1 à 10, tous les enfants utilisent une représentation linéaire. Cependant, pour l'intervalle allant de 0 à 100, les enfants trisomiques ainsi que leurs pairs de même âge mental semblent utiliser une représentation logarithmique tandis que le groupe contrôle d'enfants de même âge chronologique utilisent une représentation linéaire. Ces résultats signifient que les enfants atteints du syndrome ainsi que les enfants tout-venant de même âge mental se basent sur une représentation intuitive et logarithmique quand le contexte numérique est difficile ou non familier (intervalle de 0 à 100) alors que lorsqu'il est familier (intervalle de 1 à 10), ils semblent utiliser une représentation linéaire. En conclusion, les performances des enfants porteurs de trisomie 21 sont alignées à celles des enfants tout-venant de même âge mental mais pas à celles des enfants tout-venant de même âge chronologique. Chez l'enfant trisomique, il semblerait alors que l'estimation numérique et le passage d'une représentation logarithmique à une représentation linéaire soit corrélée à leur âge mental tandis qu'elle est corrélée à l'âge chronologique chez l'enfant tout-venant. Les résultats de cette étude vont donc également dans le sens d'une relative préservation de la représentation de la quantité et par conséquent, du Système Numérique Approximatif.

Finalement, l'étude d'Abreu-Mendoza et Arias-Trejo (2015) a permis d'investiguer les capacités des individus porteurs de trisomie 21 à comparer des superficies et des numérosités à l'aide de deux tâches, faisant directement appel à l'ANS, où l'on observe le suivi des yeux. Dans la première, des images sont montrées au participant et il est demandé à celui-ci de fixer son regard sur l'image la plus grande. Dans la seconde, des images comportant un certain nombre d'animaux sont montrées au participant et il lui est demandé de fixer son regard sur l'image sur laquelle sont représentés le plus d'animaux (par exemple, 12 *versus* 18 singes). Le groupe

expérimental de cette étude est composé de 16 personnes porteuses de trisomie 21 (âge chronologique moyen de 12,2 ans) appariées à 16 personnes tout-venant de même âge chronologique et 16 personnes tout-venant de même âge mental (âge mental moyen de 4,2 ans), qui forment ainsi deux groupes contrôles. Les résultats de cette étude montrent que les personnes porteuses du syndrome obtiennent des performances aux deux tâches correspondant aux performances obtenues par les enfants tout-venant de même âge mental, mais non de même âge chronologique. De plus, les personnes atteintes de trisomie 21 présentent le même pattern de performances que les personnes issues de la population tout-venant, à savoir que leurs performances révèlent un effet de ratio et sont meilleures pour la tâche de comparaison de superficies que pour celle de comparaison de numérosités. Les personnes trisomiques seraient donc capables de discriminer des numérosités et des quantités continues (comme les superficies) si l'on se réfère à leur âge mental. A nouveau, cette étude met en évidence une certaine préservation du Système Numérique Approximatif chez l'enfant trisomique en comparaison à l'âge mental, mais non à l'âge chronologique.

Comme en témoignent les résultats de ces différentes études, plusieurs auteurs s'accordent sur l'hypothèse selon laquelle les difficultés mathématiques présentées par les personnes porteuses de trisomie 21 résulteraient d'une altération du processus de subitizing tandis que le Système Numérique Approximatif serait quant à lui relativement préservé en comparaison à l'âge mental, mais non à l'âge chronologique.

3.2. Les difficultés langagières comme source des difficultés mathématiques

Comme énoncé précédemment, l'acquisition des habiletés mathématiques est fortement influencée par le subitizing ainsi que par le Système Numérique Approximatif (ANS). Certains auteurs postulent que plus tard dans le développement, apparaît le langage et, plus particulièrement, les mots-nombres et la routine de comptage qui vont à leur tour jouer un rôle dans l'acquisition des habiletés mathématiques. Ces éléments vont s'associer aux deux types de traitement de l'information numérique déjà connus (le subitizing et l'ANS) afin de former un nouveau système numérique basé sur le langage (Lipton & Spelke, 2005). Comme nous le savons, les personnes porteuses de trisomie 21 présentent une certaine force

dans le domaine visuo-spatial. Par conséquent, selon Camos (2009), leurs difficultés en mathématiques ne devraient à priori pas être dues au processus de subitizing, qui repose largement sur les priorités spatiales des ensembles. Dans son étude, Camos (2009) a donc adapté le matériel utilisé par Xu et Spelke (2000) afin d'évaluer l'efficacité du Système Numérique Approximatif (ANS) chez 12 enfants porteurs de trisomie 21 (âge chronologique moyen de 6,1 ans) grâce à une tâche de discrimination de grandes quantités. Pour s'assurer que les résultats obtenus reflètent les performances de l'ANS et non du subitizing ou du système numérique basé sur le langage, les enfants sélectionnés ne connaissaient pas les mots-nombres et ne savaient pas utiliser une routine de comptage. Chaque enfant trisomique a été apparié à deux enfants tout-venant : un enfant de même âge chronologique et un enfant de même âge mental (âge mental moyen de 3,6 ans). Deux groupes contrôles et un groupe expérimental ont ainsi été formés. L'étude consiste à présenter des livrets contenant des ensembles de 8, 12 ou 16 points. Après qu'un livret lui ait été présenté, l'enfant devait reconnaître, sur des planches qui lui étaient montrées, la numérosité correspondant au livret qu'il avait vu précédemment. Chacun des participants a été testé sur deux comparaisons : 8 *versus* 12 points et 8 *versus* 16 points. Les résultats montrent qu'il y a plus de réponses correctes pour les collections de 8 *versus* 16 points que pour celles de 8 *versus* 12 points. Cette performance ne semble pas différer de manière significative entre les trois groupes. Ces résultats signifieraient que les enfants porteurs de trisomie 21 sont capables, tout comme les enfants tout-venant de même âge chronologique et de même âge mental, de faire la distinction entre des grandes quantités lorsque le ratio entre celles-ci est assez élevé (8 *versus* 16) mais pas lorsqu'il est plus faible (8 *versus* 12). Le Système Numérique Approximatif (ANS) semblerait donc relativement préservé chez les enfants porteurs du syndrome.

Camos (2009) postule alors que si l'ANS est préservé et que les difficultés mathématiques ne peuvent, selon lui, pas être dues au processus de subitizing (étant donné que les personnes porteuses de trisomie 21 présentent des capacités relativement préservées dans le domaine visuo-spatial sur lequel repose largement le subitizing), la source de ces difficultés mathématiques proviendrait du troisième système, à savoir le système numérique basé sur le langage. Ce système, et le langage de manière générale, sont très importants pour l'acquisition des habiletés mathématiques. Or, nous savons que les enfants porteurs de trisomie 21 présentent d'importantes difficultés langagières

et ce, essentiellement dans l'apprentissage de la séquence de nombres et de la routine de comptage. Camos (2009) met alors en avant l'implication des capacités verbales dans les habiletés numériques et pointe les difficultés langagières comme principale source des difficultés mathématiques présentées par les personnes porteuses de trisomie 21. Cette hypothèse reste cependant incertaine étant donné que certaines personnes porteuses du syndrome sont capables d'acquérir des concepts numériques assez complexes tels que la cardinalité, l'arithmétique, la gestion de l'argent, etc. (Bochner, Outhred, Pieterse & Bashash, 2002, cités par Camos, 2009 ; Caycho, Gunn & Siegal, 1999 ; Nye et al., 2001 ; Paterson et al., 2006). De plus, pointer le langage comme source des difficultés en mathématiques chez les enfants porteurs de trisomie 21 semble être en contradiction avec les études présentées ci-avant (Abreu-Mendoza & Arias-Trejo, 2015 ; Lanfranchi et al., 2014 ; Paterson et al., 1999, 2006 ; Sella et al., 2013) qui expliquent ces difficultés par un retard sévère du développement des capacités numériques de base.

Ainsi, nous pouvons conclure que les études présentées ci-avant ainsi que l'étude de Camos (2009) concluent à une préservation de l'ANS chez les personnes porteuses de trisomie 21. De cette manière, Camos (2009) propose un modèle reprenant un Système Numérique Approximatif relativement préservé et une faiblesse du subitizing qui serait concordant avec les caractéristiques cognitives des personnes porteuses de trisomie 21 présentant des habiletés visuo-spatiales relativement préservées en comparaison à leurs capacités langagières. En effet, le Système Numérique Approximatif (ANS) partagerait des régions cérébrales communes avec les traitements visuo-spatiaux alors que le subitizing semblerait partager des régions cérébrales communes avec les traitements langagiers. Ainsi, la faiblesse du subitizing pourrait s'expliquer par le fait qu'il est sous-tendu par des capacités langagières qui sont déficitaires chez les personnes porteuses de trisomie 21 tandis que l'ANS serait préservé étant donné qu'il est sous-tendu par des capacités visuo-spatiales relativement préservées (Dehaene, Spelke, Pinel, Stanescu & Tsivkin, 1999 ; Stanescu-Cosson, Pinel, Van De Moortele, Le Bihan, Cohen & Dehaene, 2000, cités par Camos, 2009). Ce modèle intégrant les différents points de vue et hypothèses des auteurs pourrait donc rendre compte des difficultés mathématiques présentées par les personnes porteuses de trisomie 21.

3.3. Le dénombrement chez l'enfant porteur de Trisomie 21

Pour commencer, rappelons que le dénombrement implique trois principes de base : (1) le principe de correspondance terme à terme (chaque élément compté est associé à une et une seule étiquette verbale), (2) le principe d'ordre stable (l'endroit duquel démarre le dénombrement n'a pas d'importance) et (3) le principe de cardinalité (le dernier mot-nombre prononcé représente le cardinal de la collection). Ce dernier principe, le principe de cardinalité, serait efficient à partir de l'âge de 4 ans environ (Nye et al., 2001 ; Sella et al., 2013). Plusieurs auteurs ont cherché à répondre à une question concernant le dénombrement chez les enfants porteurs de trisomie 21 : *la compréhension du dénombrement est-elle superficielle ou profonde dans cette population d'enfants ?*

Premièrement, d'après Gelman et Cohen (1988, cités par Nye et al., 2001), des enfants porteurs de trisomie 21 âgés entre 4 et 6,10 ans sont moins performants que des enfants tout-venant de même âge mental pour résoudre un nouveau problème de dénombrement, pour réaliser un dénombrement standard ou un test de cardinalité. Ces auteurs concluent que les enfants tout-venant utiliseraient des principes de dénombrement innés alors que les enfants porteurs du syndrome apprendraient les procédures de comptage par cœur, sans comprendre les principes de dénombrement (dont la cardinalité). Ensuite, l'étude de Porter (1999) va dans le même sens en postulant que les enfants porteurs de trisomie 21 sont capables de dénombrer correctement un ensemble d'items mais sont incapables de détecter des erreurs de comptage commises par autrui, témoignant d'un manque de compréhension des principes de dénombrement.

Au contraire, Caycho et al. (1991) ont répliqué l'étude de Gelman et Cohen (1998, cités par Nye et al., 2001) en appariant 15 enfants atteints de trisomie 21 à 15 enfants tout-venant sur base du vocabulaire réceptif (âge mental verbal) et ne trouvent pas de différence significative entre les deux groupes dans des tâches qui requièrent une compréhension des principes de dénombrement. Ils concluent donc que les enfants porteurs de trisomie 21 sont capables d'utiliser ces principes et que les compétences en dénombrement sont reliées au langage réceptif plutôt qu'au Syndrome de Down en lui-même.

Finalement, une autre étude conduite par Nye, Fluck et Buckley (2001) évalue les performances de 23 enfants atteints de trisomie 21 (âge chronologique moyen de 64 mois) à des tâches d'énumération de la chaîne numérique verbale et de dénombrement. Ces enfants ont été appariés à des enfants tout-venant de même âge mental non-verbal (âge mental moyen de 36,7 mois) sur base de l'Echelle Internationale de Performance de Leiter (Leiter, 1979). Dans les tâches proposées, il est demandé à l'enfant de compter des objets ou de donner x objets à une poupée. Les résultats obtenus montrent que les enfants porteurs du syndrome produisent des séquences d'énumération de la chaîne verbale plus courtes, dénombrent de plus petits ensembles d'éléments et produisent moins de mots-nombres différents que les enfants tout-venant. Cependant, dans la tâche où il s'agit de donner x objets à une poupée, la plupart des enfants des deux groupes (groupe expérimental et groupe contrôle) sont incapables de donner précisément plus de trois items (ensembles *subitizables*), ce qui signifie que le principe de cardinalité n'est pas encore compris. Cette dernière observation va dans le sens des hypothèses soutenues par Caycho et al. (1991) selon lesquelles la compréhension des principes de dénombrement ne différerait pas entre la population d'enfants trisomiques et celle d'enfants tout-venant.

En conclusion, la question de la capacité de dénombrement chez l'enfant porteur de trisomie 21 (ont-ils une compréhension superficielle ou profonde du dénombrement ?) demeure controversée. Certains auteurs postulent que les enfants atteints de trisomie 21 ne comprennent pas les principes de dénombrement et, plus particulièrement, celui de cardinalité, tandis que d'autres postulent au contraire que ces principes peuvent être compris et acquis chez cette population d'enfants. L'étude conduite par Sella, Lanfranchi et Zorzi (2013) présentée ci-avant apporte des éléments supplémentaires en vue de répondre à cette question. En effet, pour pouvoir réaliser la tâche de cette étude, les participants devaient avoir compris le principe de cardinalité. Les résultats obtenus montrent que les performances obtenues par les enfants porteurs de trisomie 21 sont consistantes avec l'utilisation d'une routine de comptage sérielle. De ce fait, bien que leurs performances soient plus lentes et légèrement moins précises, il semblerait que la capacité de dénombrement des enfants porteurs du syndrome soit adéquate en comparaison à leur âge mental, mais non à leur âge chronologique. Ces dernières données signifieraient que la capacité de dénombrement serait préservée dans cette population mais sévèrement retardée.

Comme ces données en témoignent, il n'y a donc pas encore de consensus établi dans la littérature et cette question requerrait une investigation plus profonde.

3.4. Conclusion

En conclusion, différentes hypothèses sont proposées par les auteurs afin d'expliquer les difficultés mathématiques que présentent les personnes porteuses de trisomie 21. Ainsi, selon Paterson et al. (1999, 2006), Sella et al. (2013), Lanfranchi et al. (2014) ainsi que Abreu-Mendoza et Arias-Trejo (2015), ces difficultés s'expliqueraient par le fait que le processus de subitizing serait altéré tandis que l'ANS serait préservé mais sévèrement retardé en comparaison à l'âge chronologique. L'hypothèse proposée par Camos (2009) pointe, quant à elle, le langage comme source principale des difficultés mathématiques et met donc en avant l'implication des capacités verbales dans les habiletés mathématiques. Camos (2009) propose alors un modèle dans lequel le subitizing serait sous-tendu par le langage tandis que l'ANS serait quant à lui sous-tendu par les compétences visuo-spatiales. De ce fait, si les compétences relatives au subitizing sont altérées, c'est parce les capacités langagières des personnes porteuses de trisomie 21 sont altérées. Le déficit langagier (et plus particulièrement les difficultés d'apprentissage des mots-nombres et du dénombrement) se répercute ainsi sur les habiletés mathématiques. Les compétences relatives à l'ANS semblent quant à elles relativement efficaces étant donné que ce système est sous-tendu par des compétences visuo-spatiales relativement préservées en comparaison aux habiletés langagières. Finalement, la question de la capacité de dénombrement chez l'enfant porteur de trisomie 21 reste également controversée et aucun consensus n'est, à l'heure actuelle, retrouvé dans la littérature.

III. OBJECTIFS ET HYPOTHESES

Comme nous l'avons vu précédemment, les personnes porteuses de trisomie 21 présentent une faiblesse importante au niveau des habiletés langagières mais des compétences visuo-spatiales qui sembleraient moins altérées ou, du moins, relativement préservées en comparaison à leur âge mental. Les différentes études (Abreu-Mendoza et Arias-Trejo, 2015 ; Camos, 2009 ; Lanfranchi et al., 2014 ; Nye & al., 2001 ; Paterson et al., 1999, 2006 ; Sella & al., 2013) présentées ci-avant mettent en évidence des difficultés dans l'apprentissage mathématique des enfants porteurs du syndrome par rapport à des enfants tout-venant. De ces études découlent différentes hypothèses afin d'expliquer l'origine de ces difficultés mais cependant, aucun consensus n'est actuellement retrouvé dans la littérature. En effet, certains auteurs attribuent l'origine de ces difficultés mathématiques à une altération du subitizing et à un retard sévère de l'ANS (Abreu-Mendoza et Arias-Trejo, 2015 ; Lanfranchi et al., 2014 ; Paterson et al., 1999, 2006 ; Sella & al., 2013) tandis que d'autres (Camos, 2009) l'attribuent au déficit langagier présenté par les personnes porteuses de trisomie 21 qui se répercuterait sur leurs habiletés mathématiques. Au final, très peu d'études ont investigué la question des capacités numériques de base chez les personnes porteuses du syndrome et l'origine de leurs difficultés mathématiques reste encore incertaine.

C'est pourquoi, dans cette présente étude, nous avons investigué les capacités numériques de base chez des enfants, adolescents et jeunes adultes porteurs de trisomie 21. Plus particulièrement, nous avons investigué les capacités de comparaison non-symbolique de la magnitude (numérique et non-numérique) en contrastant les modalités d'entrées, visuelle et auditive. Ce contraste nous permettra de voir si le retard de développement des capacités numériques de base se retrouve de manière identique dans ces deux modalités ou non. Ainsi, nous pourrons voir si ce retard est lié à une modalité en particulier (la modalité visuelle ou la modalité auditive) ou s'il s'agit d'un retard de développement des capacités numériques de base plus général. De plus, nous avons proposé une tâche de subitizing permettant d'évaluer les capacités d'extraction de petites numérosités présentées visuellement en comparaison à l'estimation de plus grandes numérosités.

Afin de pouvoir comparer les résultats obtenus par les sujets porteurs de trisomie 21 à ce qui est attendu pour des enfants dont le développement est normal, l'ensemble des épreuves ont également été administrées à des sujets tout-venant de même âge mental que les sujets porteurs du syndrome.

Concernant à présent nos hypothèses de recherche, rappelons tout d'abord que le subitizing serait sous-tendu par le langage et que l'ANS (permettant l'estimation et la comparaison) serait quant à lui sous-tendu par les compétences visuo-spatiales. Ainsi, en tenant compte des caractéristiques du profil cognitif des personnes porteuses de trisomie 21 (dont les compétences visuo-spatiales sont relativement préservées en comparaison aux habiletés langagières), nous nous attendons à observer de meilleures performances dans les épreuves de comparaison non-symbolique de la magnitude impliquant l'ANS plutôt que dans les épreuves de subitizing. En d'autres termes, nous nous attendons, pour les épreuves impliquant l'ANS, à ce que les performances des sujets porteurs de trisomie 21 soient préservées mais retardées (préservées en comparaison à leur âge mental) tandis que pour les épreuves de subitizing, nous nous attendons à ce que leurs performances soient altérées et ce, même en comparaison à leur âge mental.

Ensuite, nous allons explorer l'amodalité de l'ANS (à l'aide d'épreuves évaluant la comparaison non-symbolique de la magnitude, n'impliquant donc pas que des numérosités), ce qui nous permettra de mieux appréhender l'origine des difficultés mathématiques présentées par les personnes porteuses de trisomie 21. Comme énoncé ci-avant, nous allons explorer les modalités visuelle et auditive afin de voir si le potentiel déficit présenté par les personnes porteuses du syndrome se retrouve dans une seule modalité (visuelle ou auditive) ou s'il s'agit plutôt d'un déficit généralisé de l'ANS, ce qui signifierait alors que ces personnes présenteraient un déficit numérique de base. De plus, l'investigation des capacités de comparaison non-symbolique de la magnitude pour des quantités numériques (quantités discrètes) et non-numériques (quantités continues) nous permettra de voir si le potentiel déficit porte autant sur la comparaison de quantités discrètes que de quantités continues. Enfin, il sera également intéressant de voir si le potentiel déficit se marque préférentiellement pour les tâches de comparaison non-symbolique de la magnitude mobilisant davantage la mémoire à court terme (telles que les épreuves pour lesquelles la présentation des stimuli se fait de manière séquentielle) ou non. Rappelons en effet que les personnes porteuses de

trisomie 21 présentent d'importantes difficultés en mémoire à court terme et ce, essentiellement en mémoire à court terme verbale (en comparaison à la mémoire à court terme visuo-spatiale qui semble, quant à elle, plus préservée). Ces difficultés pourraient alors se répercuter sur les capacités numériques de base des personnes porteuses du syndrome et ce, potentiellement plus pour les épreuves requérant le versant auditif de la mémoire à court terme en comparaison aux épreuves requérant le versant visuo-spatial de cette dernière.

De plus, pour les épreuves évaluant l'efficacité intellectuelle (les subtests « Similitudes », « Vocabulaire », « Cubes » et « Identification de concepts » de l'Echelle d'Intelligence de Wechsler) ainsi que pour celles évaluant la mémoire à court terme verbale (Empan de lettres et Catégospan) et visuo-spatiale (simultanée et séquentielle), nous nous attendons à observer de meilleures performances pour les épreuves dont la modalité est visuelle en comparaison aux épreuves dont la modalité est auditive.

Finalement, nous nous attendons à ce que le niveau de développement mathématique des sujets porteurs de trisomie 21 (évalué à l'aide des épreuves « Donne-moi », « Fluences de calculs verbaux oraux avec support imagé », « Litanie » et « Dénombrement rapide) soit plus faible que celui des sujets tout-venant.

IV. METHODOLOGIE

Cette étude a été menée avec l'accord du Comité d'Ethique Hospitalo-Facultaire Universitaire de Liège.

1. Les participants

Dans le cadre de cette étude, deux groupes de participants ont été constitués : un groupe expérimental composé de 29 enfants, adolescents et jeunes adultes porteurs de trisomie 21 ainsi qu'un groupe contrôle composé de 29 enfants tout-venant appariés à chaque sujet du groupe expérimental sur base de l'âge mental non-verbal.

1.1. Le groupe expérimental (groupe T21)

Le recrutement des sujets porteurs de trisomie 21 s'est effectué via différents organismes et écoles spécialisées : les consultations pédiatriques du CHC spécialisées dans la trisomie 21, l'Institut d'Enseignement Spécialisé Primaire et Secondaire de Vielsalm (IESPS), l'école secondaire d'enseignement spécialisé libre de Clairval et le Centre scolaire Notre-Dame de Cerexhe-Heuseux. Au total, 14 enfants et adolescents atteints de trisomie 21 ont ainsi été recrutés. Les sujets recrutés devaient présenter un niveau de développement cognitif de minimum 4 ans ainsi que des capacités langagières suffisantes que pour permettre la bonne compréhension des consignes des épreuves administrées.

Une étude identique à celle-ci a été menée durant l'année académique 2015-2016 et portait sur des sujets plus âgés. C'est pourquoi les 15 sujets les plus jeunes de cette précédente étude ont été repris afin de compléter notre échantillon. De cette manière, un groupe expérimental de 29 enfants, adolescents et jeunes adultes porteurs de trisomie 21 a été formé, dont 17 filles et 13 garçons. La moyenne d'âge chronologique de cet échantillon est de 16 ans et 8 mois (allant de 6,4 ans à 29,7 ans) (cf. Tableau 1).

Afin de recruter les participants, des lettres décrivant l'objectif de l'étude ainsi que le protocole de celle-ci (nombre de séances et épreuves administrées) ont été transmises aux parents des sujets. Si ces derniers marquaient leur accord afin que leur

enfant participe à l'étude, il leur était alors demandé de compléter un formulaire de consentement éclairé avant de planifier les séances de testing.

1.2. Le groupe contrôle

Une fois les séances de testing terminées avec les sujets du groupe expérimental, le groupe contrôle a pu être constitué. L'appariement aux 29 sujets du groupe expérimental a été réalisé sur base des scores bruts obtenus par les participants aux subtests « Cubes » et « Identification de concepts » de l'Echelle d'Intelligence de Wechsler (la WPPSI-II ou la WISC-IV, selon l'âge et le développement cognitif du sujet). Ces deux subtests permettent d'évaluer l'intelligence non-verbale des sujets (cf. « description du protocole de recherche » ci-dessous). Au vu des difficultés langagières importantes présentées par les personnes porteuses de trisomie 21, il semblait donc plus pertinent de baser notre appariement sur les subtests non-verbaux « Cubes » et « Identification de concepts », ces derniers étant plus représentatifs de l'intelligence des personnes porteuses du syndrome. De plus, afin que l'appariement soit le plus précis possible, une différence maximale de 4 points était admise entre les scores bruts de chaque sujet du groupe expérimental et de son sujet contrôle apparié.

Le groupe contrôle est ainsi constitué de 29 enfants tout-venant, dont 18 filles et 11 garçons. La moyenne d'âge chronologique de cet échantillon est de 4 ans et 6 mois (allant de 2,11 ans à 7,7 ans) (cf. Tableau 1). Un test t de Student a permis de confirmer l'équivalence entre les deux groupes au niveau de l'âge mental non-verbal ($t(29) = -1.67, p = 0.10$).

La procédure de recrutement a été la même que pour les sujets du groupe expérimental : des lettres d'information ont été transmises aux parents des sujets contrôles et un formulaire de consentement éclairé a dû être complété par les parents afin de permettre la participation de leur enfant à l'étude. Une importante base de données reprenant les résultats de divers enfants tout-venant ayant été créée au fur et à mesure des années, il n'a été nécessaire de tester que quatre nouveaux enfants tout-venant.

Tableau 1*Données démographiques, par groupe*

	N	AC moyen (écart-type)	AC minimum	AC maximum
Groupe expérimental	29	16.8 (6.1)	6.4	29.7
Groupe contrôle	29	4.6 (1.3)	2.11	7.7

Note. N = nombre d'effectifs ; AC = âge chronologique

2. Description du protocole de recherche

Dans cette étude, une batterie de tests déjà testée dans d'autres populations porteuses de syndromes génétiques a été employée (Rousselle, Dembour & Noël, 2013). Cette batterie est composée d'épreuves « papier/crayon » permettant d'évaluer le quotient intellectuel, la mémoire à court terme et le niveau de développement mathématique. La batterie est également composée d'épreuves informatisées évaluant la représentation de la magnitude ainsi que le subitizing.

2.1. Evaluation de l'efficienne intellectuelle

Afin d'évaluer les capacités générales de raisonnement verbal et les capacités visuo-spatiales, quatre subtests de l'échelle d'intelligence de Wechsler (WPPSI-II ou WISC-IV selon l'âge et le développement cognitif du sujet) ont été administrés aux participants ; à savoir, deux subtests verbaux (Similitudes et Vocabulaire) ainsi que deux subtests non-verbaux (Cubes et Identification de concepts). De plus, l'EVIP a été administré, permettant d'évaluer le niveau de langage réceptif des participants. Cette épreuve n'a été administrée que pour cette étude (et non pour celle réalisée il y a deux ans), les données ne sont donc disponibles que pour 14 des sujets du groupe expérimental (les sujets ayant été testés cette année).

2.1.1. Similitudes

Le subtest Similitudes permet d'évaluer le raisonnement verbal et la formation de concepts verbaux. Il fait également appel à la pensée catégorielle, à la compréhension auditive, à la mémoire, à l'expression verbale, au degré de conceptualisation et de catégorisation verbale ainsi qu'à l'abstraction. Dans ce subtest, il est demandé au sujet de trouver la ressemblance entre des paires d'objets ou de concepts (de complexité croissante) qui lui sont présentés oralement.

Pour la WPPSI-II comme pour la WISC-IV, 0, 1 ou 2 point(s) sont attribué(s) à chacun des items de ce subtest (24 items pour la WPPSI-II et 23 items pour la WISC-IV) en fonction de la réponse fournie par le sujet (exceptés les items 1 et 2 pour lesquels les notes de 0 ou 1 point sont attribuées). Pour la WPPSI-II, l'épreuve s'arrête lorsque le

sujet a obtenu 4 notes de 0 consécutives tandis que pour la WISC-IV, elle s'arrête lorsque le sujet a obtenu 5 notes de 0 consécutives.

2.1.2. Vocabulaire

Le Subtest Vocabulaire permet d'évaluer la connaissance du lexique et la formation de concepts verbaux. Il mesure également les bases de connaissance, la capacité à apprendre, la mémoire à long terme et le niveau de développement du langage. Ce subtest peut aussi faire intervenir la perception auditive, la compréhension ainsi que la conceptualisation verbale, la capacité d'abstraction et l'expression verbale. Dans la première partie de ce subtest, des images sont présentées au sujet qui doit alors les dénommer. Ensuite, dans la seconde partie, des mots de difficulté croissante lui sont présentés oralement et il doit en donner une définition verbale.

Pour la WPPSI-II, les items de 1 à 7 reçoivent la note de 0 ou 1 point tandis que les items de 8 à 25 reçoivent la note de 0, 1 ou 2 point(s) en fonction de la réponse fournie par le sujet. Pour la WISC-IV, les items de 1 à 4 reçoivent la note de 0 ou 1 point tandis que les items de 5 à 36 reçoivent la note de 0, 1 ou 2 point(s) en fonction de la réponse fournie par le sujet. Pour la WPPSI-II comme pour la WISC-IV, l'épreuve s'arrête lorsque le sujet a obtenu 5 notes de 0 consécutives.

2.1.3. Cubes

Le subtest Cubes permet d'évaluer la capacité à analyser et à synthétiser des stimuli visuels abstraits. Il implique également la formation de concepts non-verbaux, la perception et l'organisation visuelles, les processus simultanés, la coordination visuomotrice, l'apprentissage et la capacité à distinguer la figure du fond dans les stimuli visuels. Dans ce subtest, le sujet doit reproduire des modèles géométriques de complexité croissante à l'aide de cubes unicolores ou bicolores (rouges et blancs) et ce, en un temps limité. Ces modèles sont d'abord construits devant lui puis présentés sur une image.

Pour la WPPSI-II, les items de 1 à 6 reçoivent la note de 0, 1 ou 2 point(s) tandis que les items de 7 à 20 reçoivent la note de 0 ou 2 point(s) en fonction de la construction réalisée par le sujet. Pour la WISC-IV, les items de 1 à 3 reçoivent la note de 0, 1 ou 2

point(s), les items de 4 à 8 reçoivent la note de 0 ou 4 point(s) tandis que les items de 9 à 14 reçoivent la note de 0, 4, 5, 6 ou 7 point(s) en fonction de la construction réalisée par le sujet ainsi que du temps nécessaire pour la réaliser. Pour la WPPSI-II comme pour la WISC-IV, l'épreuve s'arrête lorsque le sujet a obtenu 3 notes de 0 consécutives.

2.1.4. Identification de concepts

Le subtest Identification de concepts permet d'évaluer la perception visuelle, la connaissance des objets représentés, la capacité de catégorisation, la conceptualisation et la capacité d'abstraction à partir d'un support imagé. Dans ce subtest, des planches composées de deux ou trois lignes d'images sont présentées au sujet qui doit choisir une image de chaque ligne afin qu'elles puissent aller ensemble en s'articulant autour d'un concept commun.

Pour la WPPSI-II comme pour la WISC-IV, 0 ou 1 point est attribué à chacun des 28 items en fonction de la réponse fournie par le sujet. Pour la WPPSI-II, l'épreuve s'arrête lorsque le sujet a obtenu 4 notes de 0 consécutives tandis que pour la WISC-IV, elle s'arrête lorsque le sujet a obtenu 5 notes de 0 consécutives.

2.1.5. EVIP

L'EVIP est une Echelle de vocabulaire en images Peabody permettant d'évaluer le niveau de langage réceptif des participants. Dans cette épreuve, 4 images sont présentées au sujet sur un écran d'ordinateur et un mot est énoncé oralement. Il est alors demandé au sujet de pointer, parmi les 4 images présentées, l'image correspondant au mot entendu.

L'épreuve est composée de 170 items de complexité croissante. 1 point est attribué pour chaque réponse correcte et l'épreuve s'arrête lorsque le sujet échoue 6 fois sur 8 items consécutifs (item plafond). Le score brut se calcule sur base de l'item plafond (correspondant à la plus basse série de 8 réponses consécutives contenant au moins 6 échecs) auquel on soustrait le nombre total d'échecs.

2.2. Evaluation de la mémoire à court terme verbale et visuo-spatiale

2.2.1. La mémoire à court terme verbale

Deux épreuves permettant d'évaluer la mémoire à court terme verbale ont été administrées : l'Empan de lettres et le Catégospan. Ces épreuves permettent de déterminer l'empan verbal du sujet. Pour chacune d'entre elles, trois essais sont administrés à chaque niveau et 1 point est attribué pour chaque réponse correcte (uniquement deux essais sont administrés si les deux premières réponses sont correctes ; le troisième essai n'est administré que si une des deux premières réponses est incorrecte). Ces épreuves s'arrêtent lorsque le sujet présente moins de deux réponses correctes sur les trois essais administrés à un niveau. L'empan correspond au plus haut niveau pour lequel le sujet a obtenu au moins deux réponses correctes sur les trois essais administrés.

2.2.1.1. Empan de lettres

L'épreuve d'Empan de lettres permet d'évaluer la boucle phonologique de la mémoire de travail ; c'est-à-dire la capacité du sujet à maintenir des informations en mémoire de travail. Dans cette épreuve, des séquences de lettres de longueur croissante (2 à 9 lettres) sont présentées oralement au sujet qui doit les répéter immédiatement et dans le bon ordre.

2.2.1.2. Catégospan

L'épreuve du Catégospan permet d'évaluer l'administrateur central de la mémoire de travail ; c'est-à-dire la capacité du sujet à maintenir et manipuler des informations en mémoire de travail. Dans la phase d'habituation de cette épreuve, l'expérimentateur montre au sujet des images appartenant à deux familles différentes, celle des animaux et celle de la nourriture, tout en les énonçant à voix haute. Il est ensuite demandé au sujet de replacer ces images par famille (d'abord les images appartenant à la famille des animaux et ensuite, celles appartenant à la famille de la nourriture). Dans un second temps, l'enfant doit énoncer le nom de l'image, en même temps qu'il les trie par famille. Finalement, durant la phase de test à proprement parler, des mots appartenant à la famille des animaux et à celle de la nourriture sont présentés oralement au sujet sans plus aucun support imagé. Il lui est alors demandé de les répéter par famille (d'abord les mots appartenant à la famille des animaux et ensuite, ceux appartenant à la famille de la nourriture).

2.2.2. La mémoire à court terme visuo-spatiale

Deux tâches permettant d'évaluer la mémoire à court terme visuo-spatiale ont été administrées : simultanée structurée et non structurée ainsi que séquentielle structurée et non structurée. Ces tâches permettent de déterminer l'empan visuo-spatial du sujet. Pour chacune d'entre elles, trois essais sont administrés à chaque niveau et 1 point est attribué pour chaque réponse correcte (uniquement deux essais sont administrés si les deux premières réponses sont correctes ; le troisième essai n'est administré que si une des deux premières réponses est incorrecte). Ces épreuves s'arrêtent lorsque le sujet présente moins de deux réponses correctes sur les trois essais administrés à un niveau. L'empan correspond au plus haut niveau pour lequel le sujet a obtenu au moins deux réponses correctes sur les trois essais administrés.

2.2.2.1. Simultanée

Dans la version simultanée de l'épreuve, une grille avec des points est présentée pendant cinq secondes au sujet. La taille des grilles et le nombre de points sur celles-ci augmentent au fur et à mesure de l'épreuve (empan de 2 à 10 évoluant d'une grille de 2x3 à une grille de 5x4). Le sujet reçoit alors une grille vierge sur laquelle il lui est demandé de placer des jetons sur les cases correspondant aux points de la grille qu'il a vue précédemment. Cette épreuve se déroule selon deux conditions : la position des points sur les grilles est soit structurée, soit non structurée.

2.2.2.2. Séquentielle

Dans la version séquentielle de l'épreuve, une grille vierge est présentée au sujet. L'expérimentateur pointe certaines cases de cette grille et il est ensuite demandé au sujet de placer des jetons sur les cases qui ont été pointées par l'expérimentateur. La taille des grilles et le nombre de cases pointées augmentent au fur et à mesure de l'épreuve (empan de 2 à 10 évoluant d'une grille de 2x3 à une grille de 5x4). Cette épreuve se déroule selon deux conditions : les cases pointées occupent des positions soit structurées, soit non structurées.

2.3. Evaluation du niveau de développement mathématique

Diverses épreuves mathématiques ont été proposées aux participants afin d'évaluer leur niveau de développement mathématique.

2.3.1. Tâche « Donne-moi »

Cette épreuve permet d'évaluer la compréhension de la cardinalité ainsi que la capacité du sujet à utiliser la procédure de comptage. Dans cette épreuve, des jetons sont placés sur la table et il est demandé au sujet de donner n jetons à l'expérimentateur (1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10 et 14). Pour les six premiers nombres, si le sujet réussit à donner n jetons, il lui est alors demandé de donner $n+1$ jetons à l'essai suivant. En revanche, s'il échoue, il lui est alors demandé de donner $n-1$ jetons à l'essai suivant.

Dans cette épreuve, trois essais sont administrés à chaque niveau et 1 point est attribué pour chaque réponse correcte. L'épreuve s'arrête lorsque le sujet présente moins de deux réponses correctes sur les trois essais administrés à un niveau. Le niveau de développement cardinal correspond à la plus grande numérosité pour laquelle le sujet a obtenu au moins deux réponses correctes sur les trois essais administrés.

2.3.2. Fluences de calculs verbaux oraux avec support imagé

Cette épreuve permet d'évaluer les compétences arithmétiques des participants. Une série de dix additions de complexité croissante sont présentées oralement au sujet, avec un support imagé. Il dispose alors de 150 secondes pour résoudre un maximum de calculs (10 calculs au total), et peut s'aider de jetons s'il le souhaite.

Dans cette épreuve, 1 point est attribué pour chaque réponse correcte. De plus, si le sujet parvient à résoudre les 10 calculs avant l'écoulement du temps, 1 point de bonus est attribué par tranche de 5 secondes économisées sur le temps imparti.

2.3.3. Litanie

Cette épreuve consiste à demander aux participants de compter le plus loin possible, à partir de 1 et jusqu'à 20 maximum, afin de s'assurer de leur connaissance des numéros verbaux oraux. L'expérimentateur est autorisé à donner une amorce si nécessaire. La note obtenue correspond au chiffre jusqu'auquel le sujet parvient à compter correctement.

2.3.4. Dénombrement rapide

Cette épreuve consiste à mesurer la capacité des participants à compter rapidement sur l'écran de l'ordinateur dans le but de déterminer s'ils sont capables de compter assez rapidement que pour énumérer le nombre d'items présentés dans une épreuve de comparaison numérique. Ainsi, huit chaînes de 8, 16, 6, 14, 9, 7, 18 et 12 points sont présentées dans un ordre pseudo-aléatoire au sujet. Il lui est alors demandé de compter ces points le plus rapidement possible et de donner à voix haute le nombre de points présentés.

Dans cette épreuve, 1 point est attribué pour chaque série dénombrée correctement. La note maximale est donc de 8.

2.4. Evaluation des traitements quantitatifs

2.4.1. Comparaison non-symbolique de la magnitude

Cinq épreuves informatisées ont été administrées afin d'évaluer les traitements quantitatifs de la magnitude non-symbolique uniquement. Parmi ces épreuves, deux permettent la comparaison de quantités continues (Longueur et Durée) et trois permettent la comparaison de quantités discrètes (Collection d'éléments simultanés, Séquence de points et Séquence de sons). Ces différentes épreuves permettent également de contraster les modalités visuelle et auditive.

L'entièreté des épreuves ont été administrées sur un ordinateur (avec écran tactile) à l'aide du logiciel expérimental E-Prime (Version 1.1, Psychology Software Tools, Inc., Pittsburgh, PA). Les sujets ont dû, pour chacune des épreuves, choisir entre deux réponses possibles et donc, deux quantités : une présentée sur la gauche de l'écran de l'ordinateur et l'autre, sur la droite. L'écran tactile de l'ordinateur est divisé en deux par une ligne médiane invisible, permettant de définir deux zones égales de réponses (gauche et droite). De ce fait, pour répondre, les sujets devaient s'aider d'un stylo tactile afin de pouvoir toucher le plus rapidement possible le côté de l'écran souhaité. Par ailleurs, chaque épreuve est introduite à l'aide d'une histoire mettant en scène des personnes qui ont souvent besoin de l'aide du participant. De cette manière, le matériel est rendu plus ludique et attrayant.

Il y a, pour chacune de ces épreuves de comparaison non-symbolique de la magnitude, une variation du ratio entre les magnitudes à comparer. Au total, six ratios de complexité croissante sont présentés tout au long de l'épreuve : 1:2, 2:3, 3:4, 5:6, 7:8 et 8:9. Tous les participants commencent avec une paire de stimuli qui varie selon les deux ratios les plus simples : 1:2 et 2:3 et ensuite, les autres ratios sont progressivement présentés selon le taux de bonnes réponses données par le sujet à chaque ratio. Cette variation du ratio permet d'évaluer le niveau de sensibilité de discrimination de quantités (numériques ou non-numériques) du sujet. Les différentes paires de stimuli sont présentées dans un ordre pseudo-aléatoire : il ne peut pas y avoir la même paire présentée sur deux essais consécutifs, pas plus de trois bonnes réponses présentées du même côté de l'écran d'ordinateur, et pas plus de deux présentations consécutives du même ratio. Toute épreuve est arrêtée lorsque le sujet échoue deux sur trois ratios consécutifs. Ce critère prend en compte les capacités de discrimination de quantités mais également les capacités attentionnelles. De cette manière, les six ratios ne sont pas administrés à tous les participants.

Deux paires de magnitude sont présentées pour chacun des six ratios. Le côté correspondant à la réponse correcte est contrebalancé : chaque paire apparaît quatre fois, deux fois avec la plus grande magnitude du côté gauche et deux fois avec la plus grande magnitude du côté droit. Lorsque tous les ratios sont présentés, les participants effectuent un total de 48 paires de stimuli dans chacune des épreuves (2 paires x 2 côtés x 2 présentations x 6 ratios).

Afin de s'assurer de la bonne compréhension des consignes, avant chaque épreuve, les participants ont dû réaliser une phase d'entraînement dans laquelle étaient présentées des paires de magnitude dans un ratio de 1:3.

2.4.1.1. Comparaison de quantités continues (non numériques)

Deux épreuves permettent de comparer des quantités non numériques (continues) : Comparaison de Longueur et Comparaison de Durée, évaluant la discrimination de quantités continues présentées dans les modalités visuelle et auditive.

2.4.1.1.1. Modalité visuelle : Longueur

Dans l'épreuve de Comparaison de Longueur, il est demandé aux participants de comparer la longueur de deux lignes blanches présentées successivement. Les essais commencent par la présentation de deux croix rouges situées à gauche et à droite de

l'écran de l'ordinateur. Lorsque l'épreuve commence, la croix de gauche disparaît pour laisser place à la première ligne blanche qui apparaît durant 1000ms. Ensuite, la croix de gauche réapparaît et c'est alors celle de droite qui disparaît pour laisser place à la seconde ligne blanche, durant 1000ms. Il est alors demandé au sujet de toucher l'écran du côté où est apparue la ligne blanche la plus longue.

2.4.1.1.2. Modalité auditive : Durée

Dans l'épreuve de Comparaison de Durée, il est demandé aux participants de comparer la durée de deux sons présentés successivement. Afin d'attribuer un emplacement aux sons, deux personnages jouant de la flûte sont représentés sur l'écran, l'un à gauche et l'autre, à droite. Au déclenchement du premier son, un cadre rouge apparaît autour du personnage de gauche. Ensuite, lorsque le premier son s'arrête, l'encadrement disparaît et apparaît alors le second son, ce qui déclenche l'encadrement du personnage de droite. Il est alors demandé au sujet de toucher l'écran du côté du personnage qui a « soufflé le plus longtemps dans sa flûte », autrement dit, il lui est demandé de toucher le côté de l'écran où est apparu le son le plus long.

2.4.1.2. Comparaison de quantités discrètes (numériques)

Trois épreuves permettent d'évaluer les capacités de discrimination de quantités numériques (discrètes) présentées de manière séquentielle (Séquence de sons et Séquence de points) ou simultanée (Collection d'éléments simultanés) dans les modalités visuelle et auditive.

2.4.1.2.1. Modalité visuelle : Collection d'éléments simultanés

Dans l'épreuve de Collection d'éléments simultanés, il est demandé aux participants de comparer la quantité de deux collections. Deux boîtes contenant des pièces de puzzle noires sont présentées simultanément à l'écran. Le nombre de pièces de puzzle ainsi que leur superficie dans la boîte varient selon deux conditions : une condition congruente et une condition non congruente. Dans la première, la boîte contenant le plus de pièces de puzzle est également la boîte contenant les pièces les plus grandes en superficie. De cette manière, lorsque le nombre de pièces augmente, la surface augmente dans le même rapport. En revanche, dans la seconde condition (condition non congruente), la boîte contenant le plus de pièces de puzzle est la boîte contenant les pièces les plus petites en superficie. Ainsi, lorsque le nombre de pièces augmente, la surface diminue dans le même rapport.

Les essais commencent par la présentation de deux croix rouges sur l'écran, l'une à gauche et l'autre, à droite. Lorsque l'épreuve débute, les deux croix sont remplacées par deux collections qui sont alors présentées simultanément pendant deux secondes. Il est ensuite demandé au sujet de toucher l'écran du côté de la boîte contenant le plus de pièces de puzzle. Il lui est bien précisé qu'il doit choisir la boîte contenant le plus de pièces de puzzle, sans prêter attention à leur taille et sans les compter étant donné qu'il n'en aurait pas le temps.

2.4.1.2.2. Modalité visuelle : Séquence de points

Dans l'épreuve de Séquence de points, il est demandé aux participants de comparer la quantité de deux séquences de points présentées successivement à gauche et puis à droite de l'écran. La quantité de points présentés ainsi que la durée de présentation varient selon deux conditions : une condition congruente et une condition non congruente. Dans la première condition, la séquence de points la plus grande est également celle qui apparaît le plus longtemps. En revanche, dans la seconde condition (condition non congruente), la séquence de points la plus grande est celle qui apparaît le moins longtemps à l'écran.

Les essais commencent par la présentation de deux croix rouges sur l'écran, l'une à gauche et l'autre, à droite. Lorsque l'épreuve débute, la croix de gauche disparaît pour faire place à la première séquence de points. Ensuite, elle réapparaît et c'est au tour de la croix de droite de disparaître pour être remplacée par la seconde séquence de points. Il est alors demandé au sujet de toucher l'écran du côté de la séquence de points la plus grande. Il lui est bien précisé que le temps de présentation n'a pas d'importance.

La charge visuelle dans cette épreuve est moins importante que dans celle de Collection d'éléments simultanés.

2.4.1.2.3. Modalité auditive : Séquence de sons

Dans l'épreuve Séquence de sons, il est demandé aux participants de comparer la quantité de sons de même tonalité présentés successivement. Comme pour l'épreuve Séquence de points, la quantité de sons présentés ainsi que leur durée de présentation varient selon une condition congruente (dans laquelle la séquence de sons la plus grande est également celle qui apparaît le plus longtemps) et une condition non congruente (dans laquelle la séquence de sons la plus grande est celle qui apparaît le moins longtemps).

Comme dans la tâche de Comparaison de durée, deux personnages sont représentés sur l'écran (un à gauche et l'autre, à droite) et s'encadrent en fonction de la source (gauche ou droite) d'apparition du son, permettant ainsi d'attribuer un emplacement aux sons entendus. Lorsque l'épreuve commence, la première séquence de sons apparaît et c'est le personnage de gauche qui est encadré en rouge. Ensuite, le cadre rouge se déplace autour du personnage de droite, en même temps que la seconde séquence de sons apparaît. Il est alors demandé au sujet de toucher l'écran du côté du personnage qui a émis le plus de sons.

2.4.2. Subitizing

Cette épreuve s'administre également sur l'ordinateur, à l'aide du même logiciel expérimental E-Prime. Elle nécessite, en plus, l'utilisation d'une clé vocale numérique enregistrant le temps de latence et d'un pavé numérique enregistrant la numérosité.

Dans cette épreuve, des ensembles de points (compris entre 1 et 7) sont rapidement présentés à l'écran. Il est alors demandé au sujet de dire à voix haute le nombre de points qui sont apparus à l'écran et ce, le plus rapidement et le plus précisément possible. Il est précisé au sujet qu'il ne doit pas utiliser le dénombrement parce qu'il n'en aurait pas le temps. Chaque essai commence par l'apparition d'une fleur mauve au centre de l'écran durant 500ms, suivie par la présentation de l'ensemble de points pendant 200ms. Les points sont ensuite cachés par un masque pendant 500ms avant que n'apparaisse un point d'interrogation sur l'écran, jusqu'à ce que le sujet donne oralement sa réponse. La réponse verbale active la clé vocale numérique et l'expérimentateur peut ensuite enregistrer la réponse du sujet sur le pavé numérique, ce qui déclenche alors l'essai suivant. Tous les points sont noirs et de même taille (6mm de diamètre), présentés de manière aléatoire. Chaque numérosité (allant de 1 à 7) est présentée six fois dans différentes configurations. En revanche, le masque recouvrant l'ensemble de points est composé de points de différentes tailles recouvrant toute la surface de l'écran.

Tout comme dans les autres épreuves informatisées de comparaison non-symbolique de la magnitude, l'épreuve de Subitizing débute par 7 essais afin de s'assurer de la bonne compréhension des consignes par les participants.

De plus, avant de débiter l'épreuve de Subitizing, une épreuve de « Subitizing Couleur » a été présentée aux sujets. Cette dernière s'organise de la même manière que l'épreuve de Subitizing, à l'exception que les points présentés rapidement ne sont pas noirs mais colorés (rouges, bleus, jaunes ou verts). Il est alors demandé aux participants de donner non pas la numérosité de l'ensemble de points mais bien leur couleur. Les points présentés lors des essais ont tous la même couleur mais le masque les recouvrant à la fin de chaque essai est constitué de points de différentes couleurs. Cette épreuve permet de contrôler, chez chaque participant, leur capacité de perception rapide de la cible en dehors de la capacité à quantifier la numérosité.

3. La procédure

Tout d'abord, nous avons commencé par tester les sujets du groupe expérimental, c'est-à-dire, les sujets porteurs de trisomie 21. Ensuite, une fois les résultats aux épreuves évaluant l'âge mental non-verbal connus pour chacun des sujets porteurs de trisomie 21, il a été possible de tester les sujets contrôles (c'est-à-dire, issus de la population tout-venant) afin qu'un appariement puisse être effectué individuellement entre les sujets du groupe expérimental et ceux du groupe contrôle sur base de l'âge mental non-verbal.

Que ce soit pour les sujets du groupe expérimental ou ceux du groupe contrôle, les séances de testing se sont déroulées soit au domicile du participant, soit au sein de l'école du participant (avec l'accord de l'instituteur/institutrice et de la direction), soit encore au sein même de l'Université de Liège. Dans la mesure du possible, les séances se sont déroulées dans une pièce isolée ou dans un endroit calme. Certains des participants plus jeunes étaient accompagnés d'un parent afin de les mettre le plus en confiance et le plus en sécurité possible. L'administration de l'entièreté des épreuves s'est réalisée en trois ou quatre séances d'une heure environ (les séances étant plus courtes pour les participants plus jeunes), selon les capacités attentionnelles et la motivation des participants.

Pour tous les participants, l'évaluation a débuté, lors de la première séance, par les épreuves évaluant l'efficacité intellectuelle. Ensuite, les autres épreuves (mémoire à court terme, évaluation du niveau de développement mathématique, évaluation de la comparaison non-symbolique de la magnitude et l'épreuve de Subitizing) ont été réparties entre le reste des séances de manière plus ou moins aléatoire selon les participants.

4. Traitement des résultats

L'entièreté des analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du programme Statistica (version 13.3). La probabilité de dépassement utilisée a été fixée à $p < .05$ avec un intervalle de confiance fixé à 95%.

Afin de comparer chaque sujet porteur de trisomie 21 à un sujet contrôle, c'est le test t de Student pour échantillons appariés qui a été utilisé. Cette analyse statistique permet de tester l'égalité des moyennes entre deux échantillons appariés. De cette manière, si la probabilité de dépassement est supérieure à .05, l'hypothèse d'égalité des moyennes est vérifiée mais en revanche, si cette probabilité est inférieure à .05, l'hypothèse d'égalité des moyennes doit être rejetée et une différence significative entre les deux échantillons est alors mise en évidence. Dans le cadre de cette étude, le test t de Student a permis de comparer les performances du groupe expérimental et du groupe contrôle concernant les épreuves d'efficienne intellectuelle, de mémoire à court terme, de développement mathématique, de comparaison non-symbolique de la magnitude et de Subitizing (pour le rang de subitizing obtenu).

Etant donné que l'appariement a été réalisé sur chacun des sujets pris individuellement et non pas sur le groupe en lui-même, nous pouvons considérer que chaque sujet contrôle est « identique » au sujet porteur de trisomie 21 auquel il est apparié, étant donné qu'ils se correspondent au niveau de l'âge mental non-verbal. De plus, il existe une très grande étendue d'âge chronologique dans le groupe des sujets porteurs de trisomie 21. Pour ces diverses raisons, il semblait plus pertinent de réaliser des tests t de Student pour échantillons appariés plutôt que des test t de Student pour échantillons indépendants.

Ensuite, pour l'épreuve de Subitizing, c'est une analyse de variance (ANOVA) à mesures répétées qui a été réalisée. Cette analyse est utilisée lorsque qu'une « même » mesure est effectuée à plusieurs reprises sur les mêmes sujets et permet de tester l'égalité des moyennes entre ces différentes mesures. C'est le cas pour l'épreuve de Subitizing, dans laquelle 7 numérosités différentes ont été administrés à chacun des sujets. Tout comme pour le test t de Student pour échantillons appariés, si la probabilité de dépassement est supérieure à .05, l'hypothèse d'égalité des moyennes est vérifiée mais si cette probabilité est inférieure à .05, l'hypothèse d'égalité des moyennes doit être rejetée et une différence significative entre les différentes mesures est alors mise

en évidence. De plus, l'analyse de variances permet également de comparer deux échantillons afin de voir s'ils sont équivalents ou non. Uniquement pour la comparaison du rang de subitizing (correspondant à la numérosité pour laquelle le sujet a obtenu un minimum de 66% de réponses correctes), un test t de Student pour échantillons appariés a été réalisé.

Le test de sphéricité de Mauchly a été réalisé au préalable afin de s'assurer de l'égalité des moyennes entre les différentes mesures. Dans le cas où l'hypothèse de sphéricité était rejetée, plusieurs corrections (ϵ de Greenhouse et Geisser et ϵ de Huynh-Feldt) ont été appliquées.

Par ailleurs, pour chacune des analyses statistiques réalisées, la taille de l'effet a été calculée (représentée par « η^2 » pour les tests t de Student pour échantillons appariés et par « η_p^2 » pour l'ANOVA à mesures répétées). La taille de l'effet permet d'apprécier l'importance de la différence de moyennes entre les deux échantillons étudiés et fait référence à la force ou à la magnitude de l'association. Cet indice varie entre 0 et 1. Cohen (1988) a élaboré différentes balises afin de faciliter son interprétation : (1) autour de .01, l'effet est considéré comme étant de petite taille, (2) autour de .06, l'effet est considéré comme étant de taille moyenne et (3) autour de .14 et plus, l'effet est considéré comme étant de grande taille.

Finalement, il est à noter qu'au vu de l'hétérogénéité des performances des différents participants, l'entièreté des épreuves n'a pas pu être administrée à chacun d'entre eux. C'est pourquoi le nombre de participants peut varier selon les épreuves administrées et les groupes.

V. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

1. Efficience intellectuelle, mémoire à court terme et développement mathématique

Tout d'abord, il est à noter que tous les sujets porteurs de trisomie 21 n'ont pas su réaliser l'entièreté des épreuves. Cela peut s'expliquer par leur faible niveau développemental, par les difficultés langagières de certains, par un potentiel manque de compréhension des consignes ou encore par les capacités attentionnelles limitées de certains participants. De même, tous les sujets du groupe contrôle n'ont pas su réaliser l'ensemble des épreuves administrées, ce qui peut être expliqué par le très jeune âge de certains d'entre eux. C'est pourquoi le nombre d'effectifs n'est pas le même selon les différentes épreuves (cf. Tableau 2). Cependant, l'analyse statistique utilisée (le test t de Student pour échantillons appariés) ne prend pas en compte les données manquantes dans la réalisation du calcul statistique.

Premièrement, concernant les épreuves évaluant l'efficience intellectuelle, il n'y a pas de différence significative entre les deux groupes pour les subtests Cubes et Identification de concepts sur lesquels se base l'appariement. Ces données signifient que les deux groupes sont bien équivalents au niveau de l'âge mental non-verbal (calculé sur base de l'addition des scores bruts obtenus aux subtests Cubes et Identification de concepts), $t(29) = -1.67, p = .10 (\eta^2 = .09)$. Ils semblent également l'être au niveau du subtest Similitudes, $t(19) = -1.14, p = .26 (\eta^2 = .067)$ ainsi qu'au niveau du subtest Vocabulaire, $t(22) = -2, p = .058 (\eta^2 = .16)$. Néanmoins, pour ce dernier subtest (Vocabulaire), les résultats mis en évidence sont marginalement significatifs, ce qui laisserait à penser que les sujets porteurs de trisomie 21 obtiennent tout de même des performances inférieures à celles des sujets du groupe contrôle pour cette épreuve.

Ensuite, concernant les épreuves de mémoire à court terme verbale, nous pouvons observer que les sujets porteurs de trisomie 21 obtiennent des performances significativement inférieures à celles des sujets du groupe contrôle et ce, aussi bien pour l'épreuve d'Empan de lettres¹ ($t(21) = -9.13, p = .000 ; \eta^2 = .8$) que pour l'épreuve

¹ L'analyse statistique porte sur le score total (et non sur l'empan, présenté en Annexe N).

du Catégospan² ($t(18) = -3.36, p = .003 ; \eta^2 = .39$). Cependant, aucune différence significative entre les deux groupes n'est mise en évidence concernant les épreuves de mémoire à court terme visuo-spatiale³, ce qui signifierait que les deux groupes sont équivalents à ce niveau, $t(23) = -.95, p = .34 (\eta^2 = .039)$.

Finalement, concernant les épreuves de développement mathématique, les sujets porteurs de trisomie 21 obtiennent des performances significativement inférieures à celles des sujets du groupe contrôle et ce, aussi bien pour l'épreuve « Donne-moi » ($t(21) = -3.89, p = .0009 ; \eta^2 = .43$) que pour l'épreuve de fluences de calculs verbaux oraux avec supports imagés⁴ ($t(14) = -3.17, p = .007 ; \eta^2 = .43$). Cependant, les deux groupes ne semblent pas se différencier pour l'épreuve de dénombrement rapide ($t(19) = -.62, p = .53 ; \eta^2 = .02$), ni pour l'épreuve de Litanie ($t(24) = -1.32, p = .19 (\eta^2 = .068)$).

² L'analyse statistique porte sur le score total (et non sur l'empan, présenté en Annexe N).

³ L'analyse statistique porte sur le score général de mémoire à court terme visuo-spatiale (reprenant les épreuves de mémoire à court terme visuo-spatiale Simultanée et Séquentielle, structurée et non structurée).

⁴ Ces résultats sont corroborés par une analyse statistique non-paramétrique (le test de Wilcoxon pour échantillons appariés) : $p = .002$.

Tableau 2

Moyenne, écart-type et range du total des réponses correctes pour les épreuves d'efficienne intellectuelle, de mémoire à court terme (MCT) et de développement mathématique (DM), par groupe

Epreuves	N	Groupe T21		Groupe contrôle	
		Moyenne et (écart-type)	Range	Moyenne et (écart-type)	Range
Efficienne intellectuelle					
:					
<i>Cubes</i>	29	18.6 (5.8)	8 - 30	18.5 (4.7)	8 - 26
<i>Id. de concepts</i>	29	9.5 (4.4)	2 - 20	10.1 (4.3)	1 - 19
<i>Similitudes</i>	21	9 (7.2)	0 - 25	12 (6.6)	0 - 27
<i>Vocabulaire</i>	24	10.4 (5.6)	4 - 28	14.1 (5.2)	4 - 27
MCT :					
<i>Empan de lettres</i>	23	2.3** (0.6)	1 - 4	4.5 (1.4)	2 - 7
<i>Catégorisation</i>	21	1.5** (1.1)	0 - 4	3.2 (2)	0 - 7
<i>Visuo-spatiale</i>	25	27.4 (13.9)	3 - 49	29.5 (15.5)	3 - 52
DM :					
« <i>Donne-moi</i> »	22	5.8** (4.4)	1 - 14	9.6 (4.8)	2 - 14
<i>Fluences calculs</i>	19	2.1** (1.3)	0 - 5	7.5 (5.8)	2 - 20
<i>Litanie</i>	24	12.1 (6.2)	4 - 20	14.1 (6.3)	2 - 20
<i>Dénombrement rapide</i>	23	4.5 (2.4)	1 - 8	5.2 (2.7)	0 - 8

Note. N = nombre d'effectifs. Id. de concepts = Identifications de concepts. **p < .01.

2. Épreuves de comparaison non-symbolique de la magnitude

A nouveau, l'entièreté des épreuves de comparaison non-symbolique de la magnitude n'a pas pu être administrée à tous les sujets du groupe expérimental et du groupe contrôle. Un sujet porteur de trisomie 21 a refusé d'effectuer l'épreuve de Séquence de points. Concernant le groupe contrôle, un sujet n'a pas réalisé l'épreuve de Comparaison de Durée, trois autres sujets n'ont pas effectué l'épreuve de Séquence de points et deux encore n'ont pas réalisé l'épreuve de Séquence de sons. Cela peut s'expliquer par le jeune âge de certains sujets, rendant leurs capacités attentionnelles limitées pour ce type d'épreuves d'assez longue durée. C'est pourquoi le nombre d'effectifs (cf. Tableau 3 et Tableau 4) n'est pas le même selon les différentes épreuves. Cependant, la procédure statistique employée (le test t de Student pour échantillons appariés) ne prend pas en compte les données manquantes dans la réalisation du calcul statistique.

Pour les épreuves de comparaison non-symbolique de la magnitude, la comparaison entre les groupes expérimental et contrôle est basée sur la fraction de Weber (w). Pour rappel, cette fraction permet de mesurer l'acuité de l'ANS dans la discrimination de quantités. Plus la fraction de Weber est faible et plus l'acuité numérique est bonne (Lafay, Saint-Pierre & Macoir, 2013 ; Sella, Lanfranchi & Zorzi, 2013 ; Halberda & Feigenson, 2008 ; Rousselle, Dembour & Noël, 2013). La fraction de Weber correspond à la différence entre les deux nombres du ratio, divisé par le plus petit des deux nombres (par exemple, pour le ratio 7:8, nous obtiendrons $(8-7)/7 = .14$) (Halberda & Feigenson, 2008). Cette fraction a été calculée pour chacune des cinq épreuves et permet d'évaluer la précision de la représentation de la magnitude de chaque participant (cf. Tableau 3). Nous aurions également pu baser notre comparaison sur le taux de réponses correctes pour chacune des épreuves mais cependant, la grande variabilité interindividuelle retrouvée entre les participants (étant donné que tous les participants n'ont pas réussi les mêmes ratios aux différentes épreuves) rend ce type de comparaison peu pertinente. Toutefois, le Tableau 4 reprend ces données afin d'avoir un aperçu du taux moyen de réponses correctes pour chacun des deux groupes.

Tout d'abord, une différence significative entre les deux groupes est mise en évidence pour trois des cinq épreuves de comparaison non-symbolique de la

magnitude : l'épreuve de Comparaison de Longueur ($t(29) = 2.5, p = .018 ; \eta^2 = .18$), l'épreuve de Collection d'éléments simultanés ($t(29) = 6.34, p = .000 ; \eta^2 = .58$) ainsi que l'épreuve de Séquence de sons ($t(27) = 2.38, p = .024 ; \eta^2 = .17$). Ces résultats signifient que pour ces trois épreuves, la fraction de Weber est significativement plus élevée chez les sujets porteurs de trisomie 21, ce qui témoignerait d'une moins bonne capacité de discrimination de quantités numériques en comparaison aux sujets du groupe contrôle. Cependant, aucune différence significative n'est mise en évidence entre les deux groupes pour les deux épreuves restantes, à savoir l'épreuve de Comparaison de Durée ($t(28) = 1.39, p = .17 ; \eta^2 = .066$) ainsi que l'épreuve de Séquence de points ($t(25) = .95, p = .34 ; \eta^2 = .036$). Ces résultats mettent donc en évidence, pour ces deux épreuves, une acuité numérique relativement équivalente entre les deux groupes, ce qui signifie que les sujets porteurs de trisomie 21 possèderaient de bonnes capacités de discrimination de quantités numériques, au même titre que les sujets issus du groupe contrôle.

En résumé, les différents résultats obtenus ne vont pas tous dans le même sens. En effet, pour trois des cinq épreuves de comparaison non-symbolique de la magnitude (Comparaison de Longueur, Collection d'éléments simultanés et Séquence de sons), il semblerait que les sujets porteurs de trisomie 21 possèdent de moins bonnes capacités de discrimination de quantités numériques en comparaison aux sujets du groupe contrôle tandis que pour les deux épreuves restantes (Comparaison de Durée et Séquence de points), il semblerait que l'acuité numérique soit relativement équivalente entre les deux groupes.

Tableau 3

Moyenne, écart-type et range des fractions de Weber (w) aux épreuves de comparaison non-symbolique de la magnitude, par groupe

Epreuves	N	Groupe T21		Groupe contrôle	
		Moyenne et (écart-type)	Range	Moyenne et (écart-type)	Range
Longueur	29	.47* (.31)	.11 – 1.15	.29 (.24)	.05 – 1.07
Durée	28	.86 (.35)	.23 – 1.3	.74 (.44)	.11 – 1.45
Collection	29	1.05** (.45)	.31 – 1.64	.54 (.31)	.18 – 1.42
Séquence de points	26	.91 (.41)	.26 – 1.57	.79 (.39)	.21 – 1.58
Séquence de sons	27	1.12* (.42)	.26 – 1.65	.88 (.46)	.2 – 1.86

Note. Collection = Collection d'éléments simultanés. *p < .05. **p < .01.

Tableau 4

Moyenne, écart-type et range du taux de réponses correctes (exprimé en pourcentages) pour les épreuves de comparaison non-symbolique de la magnitude, par groupe

Epreuves	N	Groupe T21		Groupe contrôle	
		Moyenne et (écart-type)	Range	Moyenne et (écart-type)	Range
Longueur	29	64.3* (14.4)	37.5 – 91.6	77 (14.3)	37.5 – 100
Durée	28	55.3 (10)	37.5 – 76.7	59.8 (15)	37.5 – 87.5
Collection	29	52.1** (11.5)	31.2 – 68.7	62.6 (7.1)	43.7 – 75
Séquence de points	26	55.1 (10.4)	31.2 – 71.4	58.9 (11.6)	31.2 – 87.5
Séquence de sons	27	49.9* (12.9)	31.2 – 78.5	57.5 (11.9)	31.2 – 76.7

Note. *p < .05. **p < .01.

3. Epreuve de Subitizing

Trois sujets du groupe expérimental et 4 sujets du groupe contrôle n'ont pas su réaliser l'épreuve de Subitizing. Cela peut s'expliquer par le jeune âge de certains participants pour qui les mots-nombres ne sont pas encore totalement acquis, rendant alors l'épreuve trop compliquée pour eux.

Comme énoncé ci-avant, une ANOVA à mesures répétées a été réalisée afin de pouvoir comparer les groupes expérimental et contrôle pour chacune des sept numérosités de l'épreuve de Subitizing. Le test de sphéricité de Mauchly a été réalisé au préalable afin de s'assurer de l'égalité des moyennes entre les différentes mesures. Ce test a mis en évidence une différence significative pour deux variables (les numérosités 1 et 7). Les corrections de Greenhouse et Geisser ainsi que de Huynh-Feldt ont donc été appliquées. Toutefois, les résultats obtenus avec et sans ces corrections sont similaires. C'est pourquoi nous ne présenterons dans cette section que les résultats de l'ANOVA à mesures répétées, sans tenir compte du test de sphéricité de Mauchly et de ses corrections, lesquelles seront présentés en annexe (cf. Annexe O). Par ailleurs, un test t de Student pour échantillons appariés a été réalisé afin de comparer les groupes expérimental et contrôle au niveau du rang de subitizing atteint. Ce rang correspond à la numérosité pour laquelle le sujet a obtenu un minimum de 66% de réponses correctes.

Tout d'abord, les résultats de l'analyse de variances (ANOVA) mettent en évidence un effet de groupe ($F(1,49) = 4.31, p = .043 ; \eta_p^2 = .08$), ce qui signifie que les sujets porteurs de trisomie 21 obtiennent des performances globalement inférieures à celles des sujets du groupe contrôle. De plus, un effet du subitizing est également mis en évidence ($F(6,29) = 39.43, p = .000 ; \eta_p^2 = .44$), ce qui suggère qu'une différence significative existe entre les sept numérosités de l'épreuve de Subitizing.

Ensuite, afin de pouvoir comparer les sept numérosités de l'épreuve de Subitizing selon les deux différents groupes, le test de Différence Significative Honnête de Tukey (HSD de Tukey) a été réalisé. Ce test est un test appelé « Post-Hoc » et permet de réaliser une comparaison multiple de moyennes lorsqu'un grand nombre de modalités sont présentes (dans ce cas-ci, sept modalités sont présentes pour la variable « subitizing », représentant les sept numérosités de l'épreuve de Subitizing). Les résultats obtenus mettent en évidence une différence significative entre les groupes

expérimental et contrôle pour les numérosités « 1 » ($p = .036$) et « 3 » ($p = .004$) de l'épreuve de Subitizing. Ces données signifient que le taux de réponses correctes serait, pour ces deux numérosités, significativement plus faible dans le groupe des sujets porteurs de trisomie 21 par rapport au groupe contrôle. Si l'on se réfère à la Figure 1, on observe effectivement qu'il n'y a aucun recouvrement entre les deux groupes pour les numérosités « 1 » et « 3 » (en ce qui concerne le taux de réponses correctes) tandis qu'un recouvrement existe, si l'on tient compte de l'intervalle de confiance fixé à 95%, pour l'ensemble des autres numérosités. Ce recouvrement semble d'autant plus important pour les numérosités « 5 » et « 6 » étant donné que les courbes se croisent.

En résumé, l'ensemble de ces données suggère que les sujets porteurs de trisomie 21 obtiennent des performances significativement inférieures à celles des sujets du groupe contrôle pour les quantités *subitizables* (jusqu'à 3) tandis que les performances entre les deux groupes semblent relativement équivalentes pour les quantités devant être estimées (à partir de 3).

Finalement, concernant le rang de subitizing, les résultats du test t de Student pour échantillons appariés mettent en évidence une différence significative entre les deux groupes, $t(23) = -3.77$, $p = .001$ ($\eta^2 = .39$). Ces données signifient que les sujets porteurs de trisomie 21 obtiennent un rang de subitizing significativement plus faible que les sujets du groupe contrôle. En d'autres termes, la numérosité pour laquelle les sujets obtiennent un minimum de 66% de réponses correctes est plus petite chez les sujets du groupe expérimental par rapport aux sujets du groupe contrôle. En effet, le rang de subitizing moyen pour le groupe expérimental est de 1.3 tandis qu'il est de 2.78 (soit presque de 3) pour le groupe contrôle.

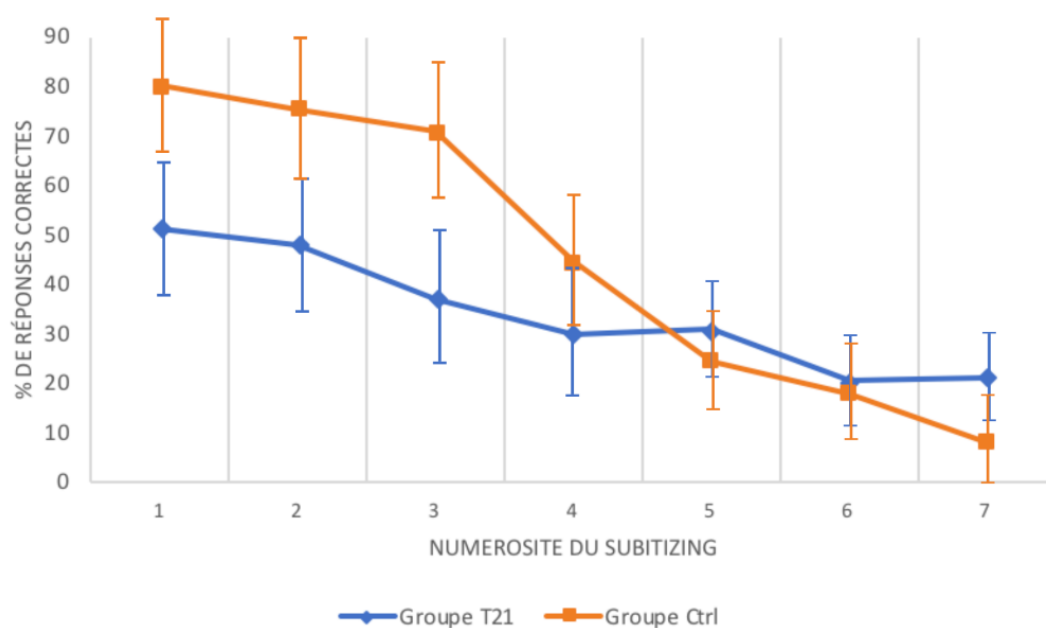
Tableau 5

Réponse moyenne, écart-type et range pour l'épreuve de Subitizing, par numérosité et par groupe

Numérosité du Subitizing	Groupe T21 (N = 26)		Groupe contrôle (N = 25)	
	Moyenne et (écart-type)	Range	Moyenne et (écart-type)	Range
1	4.4 (4.9)	1 – 26.1	1.7 (1.5)	0.8 – 7.6
2	4.6 (2.7)	1.6 - 14	2.5 (1.6)	1.3 – 9.8
3	5.9 (5.8)	2.3 – 33.5	3.5 (1.4)	2.6 – 9.8
4	5.6 (4.8)	2.5 – 28.1	4.4 (1.2)	2.8 – 9.1
5	6.2 (5.4)	3.5 – 32.6	5.3 (1.2)	3.1 – 8
6	6.3 (3.8)	2.1 – 21	5.5 (1.5)	3 – 8.8
7	6.9 (6.8)	3.1 – 39.3	5.9 (1.7)	1.3 – 8.6

Figure 1

Taux de réponses correctes pour chaque numérosité de l'épreuve de Subitizing, par groupe



Note. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance fixés à 95%.

VI. DISCUSSION

1. Hypothèses : littérature et résultats

1.1. Le subitizing

Concernant tout d'abord le subitizing, rappelons que les auteurs ayant évalué ce processus sont en faveur d'une altération de ce dernier. En effet, dans leur étude, Paterson, Brown, Gsödl, Johnson et Karmiloff-Smith (1999) ainsi que Paterson, Girelli, Butterworth et Karmiloff-Smith (2006) ont mis en évidence que les enfants porteurs de trisomie 21 ne parvenaient pas à faire la distinction entre les numérosités 2 et 3, ce qui renvoie à un déficit spécifique du subitizing. Ensuite, Sella, Lanfranchi et Zorzi (2013) ont également mis en évidence que les enfants porteurs de trisomie 21 présentent des performances de subitizing altérées. Plus encore, il semblerait que ces derniers se reposent sur l'ANS pour dénombrer de petites quantités normalement *subitizables*.

Les résultats que nous avons obtenu dans cette étude semblent être en accord avec ce que l'on peut retrouver dans la littérature, à savoir un processus de subitizing qui est altéré chez les personnes porteuses de trisomie 21. Effectivement, l'analyse de variance (ANOVA) réalisée a permis de mettre en évidence un effet de groupe, témoignant de performances inférieures pour le groupe des sujets porteurs de trisomie 21 en comparaison à celles des sujets du groupe contrôle. De plus, les résultats du test de Différence Significative Honnête de Tukey (HSD de Tukey) ont mis en évidence un taux de réponses correctes significativement plus faible pour les sujets porteurs de trisomie 21 en comparaison aux sujets contrôles et ce, spécifiquement pour les quantités *subitizables* (allant jusqu'à 3). En revanche, pour les quantités devant être estimées, les groupes expérimental et contrôle semblent obtenir des taux de réponses correctes similaires. De plus, nous pouvons observer, chez les sujets du groupe contrôle, que le taux de réponses correctes chute pour les numérosités supérieures à 3 (les numérosités devant être estimées). Cet effet est un effet qui est normalement attendu (moins de réponses correctes lorsque l'on dépasse les quantités *subitizables*) mais que l'on ne retrouve pas chez les sujets porteurs de trisomie 21. Comme l'ont suggéré Sella, Lanfranchi et Zorzi (2013), les sujets porteurs de trisomie 21 semblent donc se baser sur l'estimation et ce, même pour discriminer de petites quantités normalement *subitizables*. Le rang de subitizing moyen est d'ailleurs plus faible chez

les sujets du groupe expérimental en comparaison aux sujets du groupe contrôle, ce qui témoigne également de capacités de subitizing moindres.

En résumé, les résultats que l'on peut retrouver dans la littérature ainsi que les résultats obtenus dans cette étude vont dans le sens d'une altération du processus de subitizing chez les enfants, adolescents et jeunes adultes porteurs de trisomie 21. Cela signifierait qu'ils ne sont pas capables de discriminer de petites quantités (allant jusqu'à 3 ou 4) de manière précise et rapide (sans avoir recours au dénombrement).

Bien que peu d'études se soient intéressées à l'implication du subitizing dans l'acquisition des habiletés mathématiques, il semble néanmoins exister un lien entre ces habiletés mathématiques et le subitizing (Lembke & Foegen, 2009). L'altération du processus de subitizing pourrait donc expliquer, du moins en partie, les difficultés mathématiques présentées par les personnes porteuses de trisomie 21.

1.2. Le Système Numérique Approximatif (ANS)

Concernant à présent le Système Numérique Approximatif (ANS), la plupart des auteurs sont en faveur d'une préservation du système chez les personnes porteuses de trisomie 21 en comparaison à leur âge mental, mais non à leur âge chronologique. En d'autres termes, l'ANS semblerait préservé mais sévèrement retardé chez les personnes porteuses de trisomie 21. En effet, dans leur étude, Sella, Lanfranchi et Zorzi (2013) mettent en évidence un effet de rapport pour la discrimination de grandes quantités chez des enfants porteurs de trisomie 21, ce qui témoignerait de la préservation de l'ANS. Cependant, cette discrimination de grandes quantités est moins précise chez les enfants porteurs du syndrome en comparaison à des enfants tout-venant de même âge chronologique, mais pas de même âge mental ; ce qui signifierait que l'ANS est bien préservé mais qu'il est cependant retardé chez les enfants porteurs de trisomie 21. De plus, Lanfranchi, Berteletti, Torrisi, Vianello et Zorzi (2014) ont mis en évidence, en évaluant l'estimation numérique, que les enfants porteurs de trisomie 21 présentent des performances qui sont alignées à celles des enfants tout-venant de même âge mental mais pas à celles des enfants tout-venant de même âge chronologique. A nouveau, dans cette étude, l'ANS semblerait donc préservé mais retardé chez les enfants porteurs de trisomie 21. Enfin, Abreu-Mendoza et Arias-Trejo (2015) ont mis en évidence, en évaluant la capacité à comparer des superficies et des

numérosités, que les personnes porteuses de trisomie 21 obtiennent des performances semblables à celles des enfants tout-venant de même âge mental mais pas de même âge chronologique. Cette dernière étude est également en faveur d'une relative préservation de l'ANS en comparaison à l'âge mental des personnes porteuses de trisomie 21 mais non à leur âge chronologique.

Au vu des résultats retrouvés dans la littérature, nous nous attendions à observer des performances relativement équivalentes entre le groupe de sujets porteurs de trisomie 21 et le groupe de sujets tout-venant de même âge mental. Or, les tests t de Student pour échantillons appariés mettent en évidence des différences significatives entre les deux groupes pour trois des cinq épreuves évaluant la comparaison non-symbolique de la magnitude : Comparaison de Longueur, Collection d'éléments simultanés et Séquence de sons. Ces résultats signifieraient que pour ces trois épreuves, les sujets porteurs de trisomie 21 obtiennent des performances significativement plus faibles que les sujets tout-venant de même âge mental. Par conséquent, il semblerait que les groupes expérimental et contrôle n'obtiennent des performances similaires que pour deux des cinq épreuves de comparaison non-symbolique de la magnitude seulement (Comparaison de Durée et Séquence de points). Différentes hypothèses explicatives peuvent être avancées afin d'expliquer ces résultats quelque peu contradictoires.

1.2.1. Comparaison de Longueur et Comparaison de Durée

A première vue, il peut paraître étonnant qu'une différence significative soit observée entre les groupe expérimental et contrôle pour l'épreuve de Comparaison de Longueur et non pour celle de Comparaison de Durée. En effet, au vu du profil cognitif présenté par les personnes porteuses de trisomie 21 (capacités langagières plus faibles que les capacités visuo-spatiales ; mémoire à court terme verbale plus altérée que la mémoire à court terme visuo-spatiale), il aurait été moins surprenant d'observer une telle différence pour l'épreuve de Comparaison de Durée et non pour celle de Comparaison de Longueur. Il apparaîtrait donc qu'un déficit de discrimination de quantités continues (non numériques) en modalité visuelle (longueurs) soit mis en évidence chez les sujets porteurs de trisomie 21, ce qui n'est pas le cas pour la

discrimination de quantités continues en modalité auditive (durées). Tentons à présent de justifier ces résultats obtenus.

Tout d'abord, il est à noter que les enfants tout-venant acquièrent rapidement un grand degré d'expertise dans la discrimination de longueurs (quantités continues, en modalité visuelle). Par conséquent, il est possible que l'écart entre les performances des sujets porteurs de trisomie 21 et celles des sujets contrôles à l'épreuve de Comparaison de Longueur soit d'autant plus importante et aboutisse donc, via l'analyse statistique (test t de Student pour échantillons appariés), à une différence significative entre les deux groupes. Ce grand degré d'expertise de la part des enfants tout-venant n'est pas retrouvé pour la discrimination de durées (quantités continues, en modalité auditive), ce qui peut rendre compte du moins grand écart retrouvé entre les performances des sujets porteurs de trisomie 21 et celles des sujets contrôles pour l'épreuve de Comparaison de Durée. En effet, si l'on observe la fraction de Weber (w) moyenne dans le groupe des sujets contrôles, l'on remarque qu'elle est de .29 pour l'épreuve de Comparaison de Longueur tandis qu'elle est de .74 pour l'épreuve de Comparaison de Durée. Il semblerait donc que l'acuité numérique des enfants tout-venant soit nettement meilleure pour la modalité visuelle que pour la modalité auditive. Ce pattern est également retrouvé dans le groupe des sujets porteurs de trisomie 21 : la fraction de Weber moyenne est de .47 pour l'épreuve de Comparaison de Longueur tandis qu'elle est de .85 pour l'épreuve de Comparaison de Durée. Les sujets porteurs du syndrome présentent donc également une meilleure acuité numérique pour la modalité visuelle que pour la modalité auditive. Cependant, leur degré d'expertise pour la discrimination de longueurs étant moindre que celui des sujets contrôles, l'écart entre les deux groupes pour l'épreuve de Comparaison de Longueur (différence de .18 entre les w moyens des deux groupes) est plus important que pour l'épreuve de Comparaison de Durée (différence de .10 entre les w moyens des deux groupes). Ces données pourraient justifier le fait qu'une différence statistiquement significative entre les groupes expérimental et contrôle soit observée pour l'épreuve de Comparaison de Longueur, et non pour l'épreuve de Comparaison de Durée et ce, même si l'acuité numérique des enfants porteurs de trisomie 21 est meilleure pour la modalité visuelle que pour la modalité auditive.

Ensuite, nous avons calculé, pour l'épreuve de Comparaison de Durée, le rapport entre la fraction de Weber de chaque sujet porteur de trisomie 21 et celle de

son sujet contrôle apparié afin de voir si des différences importantes entre les deux groupes (expérimental et contrôle) étaient observées et ce, malgré une analyse statistique révélant des résultats non significatifs. De cette manière, nous avons pu voir si le déficit mis en évidence était spécifique à une seule modalité (visuelle ou auditive) ou non. Nous avons considéré comme « importants » les rapports étant supérieurs à 2 (signifiant que le sujet porteur de trisomie 21 obtient des performances au moins deux fois inférieures à celles de son sujet contrôle apparié). Sur 28 « paires » de sujets (un sujet porteur du syndrome et son sujet contrôle apparié) ayant passé l'épreuve de Comparaison de Durée, un rapport supérieur à 2 est retrouvé pour 5 sujets seulement, ce qui signifie que près de 18% des sujets porteurs de trisomie 21 obtiennent des performances au moins deux fois inférieures à celles de leur sujet contrôle apparié (contre 12 sur 29 pour l'épreuve de Comparaison de Longueur, soit environ 41%). D'une manière plus générale, le rapport « moyen » entre les fractions de Weber des deux groupes (expérimental et contrôle) est de 1.13 pour l'épreuve de Comparaison de Durée, ce qui signifie que les sujets du groupe contrôle obtiennent en moyenne des performances 1.13 fois supérieures à celles des sujets porteurs de trisomie 21. Ce rapport est cependant de 1.61 pour l'épreuve de Comparaison de Longueur. Par conséquent, au vu de ces données, nous ne pouvons pas aller à l'encontre des résultats statistiques obtenus (différence non significative pour l'épreuve de Comparaison de Durée) ; les difficultés de discrimination de quantités continues ne semblent effectivement pas se retrouver pour la modalité auditive.

En résumé, les résultats statistiques mettent en évidence des difficultés de discrimination de quantités continues en modalité visuelle mais pas en modalité auditive. Cependant, ces résultats sont à interpréter avec prudence étant donné le grand degré d'expertise des sujets contrôles dans la discrimination de quantités continues en modalité visuelle (longueurs). En effet, cet important degré d'expertise pourrait expliquer la différence significative observée entre les groupes expérimental et contrôle pour l'épreuve de Comparaison de Longueur. Par ailleurs, nous avons vu, grâce aux fractions de Weber moyennes, que l'acuité numérique des sujets porteurs de trisomie 21 est tout de même meilleure pour la modalité visuelle que pour la modalité auditive. Par conséquent, conclure à un déficit de discrimination de quantités continues en modalité visuelle chez les sujets porteurs de trisomie 21 semble réducteur.

1.2.2. Collection d'éléments simultanés

L'analyse statistique réalisée (le test t de Student pour échantillons appariés) a permis de mettre en évidence une différence significative entre les performances des sujets porteurs de trisomie 21 et celles des sujets tout-venant, ce qui signifie que les sujets porteurs du syndrome présenteraient un déficit de discrimination de quantités discrètes (numériques) en modalité visuelle. A nouveau, nous ne nous attendions pas à observer une telle différence entre les groupes expérimental et contrôle et diverses hypothèses peuvent être avancées pour tenter de rendre compte de ces résultats.

Tout d'abord, comme c'est le cas pour l'épreuve de Comparaison de Longueur, il est à noter que les enfants tout-venant acquièrent rapidement un grand degré d'expertise dans la discrimination de quantités discrètes en modalité visuelle. Par conséquent, il est possible que l'écart entre les performances des sujets porteurs de trisomie 21 et celles des sujets contrôles à l'épreuve de Collection d'éléments simultanés soit d'autant plus importante et aboutisse donc à une différence statistiquement significative entre les deux groupes. Toutefois, au niveau des valeurs moyennes des fractions de Weber (w), la différence entre les deux groupes est tout de même de .50, ce qui n'est pas négligeable. De plus, le rapport « moyen » entre les fractions de Weber des deux groupes (expérimental et contrôle) est de 1.92 pour l'épreuve de Collection d'éléments simultanés, ce qui signifie que les sujets du groupe contrôle obtiennent en moyenne des performances presque deux fois supérieures à celles des sujets porteurs de trisomie 21. Les performances des sujets tout-venant sont donc presque doubles par rapport à celles des sujets porteurs du syndrome, ce qui est assez conséquent. D'ailleurs, sur 29 « paires » de sujets ayant passé l'épreuve de Collection d'éléments simultanés, un rapport supérieur à 2 est retrouvé chez 14 sujets. Il semblerait donc que l'expertise des sujets tout-venant ne suffise pas à justifier la différence significative observée entre les groupe expérimental et contrôle. Dès lors, des difficultés de discrimination de quantités discrètes en modalité visuelle sembleraient effectivement être présentes chez les sujets porteurs de trisomie 21.

Ensuite, il faut relever l'importante charge visuelle qui est présente dans l'épreuve de Collection d'éléments simultanés, pouvant provoquer une surcharge visuelle compliquant l'épreuve. En effet, les stimuli sont présentés de manière simultanée dans cette épreuve et sont parfois nombreux en fonction des ratios qui sont présentés. Par ailleurs, le fait que la présentation des stimuli se fasse de manière

simultanée réduit l'implication de la mémoire à court terme, ce qui devrait rendre l'épreuve moins difficile. Cependant, malgré une implication moindre de la mémoire à court terme, les résultats statistiques mettent en évidence une différence significative entre les performances des sujets porteurs de trisomie 21 et celles des sujets contrôles, suggérant donc des difficultés effectivement présentes dans la discrimination de quantités discrètes en modalité visuelle chez les sujets porteurs du syndrome.

En résumé, bien que certaines données (l'important degré d'expertise des sujets tout-venant) puissent en partie expliquer l'importante différence observée entre les performances des sujets porteurs de trisomie 21 et celles des sujets tout-venant, elles ne semblent pas être suffisantes pour justifier cette différence. Il semblerait donc que des difficultés de discrimination de quantités discrètes en modalité visuelle soient présentes chez les personnes porteuses de trisomie 21.

1.2.3. Séquence de points et Séquence de sons

Contrairement aux épreuves de Comparaison de Longueur et de Durée, les résultats statistiques obtenus pour les épreuves de Séquence de points et de Séquence de sons semblent plus cohérents en regard du profil cognitif des personnes porteuses de trisomie 21 (capacités langagières plus faibles que les capacités visuo-spatiales ; mémoire à court terme verbale plus altérée que la mémoire à court terme visuo-spatiale). En effet, pour ces deux épreuves, une différence statistiquement significative a été mise en évidence pour l'épreuve de Séquence de sons mais pas pour celle de Séquence de points. Ces données signifient que les sujets porteurs de trisomie 21 semblent présenter un déficit de discrimination de quantités discrètes en modalité auditive mais non en modalité visuelle. Cependant, ces derniers résultats semblent en contradiction avec les difficultés de discrimination de quantités discrètes en modalité visuelle mises en évidence pour l'épreuve de Collection d'éléments simultanés. Plusieurs hypothèses pourraient permettre d'expliquer ces divers résultats.

Tout d'abord, tout comme pour les épreuves de Comparaison de Longueur et de Durée, nous avons calculé, pour l'épreuve de Séquence de points, le rapport entre la fraction de Weber de chaque sujet porteur de trisomie 21 et celle de son sujet contrôle apparié afin de voir si des différences importantes entre les deux groupes (expérimental et contrôle) étaient observées et ce, malgré une analyse statistique révélant des résultats

non significatifs. De cette manière, nous avons pu voir si le déficit mis en évidence était spécifique à une seule modalité (visuelle ou auditive) ou non. Nous avons considéré comme « importants » les rapports étant supérieurs à 2 (signifiant que le sujet porteur de trisomie 21 obtient des performances au moins deux fois inférieures à celles de son sujet contrôle apparié). Sur 25 « paires » de sujets (un sujet porteur du syndrome et son sujet contrôle apparié) ayant passé l'épreuve de Séquence de points, un rapport supérieur à 2 est retrouvé pour 4 sujets seulement, ce qui signifie que 16% des sujets porteurs de trisomie 21 obtiennent des performances au moins deux fois inférieures à celles de leur sujet contrôle apparié (contre 8 sur 27 pour l'épreuve de Séquence de sons, soit près de 30%). D'une manière plus générale, le rapport « moyen » entre les fractions de Weber des deux groupes (expérimental et contrôle) est de 1.13 pour l'épreuve de Séquence de points, ce qui signifie que les sujets du groupe contrôle obtiennent en moyenne des performances 1.13 fois supérieures à celles des sujets porteurs de trisomie 21. Ce rapport est cependant de 1.28 pour l'épreuve de Séquence de sons. Par conséquent, au vu de ces données, nous ne pouvons pas aller à l'encontre des résultats statistiques obtenus (différence non significative pour l'épreuve de Séquence de points) ; le déficit ne semble effectivement pas se retrouver pour la modalité visuelle. Il semble cependant bien présent pour la modalité auditive.

Ensuite, la question de la mémoire à court terme pourrait nous permettre d'expliquer à la fois les résultats statistiques obtenus pour les épreuves de Séquence de points et de Séquence de sons, et à la fois les résultats contradictoires obtenus entre les épreuves de Séquence de points et de Collection d'éléments simultanés. Rappelons tout d'abord que le profil cognitif des personnes porteuses de trisomie 21 est caractérisé par une atteinte de la mémoire à court terme. Cependant, tous les aspects de cette dernière ne semblent pas être touchés de façon équivalente : la mémoire à court terme visuo-spatiale serait mieux préservée que la mémoire à court terme verbale. C'est donc le versant auditif de la mémoire à court terme qui serait le plus perturbé (Comblain & Thibaut, 2009, Rondal & Comblain, 2001). Au vu de ces informations, nous pourrions suggérer l'hypothèse selon laquelle les sujets porteurs de trisomie 21 obtiennent de meilleures performances pour l'épreuve de Séquence de points parce qu'ils peuvent se reposer sur leurs forces en mémoire à court terme visuo-spatiale, ce qu'ils ne peuvent pas faire pour l'épreuve de Séquence de sons (étant

donné que c'est le versant auditif de leur mémoire à court terme qui est le plus touché), amenant alors à des performances plus faibles pour cette dernière épreuve.

Par ailleurs, cette relative force en mémoire à court terme visuo-spatiale peut permettre d'expliquer l'obtention de résultats statistiques à priori contradictoires entre l'épreuve de Collection d'éléments simultanés et celle de Séquence de points. En effet, des difficultés de discrimination de quantités discrètes en modalité visuelle semblent se retrouver pour l'épreuve de Collection d'éléments simultanés mais pas pour l'épreuve de Séquence de points. Commençons tout d'abord par rappeler que dans l'épreuve de Collection d'éléments simultanés, la mémoire à court terme n'était pas (ou très peu) impliquée étant donné que la présentation des stimuli se fait de manière simultanée. En revanche, comme nous venons de le voir, l'implication de la mémoire à court terme est plus importante dans l'épreuve de Séquence de points étant donné que la présentation des stimuli se fait de manière séquentielle. Étant donné que les difficultés de discrimination de quantités discrètes en modalité visuelle ne se retrouvent que pour l'épreuve de Collection d'éléments simultanés pour laquelle l'implication de la mémoire à court terme visuo-spatiale est réduite, il est possible que pour l'épreuve de Séquence de points, les sujets porteurs de trisomie 21 s'appuient sur leur mémoire à court terme visuo-spatiale (qui représente une force dans leur profil cognitif) afin de pallier à de potentielles difficultés de discrimination de quantités discrètes en modalité visuelle. Par conséquent, il semblerait que de telles difficultés soient effectivement présentes chez les sujets porteurs du syndrome mais qu'elles soient compensées par leurs relativement bonnes capacités de mémoire à court terme visuo-spatiale.

En résumé, les diverses hypothèses explicatives avancées vont dans le sens de difficultés de discrimination de quantités discrètes et ce, à la fois en modalité auditive et en modalité visuelle. C'est la mémoire à court terme visuo-spatiale qui semblerait, dans le cas de l'épreuve de Séquence de points, aider les sujets porteurs de trisomie à obtenir des performances suffisantes.

1.2.4. Conclusion

En conclusion, concernant le Système Numérique Approximatif (ANS), il semblerait que des difficultés soient mises en évidence, contrairement à ce que l'on peut retrouver dans la littérature. En effet, il semblerait exister, chez les sujets porteurs

de trisomie 21, des difficultés de discrimination de quantités discrètes et ce, aussi bien en modalité visuelle qu'en modalité auditive (témoignant donc d'un déficit plus généralisé de l'ANS et non d'un déficit spécifique à une modalité). Cependant, la discrimination de quantités continues (que ce soit en modalité visuelle ou auditive) semble relativement préservée en comparaison à l'âge mental des sujets porteurs de trisomie 21. Il semblerait donc que le déficit de discrimination porte spécifiquement sur les quantités discrètes (ou numériques). Plusieurs aspects de l'ANS semblent donc être déficitaires et ce, même en comparaison à l'âge mental des sujets porteurs de trisomie 21. Rappelons également que les résultats statistiques obtenus pour l'épreuve de Subitizing ont mis en évidence un fonctionnement adéquat de l'estimation qui semblerait donc relativement préservée. Par conséquent, tous les aspects de l'ANS ne semblent pas être touchés de manière équivalente : la discrimination de quantités discrètes serait altérée tandis que la discrimination de quantités continues ainsi que l'estimation seraient relativement préservées (en comparaison à l'âge mental des sujets porteurs de trisomie 21). Par ailleurs, nous avons également pu constater que les difficultés se marquent plus pour les épreuves ne faisant pas appel à la mémoire à court terme ou faisant intervenir la mémoire à court terme verbale uniquement. L'implication de la mémoire à court terme visuo-spatiale semble donc être une ressource sur laquelle peuvent s'appuyer les personnes porteuses du syndrome afin de pallier à leurs difficultés.

Il est également à noter que l'objectif de cette étude n'étant pas d'évaluer le lien entre les capacités langagières et les capacités numériques de base (plus particulièrement, le subitizing et l'ANS), nous ne pouvons pas nous avancer quant à l'hypothèse proposée par Camos (2009). Rappelons que selon cet auteur, ce seraient les difficultés langagières présentées par les personnes porteuses de trisomie 21 qui se répercuteraient sur les capacités numériques de base et seraient alors la source de leurs difficultés mathématiques. Cependant, cette hypothèse était et reste incertaine. Une investigation ultérieure plus profonde du lien entre les capacités langagières et les capacités numériques de base se révèle donc être nécessaire afin de pouvoir répondre à cette hypothèse.

1.3. Efficience intellectuelle et mémoire à court terme : modalités visuelle et auditive

Dans la littérature, rappelons qu'il est largement admis que le domaine verbal représente une faiblesse importante dans le profil cognitif des personnes porteuses de trisomie 21 tandis que le domaine visuo-spatial semble, quant à lui, relativement préservé en comparaison à l'âge mental mais non à l'âge chronologique de ces individus (Abbeduto et al., 2001 ; Grieco, Pulsifer, Seligsohn, Skotko & Schwartz, 2015). Dans cette présente étude, nous nous attendions donc à observer, pour les épreuves d'efficience intellectuelle (les subtests « Similitudes », « Vocabulaire », « Cubes » et « Identification de concepts » de l'Echelle d'Intelligence de Wechsler) et de mémoire à court terme (Empan de lettres, Catégospan, mémoire à court terme visuo-spatiale simultanée et séquentielle), de meilleures performances pour les épreuves faisant intervenir le domaine visuo-spatial que pour celles faisant intervenir le domaine verbal. C'est effectivement ce que l'on a globalement pu observer grâce aux analyses statistiques réalisées (tests t de Student pour échantillons appariés). En effet, des différences significatives entre les performances des sujets porteurs de trisomie 21 et celles des sujets du groupe contrôle sont observées pour les épreuves de mémoire à court terme verbale : l'épreuve d'Empan de lettres ainsi que l'épreuve du Catégospan. Ces données signifient que pour ces épreuves, les performances des sujets porteurs de trisomie 21 sont déficitaires et ce, même en comparaison à leur âge mental. Pour les subtests « Vocabulaire » et « Similitudes » de l'Echelle d'Intelligence de Wechsler (faisant appel au domaine verbal), aucune différence significative n'est mise en évidence. A première vue, les performances des deux groupes (expérimental et contrôle) semblent équivalentes. Cependant, il est à noter que pour le subtest « Vocabulaire », les résultats statistiques obtenus sont marginalement significatifs ($p = .058$), ce qui témoignerait tout de même de performances inférieures chez les sujets porteurs de trisomie 21 par rapport à celles des sujets du groupe contrôle. Finalement, il n'y a que pour le subtest « Similitudes » qu'aucune différence significative n'est mise en évidence. Cela peut s'expliquer par le fait que ce subtest fait plutôt appel aux capacités de raisonnement verbal, qui semblent dès lors mieux préservée que les connaissances lexicales que l'on peut retrouver dans le subtest « Vocabulaire ».

Ensuite, l'on peut observer que pour chacune des épreuves faisant intervenir le domaine visuo-spatial (subtests « Cubes » et « Identification de concepts », mémoire

à court terme visuo-spatiale simultanée et séquentielle), il n'y a pas de différence statistiquement significative observée entre les performances des sujets porteurs de trisomie 21 et celles des sujets contrôles. Ces données signifient que lorsque les épreuves impliquent le domaine visuo-spatial, les performances des deux groupes (expérimental et contrôle) semblent relativement équivalentes.

En conclusion, tout comme le suggèrent les auteurs que l'on peut retrouver dans la littérature, le domaine verbal semble altéré tandis que le domaine visuo-spatial semble préservé en comparaison à l'âge mental des personnes porteuses de trisomie 21.

1.4. Le niveau de développement mathématique

Dans la littérature, il est largement admis que les personnes porteuses de trisomie 21 présentent d'importantes difficultés dans le domaine mathématique. D'après plusieurs auteurs, ces individus présentent des difficultés dans l'apprentissage mathématique (Camos, 2009) ainsi qu'un déficit sévère au niveau numérique (habiletés arithmétiques, comptage, connaissances mathématiques) (Nye, Fluck & Buckley, 2001). De ce fait, nous nous attendions à ce que le niveau de développement mathématique des sujets porteurs de trisomie 21 soit plus faible que celui des sujets du groupe contrôle. Suite aux analyses statistiques réalisées (tests t de Student pour échantillons appariés), c'est effectivement ce qui a pu être en partie observé.

Tout d'abord, pour les épreuves de Dénombrement rapide et de Litanie, aucune différence significative n'est observée entre les performances des sujets porteurs de trisomie 21 et celles des sujets contrôles. Il semblerait donc que les sujets porteurs du syndrome aient acquis les compétences mathématiques de base telles que le comptage et la connaissance de numéros verbaux oraux, au même titre que les sujets tout-venant. Cependant, une différence statistiquement significative est observée pour les épreuves de Fluences de calculs verbaux oraux avec support imagé ainsi que pour l'épreuve « Donne-moi », ce qui signifie qu'à de plus hauts niveaux d'exigence en compétences mathématiques, les performances des sujets porteurs de trisomie 21 sont inférieures à celles des sujets du groupe contrôle. Pour l'épreuve de Fluences de calculs verbaux oraux avec support imagé, nous pouvons constater qu'aucun sujet porteur de trisomie 21 ne parvient à obtenir plus de cinq réponses correctes sur dix alors que la plupart des

sujets du groupe contrôle obtiennent plus de cinq réponses correctes (sur 10) à cette épreuve. Les sujets porteurs du syndrome sembleraient éprouver des difficultés à réaliser des opérations arithmétiques simples (additions). De même, nous pouvons observer que pour l'épreuve « Donne-moi », les sujets du groupe expérimental (T21) ne donnent en moyenne qu'environ 5 objets à l'expérimentateur tandis que les sujets du groupe contrôle en donnent environ 9.

En résumé, il semblerait effectivement que le niveau de développement mathématique des sujets porteurs de trisomie 21 soit retardé et ce, même en comparaison à leur âge mental. Néanmoins, certaines habiletés mathématiques de bases telles que la procédure de comptage et la connaissance des numéros verbaux oraux semblent acquises.

2. Perspectives cliniques

Au vu des résultats qui ont été mis en évidence dans cette étude, diverses pistes thérapeutiques peuvent être envisagées afin d'exploiter au mieux les capacités résiduelles des personnes porteuses de trisomie 21 et de tenter de pallier à certaines de leurs difficultés au niveau de leurs habiletés mathématiques.

Tout d'abord, comme nous l'avons vu précédemment, l'estimation et la discrimination de quantités continues (faisant partie du Système Numérique Approximatif, ANS) sembleraient relativement préservées en comparaison à l'âge mental des personnes porteuses de trisomie 21. De plus, ces personnes sembleraient se reposer, pour certaines épreuves, sur leur mémoire à court terme visuo-spatiale qui représente une force dans leur profil cognitif et par conséquent, une ressource à exploiter.

Au vu de ces données, il semble dans un premier temps pertinent d'orienter l'apprentissage mathématique (et une éventuelle prise en charge) vers l'estimation et la discrimination de quantités continues (non numériques) de manière à s'appuyer sur les capacités résiduelles du Système Numérique Approximatif (ANS) pour pallier à certaines difficultés mathématiques. Ensuite, il paraît indispensable d'utiliser des supports visuels (tels que des pictogrammes) sur lesquels les enfants et adolescents peuvent se reposer. Par conséquent, il serait intéressant que toute consigne ou toute information nouvelle soit accompagnée d'un support visuel de manière à ce que l'enfant puisse assimiler plus facilement les informations et ainsi mieux les comprendre.

Par exemple, nous n'allons pas demander à l'enfant de réaliser une activité mathématique (comptage, addition, soustraction, etc.) oralement, nous allons lui fournir un support visuel pour accompagner l'exercice. De plus, ce support visuel contiendra des informations non numériques telles que des illustrations (animaux, objets, formes, bandes numériques, etc.) afin de faciliter la compréhension et la réalisation de l'exercice pour les enfants et adolescents porteurs de trisomie 21. Afin de généraliser l'apprentissage, il peut également être intéressant d'utiliser un support visuel contenant des informations relatives à la vie quotidienne (par exemple, combien d'assiettes à mettre à table, combien de tomates à mettre dans le panier, etc.).

Par ailleurs, l'acuité de l'estimation et de la discrimination de quantités continues s'améliorant avec l'avancée en âge, il paraît judicieux de baser le travail mathématique sur ces aspects afin que les enfants et adolescents porteurs du syndrome soient capables de réaliser des épreuves faisant normalement intervenir les capacités de subitizing ou encore de discrimination de quantités discrètes (numériques). Avec un entraînement certain, par exemple, ils pourraient être capables d'estimer de manière correcte des quantités normalement *subitizables* (allant jusqu'à 3 ou 4 éléments). Certes, leurs performances seraient plus lentes que ce qui est normalement attendu pour leur âge mental mais pourraient néanmoins être de plus en plus précises à force d'exercer ce processus d'estimation. Par exemple, que ce soit en classe ou à la maison, il est possible d'entraîner les collections en se basant sur l'estimation avec des notions telles que « beaucoup, peu, plus, moins, la moitié, la même chose » (Bauer-Lasserre & Rodi, 2015).

Plus concrètement, il existe différents outils permettant de soutenir l'apprentissage mathématique chez les enfants porteurs de trisomie 21. C'est le cas notamment du matériel « Numicon » qui correspond à une approche multisensorielle permettant initialement d'enseigner les mathématiques aux enfants tout-venant d'âge préscolaire ou scolaire. Le matériel « Numicon » consiste en de petites plaquettes et des petits pions (cf. Annexe P), permettant ainsi de concrétiser le système numérique en représentations à la fois visuelles (l'enfant peut visualiser les nombres et les relations entre les nombres) et tactiles (l'enfant peut manipuler le matériel). Cet outil permet alors à l'enfant de visualiser l'entière des nombres et donc de développer sa représentation mentale des nombres, qui va à son tour soutenir le calcul mental. « Numicon » permet donc une réelle manipulation visuelle, tactile et mentale de la numération. Cet outil permet de se représenter clairement l'ordre stable du système des nombres (le nombre suivant est « un de plus » que le précédent) ainsi que la manière dont différents nombres sont reliés entre eux ($4 = 2+2$ ou encore $3+1$) (Nye, Buckley & Bird, 2005). En tenant compte du fait que le domaine visuo-spatial est relativement préservé chez les personnes porteuses de trisomie 21 et représente une force dans leur profil cognitif, un outil tel que « Numicon » peut s'avérer être une aide pertinente dans l'apprentissage des compétences mathématiques. Nye, Buckley et Bird (2005) ont réalisé une étude évaluant l'efficacité de cet outil chez une population d'enfants porteurs de trisomie 21. Les résultats ont mis en évidence que les enfants

bénéficiant de « Numicon » dans leur apprentissage mathématique pendant un an faisaient en moyenne des progrès de près de 6 mois (5.83 mois) sur une échelle de compétences numériques tandis que les enfants porteurs du syndrome ne bénéficiant pas de « Numicon » faisaient des progrès moindres (5mois). Cependant, ces auteurs précisent qu'il est généralement nécessaire d'adapter les consignes aux enfants porteurs de trisomie 21 afin de les rendre plus simples (utiliser des phrases courtes, employer un vocabulaire simple, ne donner qu'une consigne à la fois, etc.). Par ailleurs, « Numicon » est un outil pouvant également être utilisé à la maison, ce qui permet de stimuler l'enfant dans son apprentissage mathématique. « Numicon » se révèle donc être un outil intéressant à exploiter dans l'enseignement mais également au domicile de l'enfant trisomique.

Finalement, d'une manière plus générale, il est important d'augmenter la présence des nombres dans l'environnement de l'enfant (école, domicile), tout en conservant une stabilité dans la disposition des collections (par exemple, utiliser des configurations identiques à celles des dés à jouer) afin que l'enfant puisse se familiariser plus facilement avec les nombres. Il peut également être intéressant de profiter de situations concrètes de la vie quotidienne afin de toujours exercer ces compétences mathématiques et de pouvoir les généraliser à des situations concrètes (par exemple, composer un numéro de téléphone, mettre la table, etc.) (Bauer-Lasserre & Rodi, 2015).

3. Limites de l'étude

Plusieurs limites peuvent être relevées dans cette étude. Nous allons les aborder dans cette section.

Tout d'abord, il est très important de noter que les conditions de passation dans lesquelles ont été administrées les épreuves n'étaient pas toujours optimales. En effet, essentiellement pour les participants vus à leur domicile, nombreuses pouvaient être les distractions (télévision, frères/sœurs étant parfois dans la même pièce, téléphone qui sonne, papa/maman qui revient à la maison, etc.). De plus, nous avons essayé de réaliser les séances de testing avec les participants aux moments où ils étaient le plus alertes et le plus concentrés (généralement le matin) mais cependant, cela n'a pas toujours été possible. De ce fait, certains participants ont été vus en fin de journée après l'école, en fin de semaine ou encore après leur sport, et étaient donc parfois fatigués et peu concentrés sur les épreuves administrées. D'autres encore ne se sentaient parfois pas bien au moment des séances de testing (maux de tête, maux de ventre, rhume, etc.). Il est donc probable que dans ces conditions, certaines épreuves administrées ne reflètent pas les compétences réelles des participants évalués. Il est évidemment très difficile de réunir les conditions de passation optimales pour chaque séance avec chacun des participants mais il faut néanmoins pouvoir tenir compte de certaines conditions rendant la passation des épreuves plus délicate et par conséquent, aboutissant à des résultats peut-être moins représentatifs des compétences des participants.

Ensuite, au niveau des épreuves administrées pour évaluer l'efficience intellectuelle, rappelons que l'EVIP n'a été administré qu'à 14 sujets porteurs de trisomie 21 et à aucun sujet du groupe contrôle (étant donné que cette épreuve a été rajoutée au protocole de l'étude cette année). De ce fait, cette épreuve n'a pas pu être exploitée étant donné qu'aucune comparaison entre les sujets du groupe expérimental (T21) et ceux du groupe contrôle n'était possible. Néanmoins, l'EVIP pourrait apporter des résultats intéressants, essentiellement pour approfondir l'analyse du domaine verbal dans cette étude. Effectivement, rappelons que les résultats statistiques obtenus pour les subtests « Vocabulaire » et « Similitudes » de l'Echelle d'Intelligence de Wechsler (permettant d'évaluer le domaine verbal) étaient difficilement exploitables et interprétables (l'un ne montrant aucune différence statistiquement significative,

l'autre montrant une différence marginalement significative). De plus, ces deux subtests (« Vocabulaire » et « Similitudes ») font intervenir le langage expressif tandis que l'EVIP fait, quant à lui, intervenir le langage réceptif. En tenant compte du fait que 65% des personnes porteuses de trisomie 21 présentent des déficits plus importants en langage expressif qu'en langage réceptif (Miller, 1999, cité par Comblain & Thibaut, 2009), les résultats de l'EVIP pourraient s'avérer très intéressants, notamment pour cibler une potentielle différence de performances entre les épreuves faisant intervenir le langage expressif et celle faisant intervenir le langage réceptif (en l'occurrence, l'EVIP). Pour ce faire, il serait pertinent d'évaluer de nouveaux sujets contrôles de même âge mental que les sujets porteurs de trisomie 21 ayant réalisé l'EVIP afin de leur administrer l'entièreté des épreuves, y compris l'EVIP. De cette manière, une comparaison entre les groupes expérimental et contrôle au niveau du langage réceptif serait possible. Nous aurions pu réaliser une analyse statistique permettant de comparer, pour les sujets porteurs de trisomie 21, les performances entre les épreuves évaluant le langage expressif et l'EVIP (évaluant le langage réceptif) mais néanmoins, ce n'est pas la question prioritaire dans cette étude. Effectivement, nous tentons de réaliser des comparaisons entre le groupe de sujets porteurs de trisomie 21 et le groupe de sujets tout-venant, et non au sein d'un même groupe.

De plus, contrairement à la plupart des études que l'on peut retrouver dans la littérature, nous n'avons pas, dans cette présente étude, comparé le groupe de sujets porteurs de trisomie 21 à un groupe de sujets contrôles de même âge chronologique. En effet, il aurait été difficilement réalisable d'évaluer des enfants, adolescents et adultes de même âge chronologique que les sujets porteurs de trisomie 21 constituant le groupe expérimental. Nous avons donc choisi d'évaluer des enfants de même âge mental que les sujets porteurs du syndrome afin de constituer le groupe contrôle. En effet, au vu des déficits importants retrouvés dans le profil des personnes porteuses de trisomie 21, il semblait plus pertinent de comparer ces personnes à des sujets de même âge mental plutôt qu'à des sujets de même âge chronologique. Nous savons que pour la plupart des domaines que l'on peut évaluer, les personnes trisomiques obtiendront des résultats nettement inférieurs à ceux des personnes issues de la population tout-venant étant donné qu'elles présentent un retard mental. Il était donc plus intéressant de baser la comparaison sur l'âge mental des participants afin de voir si, à âge mental équivalent, les sujets porteurs de trisomie 21 obtenaient des résultats similaires ou non

aux sujets tout-venant. Néanmoins, il aurait pu être intéressant de constituer un groupe contrôle composé de sujets de même âge chronologique que les sujets trisomiques afin de voir quelles performances sont normalement attendue à un âge chronologique donné.

Finalement, nous avons ciblé notre étude sur l'analyse de deux des trois processus de quantification, à savoir, le subitizing et le Système Numérique Approximatif (ANS). Nous n'avions pas formulé d'objectif et d'hypothèse à propos du dernier processus, celui de dénombrement. Nous nous sommes peu intéressés à ce dernier processus dans cette présente étude mais néanmoins, étant donné qu'aucun consensus n'est actuellement retrouvé dans la littérature concernant la capacité de dénombrement chez les personnes porteuses de trisomie 21, il pourrait être intéressant d'investiguer plus en profondeur ce processus dans une prochaine étude afin de mieux cibler l'origine des difficultés mathématiques présentées par les personnes porteuses de trisomie 21.

VII. CONCLUSION

Dans la littérature, il apparaît clairement que des difficultés mathématiques sont caractéristiques du profil des personnes porteuses de trisomie 21. Toutefois, très peu d'études se sont intéressées à la question des capacités numériques de base chez ces individus ; capacités qui se révèlent être essentielles pour l'apprentissage mathématique et pouvant donc expliquer l'origine de ces difficultés mathématiques. De ces quelques études ont découlé différentes hypothèses afin de rendre compte de ces difficultés présentées par les personnes porteuses de trisomie 21 mais cependant, aucun consensus n'est actuellement retrouvé dans la littérature et l'origine de ces difficultés mathématiques demeure incertaine. L'étude que nous avons réalisée avait donc pour objectif premier d'investiguer plus en profondeur les capacités numériques de base chez les personnes porteuses de trisomie 21 afin d'approcher au mieux l'origine de leurs difficultés mathématiques. Certains des résultats que nous avons obtenus rejoignent ceux que l'on peut retrouver dans la littérature mais d'autres semblent cependant inconsistants avec cette dernière et permettent donc d'apporter des choses nouvelles par rapport à ce qui avait déjà été proposé par les auteurs.

Les résultats de cette présente étude ont donc mis en évidence une altération du processus de subitizing ainsi que de la discrimination de quantités discrètes (numériques) en modalités visuelle et auditive. Ces déficits pourraient alors être à l'origine des difficultés mathématiques que présentent les personnes porteuses de trisomie 21. Cependant, d'autres aspects des capacités numériques de base semblent relativement préservés (du moins, en comparaison à l'âge mental des personnes porteuses du syndrome) et il serait judicieux de les exploiter dans l'apprentissage mathématique des enfants et adolescents trisomiques. C'est le cas notamment de l'estimation et de la discrimination de quantités continues (non numériques) en modalités visuelle et auditive. De plus, il est indispensable de tenir compte du profil cognitif plus général des personnes porteuses de trisomie 21 afin de se baser sur leurs forces (telles que leurs compétences relativement préservées dans le domaine visuo-spatial) pour leur apprentissage (mathématique ou autre).

Finalement, il serait intéressant (et même indispensable) de reproduire cette étude avec d'autres participants porteurs de trisomie 21 afin de toujours élargir notre échantillon et de vérifier nos diverses hypothèses par la reproduction ou non des résultats obtenus

dans cette étude. La compréhension de l'origine des difficultés mathématiques présentées par les personnes porteuses de trisomie 21 serait bénéfique pour pouvoir leur apporter un apprentissage qui soit des plus adéquats possible en tenant compte de leurs forces, et de leurs faiblesses.

VIII. BIBLIOGRAPHIE

- Abbeduto, L., Pavetto, M., Kesin, E., Weissman, M.-D., Karadottir, S., O'Brien, A., & Cawthon, S. (2001). The linguistic and cognitive profile of Down syndrome: Evidence from a comparison with fragile X syndrome. *Down Syndrome Research and Practice*, 7(1), 9-15. doi: 10.3104/reports.109
- Abreu-Mendoza, R.A., & Arias-Trejo, N. (2015). Numerical and area comparison abilities in Down syndrome. *Research in Developmental Disabilities*, 41-42, 58-65.
- Antell, S., & Keating, D. P. (1983). Perception of numerical invariance in neonates. *Child Development*, 54, 695-701.
- Aylward, E. H., Habbak, R., Warren, A. C., Pulsifer, M. B., Barta, P. E., Jerram, M., & Pearlson, G. D. (1997). Cerebellar volume in adults with Down syndrome. *Archives of Neurology*, 54(2), 209-212.
- Barouillet, P., & Camos, V. (2006). *La cognition mathématique chez l'enfant* (pp. 71-85). Marseille, France : Solal - De Boeck.
- Barouillet, P., Billard, C., De Agostini, M., Démonet, J-F., Fayol, M., Combet, J-E.,... Sprenger-Charolles, L. (2007). *Dyslexie, dysorthographe, dyscalculie : bilan des données scientifiques*. Paris, France : Les éditions INSERM.
- Bauer-Lasserre, C., & Rodi, A. (2015). Dossier-Ressource : « Trisomie », Cycle 1 (1H/2H). Retrieved from <http://www.hepl.ch/cms/accueil/formation/unites-enseignement-et-recherche/pedagogie-specialisee/dispositif-ressources/espace-trisomie-21.html>
- Bellugi, U., Lichtenberger, L., Mills, D., Galaburda, A., & Korenberg, J. R. (1999). Bridging cognition, the brain and molecular genetics: evidence from Williams syndrome. *Trends in neurosciences*, 22(5), 197-207.
- Booth, J. L., & Siegler, R. S. (2008). Numerical magnitude representations influence arithmetic learning. *Child development*, 79(4), 1016-1031.
- Broadley, I., MacDonald, J., & Buckley, S. (1995). Working memory in children with Down's syndrome. *Down's Syndrome: Research and Practice*, 3, 3-8.

- Camos, V. (2009). Numerosity Discrimination in Children With Down Syndrome. *Developmental Neuropsychology*, 34 (4), 435-447. doi: 10.1080/87565640902964557
- Caycho, L., Gunn, P., & Siegal, M. (1991). Counting by children with Down syndrome. *American Journal on Mental Retardation*, 95, 575–583.
- Comblain, A., & Thibaut, J. P. (2009). Approche neuropsychologique du syndrome de Down. *Traité de neuropsychologie de l'enfant*, 491-524.
- Cuilleret, M. (2017). *Trisomie et handicaps génétiques associés : Prise en charge, potentialités, compétences, devenir*. Issy-Les-Moulineaux, France: Elsevier.
- De Smedt, B., Verschaffel, L., & Ghesquière, P. (2009). The predictive value of numerical magnitude comparison for individual differences in mathematics achievement. *Journal of experimental child psychology*, 103(4), 469–79. doi : [10.1016/j.jecp.2009.01.010](https://doi.org/10.1016/j.jecp.2009.01.010)
- Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44(1), 1-42.
- Dehaene, S., & Cohen, L. (1997). Cerebral pathway for calculation: Double dissociation between rote verbal and quantitative knowledge of arithmetic. *Cortex*, 33(2), 219-250.
- Dehaene, S., Spelke, E., Pinel, P., Stanescu, R., & Tsivkin, S. (1999). Sources of mathematical thinking: Behavioral and brain-imaging evidence. *Science*, 284, 970–974.
- Dunn, P. M. (1991). Dr Langdon Down (1828-1896) and 'mongolism'. *Archives of disease in childhood*, 66(7 Spec No), 827.
- Durand, M., Hulme, C., Larkin, R., & Snowling, M. (2005). The cognitive foundations of reading and arithmetic skills in 7- to 10-year-olds. *Journal of experimental child psychology*, 91(2), 113–36. doi: 10.1016/j.jecp.2005.01.003
- Fayol, M. (1990). *L'enfant et le nombre : du comptage à la résolution de problèmes*. Paris, France: Delachaux et Niestlé.
- Fayol, M. (2012). In *Que sais-je? L'acquisition du nombre* (pp. 40-72). Paris, France : Presses Universitaires de France.

- Feigenson, L., Dehaene, S., & Spelke, E. (2004). Core systems of number. *TRENDS in Cognitive Sciences*, 8(7). doi:10.1016/j.tics.2004.05.002
- Fernandes, D. M., & Church, R. M. (1982). Discrimination of the number of sequential events by rats. *Animal Learning & Behavior*, 10(2), 171-176.
- Galli, S. (2016). *L'exploration des capacités numériques de base de personnes porteuses de Trisomie 21* (Mémoire de master en sciences psychologiques non publié). Université de Liège, Liège, Belgique.
- Gilmore, C.K., McCarthy, S.E., & Spelke, E.S. (2010). Non-symbolic arithmetic abilities and mathematics achievement in the first year of formal schooling. *Cognition*, 115(3), 394–406.
- Grieco, J., Pulsifer, M., Seligsohn, K., Skotko, B., & Schwartz, A. (2015). Down syndrome: Cognitive and behavioral functioning across the lifespan. *American Journal of Medical Genetics*, 169(2), 135-149. doi: 10.1002/ajmg.c.31439
- 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.
- Huntley-Fenner, G. (2001). Children's understanding of number is similar to adults' and rats': numerical estimation by 5–7-year-olds. *Cognition*, 78(3), B27-B40.
- Inglis, M., Attridge, N., Batchelor, S., & Gilmore, C.K. (2011). Non-verbal number acuity correlates with symbolic mathematics achievement: but only in children. *Psychonomic bulletin & review*, 18(6), 1222–9.
- Jarrold, C., & Baddeley, A. D. (2001). Short-term memory in Down syndrome: Applying the working memory model. *Down Syndrome Research and Practice*, 7(1), 17-28. doi:10.3104/reviews.110
- Lafay, A., Saint-Pierre, M-C., & Macoir, J. (2013). Développement des systèmes numériques non symboliques et prédicteurs de réussite mathématique. *Glossa*, 112, 1-17.
- Lanfranchi, S., Berteletti, I., Torrisi, E., Vianello, R., & Zorzi, Marco. (2014). Numerical estimation in individuals with Down syndrome. *Research in Developmental Disabilities*, 36, 222-229. doi: 10.1016/j.ridd.2014.10.010

- Lembke, E., & Foegen, A. (2009). Identifying early numeracy indicators for kindergarten and first-grade students. *Learning Disabilities Research & Practice*, 24(1), 12–20. doi: 10.1111/j.1540-5826.2008.01273.x
- Lépine, R., & Camos, V. (2004). Le développement de la quantification et ses contraintes. In E. Gentaz & P. Dessus, *Comprendre les apprentissages : sciences cognitives et éducation*. Paris, France : Dunod.
- Libertus, M., Feigenson, L., & Halberda, J. (2013). Is approximate number precision a stable predictor of math ability? *Learning and Individual Differences*, 25, 126–133.
- Lipton, J. S., & Spelke, E. S. (2003). Origins of number sense large-number discrimination in human infants. *Psychological Science*, 14(5), 396–401.
- Lipton, J. S., & Spelke, E. S. (2003). Origins of number sense large-number discrimination in human infants. *Psychological Science*, 14(5), 396–401.
- Lipton, J. S., & Spelke, E. S. (2005). Preschool children's mapping of number words to nonsymbolic numerosities. *Child development*, 76(5), 978–988.
- Määttä, T., Tervo-Määttä, T., Taanila, A., Kaski, M., & Iivanainen, M. (2006). Mental health, behaviour and intellectual abilities of people with Down syndrome. *Down syndrome research and practice*, 11(1), 37–43.
- Mandler, G., & Shebo, B. J. (1982). Subitizing: an analysis of its component processes. *Journal of Experimental Psychology: General*, 111(1), 1.
- Mazzocco, M.M.M., Feigenson, L., & Halberda, J. (2011). Preschoolers' precision of the approximate number system predicts later school mathematics performance. *PLoS ONE*, 6(9), e23749.
- Mazzocco, M.M.M., & Thompson, R.E. (2005). Kindergarten predictors of math learning disability. *Learning disabilities research & practice: a publication of the Division for Learning Disabilities, Council for Exceptional Children*, 20(3), 142–155.
- Meyer, S. (2015). *L'estimation numérique dans les apprentissages mathématiques : rôles et intérêts de la mise en correspondance des représentations numériques au niveau développemental, éducatif et rééducatif* (Doctoral dissertation, Université Charles de Gaulle-Lille III).

- Mesureur, P. (2015). *Comparaison d'un apprentissage moteur et classique dans l'acquisition du dénombrement : principes de l'ordre stable, d'abstraction et de la cardinalité* (Mémoire de master en kinésithérapie non publié). Université de Liège, Liège, Belgique.
- Mundy, E., & Gilmore, C.K. (2009). Children's mapping between symbolic and nonsymbolic representations of number. *Journal of experimental child psychology*, 103(4), 490–502. doi: 10.1016/j.jecp.2009.02.003
- Nye, J., Fluck, M., & Buckley, S. (2001). Counting and cardinal understanding in children with Down syndrome and typically developing children. *Down Syndrome Research and Practice*, 7(2), 68-78.
- Nye, J., Buckley, S., & Bird, G. (2005). Evaluating the Numicon system as a tool for teaching number skills to children with Down syndrome. *Down Syndrome News and Update*, 5(1), 2-13. doi:10.3104/updates.352
- Paterson, S. (2001). Language and number in Down syndrome: The complex developmental trajectory from infancy to adulthood. *Down Syndrome Research and Practice*, 7(2), 79-86.
- Paterson, S. J., Brown, J. H., Gsödl, M. K., Johnson, M. H., & Karmiloff-Smith, A. (1999). Cognitive modularity and genetic disorders. *Science*, 286, 2355–2358.
- Paterson, S. J., Girelli, L., Butterworth, B., & Karmiloff-Smith, A. (2006). Are numerical impairments syndrome specific? Evidence from Williams syndrome and Down's syndrome. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 47, 190–204.
- Porter, J. (1999). Learning to count: a difficult task? *Down syndrome research and practice*, 6(2), 85-94.
- Rao, S-M., Mayer, A-R., & Harrington, D-L. (2001). The evolution of brain activation during temporal processing. *Nature Neuroscience*, 4, 317–323.
- Rondal, J-A., & Comblain, A. (2001). *Manuel de psychologie des handicaps : Sémiologie et principes de remédiation*. Sprimont, Belgique: Editions Mardaga.
- Rondal, J-A. (2010). *La Trisomie 21 : Perspective historique sur son diagnostic et sa compréhension*. Wavre, Belgique: Editions Mardaga.

- Rousselle, L., Dembour, G., & Noël, M. P. (2013). Magnitude representations in Williams syndrome: differential acuity in time, space and number processing. *PLoS one*, 8(8), e72621.
- Sella, F., Lanfranchi, S., & Zorzi, M. (2013). Enumeration skills in Down syndrome. *Research in developmental disabilities*, 34(11), 3798-3806.
- Shepperdson, B. (1994). Attainments in reading and number of teenagers and adults with Down syndrome. *Down Syndrome Research and Practice*, 2(3), 97-101.
- 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, 475-487.
- Tager-Flusberg, H. (1999). *Neurodevelopmental Disorders*. Cambridge, USA: The MIT Press.
- Trick, L. M., & Pylyshyn, Z. W. (1993). What enumeration studies can show us about spatial attention: evidence for limited capacity preattentive processing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19(2), 331.
- Trick, L. M., & Pylyshyn, Z. W. (1994). Why are small and large numbers enumerated differently? A limited-capacity preattentive stage in vision. *Psychological review*, 101(1), 80.
- Vicari, S. (2005). Profils mnésiques distincts chez des enfants atteints du syndrome de Down ou du Syndrome de Williams. *Enfance*, 57(3), 241-252.
- Walsh, V. (2003). A theory of magnitude: common cortical metrics of time, space and quantity. *Trends in cognitive sciences*, 7(11), 483-488.
- Wood, J. N., & Spelke, E. S. (2005). Infants' enumeration of actions: Numerical discrimination and its signature limits. *Developmental Science*, 8(2), 173-181.
- Xu, F. (2002). Numerosity discrimination in infants: Evidence for two systems of representations. *Cognition*, 89, B15-B25.
- Xu, F., & Spelke, E-S. (2000). Large number discrimination in 6-month-old infants. *Cognition*, 74, B1-B1

RÉSUMÉ

Dans la littérature, il est largement admis que les personnes porteuses de trisomie 21 présentent d'importantes difficultés dans l'apprentissage mathématique. Plus particulièrement, ces personnes ne semblent pas atteindre le niveau attendu concernant les capacités numériques de base, lesquelles sont indispensables pour l'apprentissage arithmétique ultérieur et pourraient donc être à l'origine des difficultés mathématiques présentées par les personnes porteuses du syndrome. Cependant, peu d'études ont investigué ces capacités numériques de base chez ces individus et par conséquent, l'origine de leurs difficultés mathématiques demeure incertaine.

L'objectif principal de cette étude est donc d'investiguer plus en profondeur les capacités numériques de base (en ciblant plus spécifiquement le subitizing et le Système Numérique Approximatif) afin de mieux comprendre et de mieux cibler l'origine des difficultés mathématiques présentées par les personnes porteuses de trisomie 21. Pour ce faire, des épreuves de subitizing et de comparaison non-symbolique de la magnitude ont été administrées à deux groupes de participants : un groupe expérimental constitué de 29 sujets porteurs du syndrome et un groupe contrôle constitué de 29 sujets tout-venant de même âge mental que les sujets composant le groupe expérimental.

Au vu des résultats que l'on peut retrouver dans la littérature (un processus de subitizing altéré et un Système Numérique Approximatif préservé mais retardé), nous nous attendions à observer une altération du processus de subitizing mais une relative préservation du Système Numérique Approximatif (ANS) en comparaison à l'âge mental des sujets porteurs de trisomie 21. Les résultats que nous avons obtenus dans cette étude mettent effectivement en évidence un déficit du processus de subitizing chez les sujets porteurs de trisomie 21 et ce, même en comparaison à leur âge mental mais cependant, les résultats mettent également en évidence une altération de certains aspects de l'ANS. Effectivement, l'estimation et la discrimination de quantités continues (non numériques) semblent être relativement préservées (en comparaison à l'âge mental des sujets porteurs du syndrome) mais cependant, un déficit de discrimination de quantités discrètes (numériques) semble être mis en évidence. Les déficits mis en évidence au niveau des capacités numériques de base pourraient donc rendre compte des difficultés mathématiques présentées par les personnes porteuses de trisomie 21.