

Université d'Aix-Marseille

École Doctorale 356 : Cognition, Langage, Éducation

UFR : Psychologie et sciences de l'éducation

Unité de Recherche : Centre PsyCLÉ (EA 3273)

Étude de l'écriture chez l'enfant et l'adulte porteurs de trisomie 21 : analyse de la trace écrite et de sa dynamique

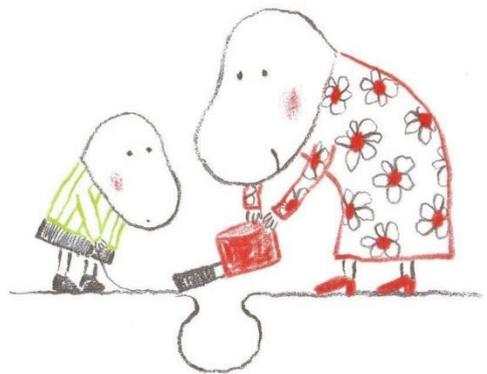
Eloïse MOY

Thèse présentée pour obtenir le grade de docteur en psychologie

Soutenue le 19/09/2016 devant le jury :

Carole TARDIF	Professeur, HDR, Aix-Marseille Université	Directrice
Raphaele TSAO	Maître de conférences, Aix-Marseille Université	Co-directrice
Yannick COURBOIS	Professeur, HDR, Université Lille 3	Rapporteur
Fabienne LEMETAYER	Professeur, HDR, Université de Lorraine	Rapporteur
Jean-Michel ALBARET	Maître de conférences, HDR, Université Toulouse III	Examineur

À L.M.



Issu de La petite casserole d'Anatole (Carrier, 2009)

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes deux directrices de thèse qui m'ont accompagnée dans cette aventure malgré mon parcours atypique. Raphaele Tsao pour m'avoir toujours motivée avec enthousiasme et d'avoir partagé son plaisir de la recherche. Carole Tardif pour avoir encadré ce travail avec écoute et bienveillance.

Je remercie les membres du jury de thèse, Yannick Courbois, Fabienne Lemétayer et Jean-Michel Albaret pour avoir accepté d'évaluer ce travail de recherche et pour leur expertise.

Je remercie également Jean-Luc Velay pour son soutien depuis le début de ce projet. Son regard a permis de perfectionner ce travail de recherche.

J'adresse mes remerciements à l'ensemble des personnes qui ont aidé ou participé à cette étude. Je tiens à remercier la fédération Trisomie 21 et tout particulièrement le SESSAD à Toulon (Catherine A., merci pour ton accueil et ta prévenance), les SESSAD et SAMSAH à Nice ainsi que le SAVA 84 en Avignon qui m'ont ouvert leurs portes avant même mon entrée en doctorat. Je remercie également l'école maternelle St Georges aux Pennes Mirabeau et tout particulièrement Carine P., sa directrice. Je remercie chaleureusement tous les participants et les familles m'ayant accueillie.

Je remercie l'école doctorale 356 « Cognition, Langage, Education » pour m'avoir accordé une bourse doctorale permettant ainsi le financement de mes trois premières années de doctorat. Je remercie également l'équipe pédagogique du département de Psychologie Développementale & Différentielle de l'UFR d'ALLSH à l'Université d'Aix-Marseille de m'avoir donné l'opportunité d'y réaliser mon service d'enseignement (Marianne J. et Céline S., un grand merci pour votre confiance).

Je tiens à remercier l'ensemble des personnes rencontrées à la Maison de la Recherche qui m'ont aidée et soutenue. Merci à Nicolas C. et Thomas A. pour m'avoir guidée dans mes doutes sur la méthodologie, les statistiques et la rédaction. Merci à l'ensemble de la salle des doctorants qui m'ont épaulée entre rires et larmes. Un grand merci à Sarah L.V.-N. pour son aide à ma régulation émotionnelle et à Anaïs G. avec qui je prédis de jolies collaborations futures ! Merci également à Joanna L. pour ton soutien et l'inspiration que tu m'as transmise. Et enfin, merci à mes deux collègues du CIPE, Livia S.N. et Francesco B., qui ont raffraichi ma vision du doctorat.

Mon cœur va ensuite à l'ensemble de mes amis qui ont su être compréhensifs face à ma désocialisation graduelle pour pouvoir venir à bout de ce projet. Un grand merci tout particulièrement à Marlène P. pour m'avoir accompagnée dès le début et à Marion V. jusqu'à la fin de ce projet, à Charlène M., Mylène Q.-C. et Charlotte Y. qui, malgré leurs emplois du temps débordants, ont su me donner confiance et motivation. Merci à toute l'équipe de capoeira du SESCO et en particulier à Rachel P.C. et Nicolas B. pour l'intérêt et la curiosité portés à ce travail. Je remercie également ma famille pour leur soutien dans mes projets passés et futurs. Et enfin, merci à mon Baba qui m'a protégée mais également bousculée pour que je donne le meilleur de moi-même.

Un grand merci à tous pour avoir participé à ce premier grand projet en espérant tous vous retrouver parmi de nombreux autres à venir...

Résumé

Malgré les avancées technologiques, l'écriture manuscrite continue d'être une habileté hautement sollicitée dans le cadre scolaire et constitue en partie les bases d'une intégration et d'une participation à une vie communautaire réussie. A ce jour, l'étude de l'écriture manuscrite chez des personnes porteuses de trisomie 21 (T21) reste un domaine peu abordé par la communauté scientifique. L'objectif de cette recherche est d'étudier les habiletés d'écriture chez des enfants et adultes T21 comparativement à la population typique de même âge de développement et âge chronologique en analysant la qualité des tracés et l'exécution des mouvements. Dans l'étude 1, une tâche de copie de texte du test BHK (Charles, Soppelsa & Albaret, 2003) met en évidence une similarité des capacités d'écriture entre le groupe T21 et le groupe d'enfants typiques de même âge de développement en termes de qualité et de vitesse d'écriture. Différents facteurs individuels influençant l'écriture sont également étudiés. Les résultats soulignent l'impact majeur de la coordination de la motricité fine et du contrôle visuo-moteur sur le niveau d'écriture dans la population T21. Dans l'étude 2, l'écriture de lettres isolées sur une tablette graphique informe sur la dynamique du tracé grâce à des indices spatiaux, temporels, cinématiques et de force graphique. Les caractéristiques du geste graphomoteur dans le groupe T21 sont semblables à celles d'enfants typiques de même âge de développement témoignant d'un contrôle en cours d'exécution (Zesiger, 2003). Dans l'étude 3, la présentation de lettres selon différentes modalités induit une amélioration de la fluidité et de la trajectoire d'écriture lors d'une présentation visuelle du tracé et d'instructions verbales. L'ensemble des résultats va dans le sens de l'hypothèse d'un retard de développement (Zigler et al., 1969 ; 1982 ; 1998) ne mettant pas en évidence de déficit spécifique dans la population T21. Enfin, nos résultats suggèrent de s'intéresser à l'impact de rééducations ciblées sur la coordination motrice fine et l'intégration visuo-motrice et d'un entraînement visuel et verbal pour tenter d'améliorer la qualité et la vitesse des tracés ainsi que l'exécution des mouvements d'écriture chez les personnes T21.

Mots-clés : trisomie 21, écriture manuscrite, test BHK, tablette graphique, modalités de présentation.

Abstract

Despite technological advances, handwriting continues to be a highly solicited skill in the school setting and constitutes, in part, the basis of successful integration and participation in community life. To this day, the study of handwriting in people with Down syndrome (DS) remains a field of study that is not well addressed by the scientific community. The objective of the current research is therefore to study writing skills in children and adults with DS compared to mental-age-matched and chronological-age-matched typically developing population by analyzing the quality of tracing and the movement execution. In study 1, a task of copying text from the BHK test (Charles, Soppelsa & Albaret, 2003) reveals similar handwriting capacities between the DS group and the group of typical children of the same developmental age in terms of quality and speed of writing. Different individual factors influencing writing are also investigated. The results highlight the major impact of fine motor skill and visuo-motor control on writing level in the DS population. In study 2, writing single cursive letters on a graphics tablet gives information about the dynamics of tracing by means of spatial, temporal, kinematic, and graphic force indices. The characteristics of graphomotor movement in the DS group are similar to those of mental-age-matched typical children demonstrating a retroactive mode of motor control (Zesiger, 2003). In study 3, letters presentation in different modalities shows evidence of improvement of letter writing in fluidity and trajectory through visualization of tracing and verbal instructions. Overall, the results are consistent with the hypothesis of a developmental delay (Zigler et al., 1969; 1982; 1998) and do not underline in the DS population. Our results encourage further investigation into the impact of tasks that lend themselves to fine motor skill and visuo-motor control and also training on the trajectory of writing with the aid of visual and verbal cues in order to attempt to improvement of quality and speed of writing as well as movement execution involved in writing in persons with DS.

Keywords: Down syndrome, handwriting, test BHK, graphics tablet, presentation modalities.

Table des matières

Introduction	1
Chapitre 1 - La trisomie 21	4
1. Un syndrome génétique à l'origine de déficience intellectuelle	4
1.1. La découverte scientifique de la trisomie 21	4
1.2. L'épidémiologie de la trisomie 21	7
1.3. Les critères de la déficience intellectuelle	9
1.4. Approche développementale de la déficience intellectuelle	15
2. Le phénotype comportemental de la trisomie 21	19
2.1. Le développement physique et moteur	20
2.2. Le développement cognitif	28
2.3. Le langage oral	31
3. L'inclusion et les apprentissages scolaires	33
3.1. Le niveau scolaire dans la trisomie 21	33
3.2. La lecture et la production écrite	35
Chapitre 2 - L'écriture manuscrite	38
1. L'intérêt d'étudier l'écriture	38
1.1. Une activité quotidienne dans le cadre scolaire	38
1.2. L'écriture parmi les apprentissages scolaires	40
1.3. Les différents types d'évaluation de l'écriture	42
2. L'écriture, un acte moteur	46
2.1. Le contrôle moteur	46
2.2. L'apprentissage de l'écriture	49
2.3. Les modèles de l'écriture	53
3. Les facteurs influençant l'écriture	60
3.1. Les facteurs individuels	60
3.2. Les facteurs contextuels	66
4. Troubles de l'écriture	74
4.1. L'écriture chez les enfants avec troubles neuro-développementaux	77
4.2. Les conduites graphomotrices dans la trisomie 21	78
Chapitre 3 - Présentation générale de la recherche	84
1. Problématique	84
2. Objectifs généraux et hypothèses	87
3. Population de la recherche	88
3.1. Caractéristiques du groupe T21	88

3.2. Caractéristiques du groupe AD et du groupe AC	91
3.3. Procédure de consentement	93
4. Design expérimental	93
Chapitre 4 - Etudes expérimentales	95
Etude 1 : évaluation du niveau d'écriture et de ses facteurs prédictifs	95
1. Objectifs et hypothèses	95
2. Méthode	96
2.1. Population	96
2.2. Dispositif expérimental	96
2.3. Recueil et traitement des données	101
2.4. Analyses statistiques	102
3. Résultats	103
3.1. Evaluation de la qualité et de la vitesse d'écriture	103
3.2. Les facteurs prédictifs du niveau d'écriture	107
4. Synthèse des résultats de l'étude 1	111
Etude 2 : analyse de la dynamique du tracé de lettres	115
1. Objectifs et hypothèses	115
2. Méthode	117
2.1. Population	117
2.2. Dispositif expérimental	117
2.3. Recueil et traitement des données	119
2.4. Analyses statistiques	122
3. Résultats	124
3.1. Spatialité du tracé de lettres	124
3.2. Temporalité du tracé de lettres et des levers	126
3.3. Cinématique du tracé de lettres	129
3.4. Force graphique dans le tracé de lettres	132
4. Synthèse des résultats de l'étude 2	134
Etude 3 : impact des modalités de présentation des lettres sur la dynamique du tracé	138
1. Objectifs et hypothèses	138
2. Méthode	139
2.1. Population	139
2.2. Dispositif expérimental	140
2.3. Recueil et traitement des données	142
2.4. Analyses statistiques	144
3. Résultats	146
3.1. Impact des modalités de présentation dans le groupe T21	146
3.1.1. Trajectoire selon les modalités dans le groupe T21	146
3.1.2. Spatialité du tracé selon les modalités dans le groupe T21	148

3.1.3. Temporalité du tracé selon les modalités dans le groupe T21 _____	150
3.1.4. Cinématique du tracé selon les modalités dans le groupe T21 _____	151
3.1.5. Force graphique selon les modalités dans le groupe T21 _____	152
3.1.6. Récapitulatif des résultats dans le groupe T21 _____	153
3.2. Comparaison de l'impact des modalités de présentation dans les trois groupes _____	155
3.2.1. Trajectoire selon les modalités dans les trois groupes _____	155
3.2.2. Spatialité du tracé selon les modalités dans les trois groupes _____	157
3.2.3. Temporalité du tracé selon les modalités dans les trois groupes _____	160
3.2.4. Cinématique selon les modalités dans les trois groupes _____	163
3.2.5. Force graphique selon les modalités dans les trois groupes _____	167
3.2.6. Récapitulatif des résultats dans les trois groupes _____	168
4. Synthèse des résultats de l'étude 3 _____	170
Chapitre 5 - Discussion, limites et perspectives _____	174
1. Evaluation du niveau d'écriture et de ses facteurs prédictifs _____	174
1.1. Habiletés d'écriture chez les personnes T21 _____	174
1.2. Les facteurs prédictifs de la qualité et de la vitesse d'écriture _____	178
2. Analyse de la dynamique du tracé de lettres _____	182
3. Impact des modalités de présentation sur la dynamique du tracé de lettres _____	185
4. Limites des études et perspectives de recherche _____	189
Bibliographie _____	192
Annexe A - Questionnaire d'intérêt porté à l'écriture et son autoévaluation dans le groupe T21 _	215
Annexe B - Lettre d'information et formulaire de consentement _____	217
Annexe C - Résultats d'analyses complémentaires de l'étude 1 _____	222
Annexe D - Résultats d'analyses complémentaires de l'étude 2 _____	226
Annexe E - Résultats d'analyses complémentaires de l'étude 3 _____	231
Table des figures _____	234
Table des tableaux _____	237

Introduction

La trisomie 21 est le premier syndrome génétique à l'origine de déficience intellectuelle avec une fréquence de 50 pour 100 000 naissances (Les cahiers d'Orphanet, 2013). Il est lié à une malformation d'origine génétique reposant sur la présence d'un chromosome surnuméraire au niveau de la paire n°21 du caryotype de l'individu. . Au sein de la communauté scientifique, ce syndrome suscite un grand intérêt dans des domaines variés tels que l'identification des gènes impliqués, la connaissance du phénotype ou l'évaluation des prises en charge sociale et de rééducation. L'étude du phénotype de la trisomie 21 a permis d'établir un profil comportemental mettant en évidence un retard global au cours du développement (Chapman & Hesketh, 2000 ; Palisano et al., 2001). Plus précisément, dans le domaine cognitif, le traitement verbal est altéré comparativement au traitement visuo-spatial qui est relativement préservé (Chapman, Seung, Schwartz & Bird, 1998 ; Vicari, 2006). Les travaux réalisées dans le domaine de la motricité révèlent une lenteur des mouvements ainsi qu'une difficulté accrue lorsque les mouvements requièrent une précision (Palisano et al., 2001; Simon, Elliott & Anson, 2003 ; Wuang, Wang, Huang & Su, 2008). Depuis la loi de 2005 en France (n°2005-102) pour l'égalité des droits et des chances, la participation et la citoyenneté des personnes handicapées, de plus en plus d'élèves en situation de handicap sont scolarisés en milieu ordinaire. A la rentrée 2014-2015, 105 579 enfants présentant des troubles intellectuels et cognitifs ont suivi une scolarité dans le premier et le second degré (DEPP, 2015). L'inclusion de plus en plus importante de ces publics d'élèves invite à s'intéresser à l'étude des fonctions cognitives et motrices mobilisées au niveau des apprentissages scolaires.

Malgré l'essor des nouvelles technologies, l'écriture manuscrite demeure hautement sollicitée dans le cursus scolaire (Handwriting Without Tears®, 2014). L'écriture est définie comme une activité complexe et contrainte par une pluralité de processus (Bara & Gentaz, 2010 ; Vinter & Zesiger, 2007). Ecrire suppose une coordination entre des mécanismes cognitifs et linguistiques, alloués à la production de textes (sémantique, syntaxe et orthographe), et des traitements perceptivo-moteurs, dédiés à la programmation et l'exécution des mouvements (graphomotricité). Notre travail de recherche s'intéresse à

l'étude de l'écriture, en tant qu'habileté graphomotrice, chez une population d'enfants et d'adultes porteurs de trisomie 21 (T21). L'écriture manuscrite est une capacité nécessitant de nombreuses années d'apprentissage, au cours desquelles elle va être influencée par divers facteurs propres à l'individu, tels que l'âge, le genre ou les compétences dans le traitement perceptivo-moteur (Kaiser, Carrasco, Soppelsa & Albaret, 2013) ainsi que par divers facteurs liés au contexte d'apprentissage et d'enseignement. Par ailleurs, l'écriture manuscrite est reconnue comme pouvant interférer sur des processus de haut niveau tels que les traitements orthographiques impliqués dans la production écrite (Berninger, 2009). La maîtrise de l'acte graphique constitue donc un enjeu majeur pour l'apprenant et conditionne pour une grande part sa réussite scolaire. Or, dans le champ de la déficience intellectuelle telle que la trisomie 21, l'écriture manuscrite est peu étudiée. A titre indicatif, un relevé de références bibliographiques¹ fait état de 6884 publications concernant la trisomie 21, et seulement quatre d'entre elles sont directement consacrées à l'étude de l'écriture manuscrite.

Afin d'étudier l'écriture chez les personnes T21, nous commencerons par poser les fondements théoriques de deux domaines investigués dans cette thèse : la trisomie 21 et l'écriture manuscrite. Pour ce faire, le chapitre 1 sera centré sur la population d'intérêt. Nous évoquerons alors l'évaluation de la déficience intellectuelle et les différents courants théoriques émanant de la problématique du retard ou de la différence. La question est de savoir si les difficultés observées sont liées à un simple retard de développement ou à des déficits spécifiques. Compte tenu de la pluralité des facteurs impliqués dans l'écriture, nous aborderons le phénotype comportemental de la trisomie 21 dans le domaine de la motricité, le domaine cognitif et le domaine langagier. L'écriture étant une capacité acquise principalement dans le domaine scolaire, l'inclusion des personnes T21 et leurs compétences scolaires dans le domaine de l'écrit seront aussi exposées. Un second chapitre sera consacré à l'écriture manuscrite. Son apprentissage en tant qu'acte moteur sera détaillé, en particulier sur la mise en place d'une programmation motrice. Nos propos se centreront ensuite sur les facteurs pouvant influencer les capacités d'écriture. Parmi ceux-ci, nous détaillerons les facteurs propres à l'individu (âge, genre, prise du stylo, traitement perceptivo-moteur) et les facteurs contextuels (exercices variant sur le style d'écriture et sur la façon dont est présenté le modèle de la lettre à tracer). Le chapitre s'achèvera sur les troubles de l'écriture rencontrés dans la population avec ou sans troubles neuro-

¹ Relevé effectué en juin 2016 à partir des bases de données PsycINFO et PsycArticles. Les mots clefs utilisés sont « down syndrome » et « handwriting ».

développementaux et dans la population T21. Le chapitre 3, consacré à la présentation de la recherche, visera à exposer la problématique de ce travail et à préciser la population de l'étude ainsi que notre design expérimental. Ainsi, ce travail de recherche se composera de trois études, chacune détaillée dans le chapitre 4. L'étude 1 portera sur l'évaluation de la trace écrite en termes de qualité et de vitesse afin de caractériser l'écriture dans la population T21 par rapport à la population typique. Les facteurs individuels prédictifs du niveau d'écriture seront également étudiés auprès des deux populations. L'étude 2 consistera en une tâche d'écriture de lettres isolées sur une tablette graphique, qui permet la mesure d'indices dynamiques, en vue de déterminer le type de contrôle moteur sous-jacent à cette trace écrite. L'étude 3 s'intéressera à l'impact de différentes modalités de présentation de la lettre (démonstration visuelle du tracé, instructions verbales, exploration manuelle) sur la dynamique du tracé. Le chapitre 5 synthétisera l'ensemble des résultats et les discutera au regard de la littérature scientifique. Enfin, les limites de ce travail seront exposées ainsi que les perspectives futures de recherche qu'il permet d'envisager.

Chapitre 1 - La trisomie 21

Ce chapitre a pour objectif de présenter la population au cœur de ce travail de recherche et d'en aborder les caractéristiques principales, avant d'étudier plus précisément l'écriture au chapitre suivant. Dans un premier temps, les particularités de la trisomie 21 seront abordées à l'aide de données historiques ainsi qu'épidémiologiques. Dans un second temps, les principales fonctions du phénotype comportemental de la population T21 seront détaillées, notamment le développement psychomoteur et cognitif. Enfin, ce chapitre s'achèvera sur les différentes compétences scolaires dont les personnes T21 font preuve dans le domaine du langage écrit avec la lecture et la production écrite.

1. Un syndrome génétique à l'origine de déficience intellectuelle

La trisomie 21 est une anomalie chromosomique étudiée dans diverses disciplines telles que la génétique, la psychologie ou encore l'éducation. Sa découverte scientifique, qui va être présentée ici, permet de mieux comprendre le contexte politico-historique et socio-culturel ayant influencé son épidémiologie au cours du XX^{ème} siècle en termes de prévalence et d'espérance de vie. La trisomie 21 demeure le premier syndrome génétique à l'origine de déficience intellectuelle. Son étude amène alors à se questionner sur la spécificité du développement de personnes T21 en référence à la problématique du retard ou différence développementale.

1.1. La découverte scientifique de la trisomie 21

Les premières descriptions scientifiques en lien avec la trisomie 21 datent du XIX^{ème} siècle au travers de rapports médicaux décrivant les caractéristiques des différents types de maladies mentales (Esquirol, 1838). Dans cet ouvrage, Esquirol insiste particulièrement sur la distinction à faire entre *démence mentale* et *idiotie*, jugée incurable et homologue à la trisomie 21. « L'idiotie n'est pas une maladie, c'est un état dans lequel les facultés intellectuelles ne se sont jamais manifestées, ou n'ont pu se développer assez pour que l'idiot ait pu acquérir les connaissances relatives à l'éducation que reçoivent les individus de son âge, et placés dans les mêmes conditions que lui [...]. On ne conçoit pas la possibilité de

changer cet état. [...] La démence et l'idiotie diffèrent essentiellement, ou bien les principes de toute classification sont illusoire. » (Esquirol, 1838, p.76). A la même époque, Itard (1774-1838), médecin de l'Institution Nationale des Sourds-Muets, a été novateur en défendant le postulat selon lequel une éducation spécialisée auprès de personnes présentant une *idiotie* pourrait engendrer une amélioration. Son étude de cas la plus originale est celle de Victor, l'enfant sauvage de l'Aveyron (Itard, 1801). Bien que sa rééducation échoua, elle apporta un regard nouveau auprès de la communauté de la médecine et engendra l'ouverture de plusieurs écoles spécialisées dans l'éducation d'enfants présentant un *crétinisme* ou une *idiotie*, aussi bien en Europe qu'en Amérique. Ce concept d'éducation spécialisée intégra différents aspects médico-pédagogiques (hygiène, éducation sensorielle ; Beaugerie-Perrot & Lelord, 1991). Suivant les pas d'Itard, Séguin publia en 1846 un ouvrage sur les pratiques professionnelles auprès des « *idiots et des autres enfants arriérés ou retardés dans leur développement* », dans lequel on retrouve des observations détaillées d'enfants présentant différents niveaux d'*idiotie*, dont certains correspondent à la trisomie 21. Par la suite, le médecin britannique Down entreprend des travaux (1862 ; 1866) consistant en la classification des *idiots* sur la base de critères relatifs au périmètre crânien et aux caractéristiques faciales. Comparativement à la *race* mongole², il retrouve des similitudes morphologiques. Down propose alors le terme de *mongolisme* qui va ensuite se généraliser au début du XX^{ème} siècle (Ward, 1999). C'est en 1961 qu'un ensemble de scientifiques en génétique appelle à ce que les termes d'*idiotie* et de *mongolisme* ne soient plus utilisés car porteurs de connotations trompeuses. Le terme de *Down syndrome* a ensuite été acté en 1965 par l'Organisation Mondiale de la Santé, jugeant cette appellation plus appropriée.

A la même époque, l'avancée des connaissances en génétique moléculaire a permis la découverte des 47 chromosomes dans le caryotype de la population T21, publiée en 1959 par Lejeune, Gauthier et Turpin. Ce nombre atypique de chromosomes sera confirmé dans la même année par d'autres équipes de recherche (Ford et al., 1959 ; Jacobs, Baikie, Court-Brown & Strong, 1959 ; Book, Fraccaro & Linsten, 1959). Pour la première fois au monde, l'identification du chromosome surnuméraire au niveau de la paire n°21 établissait un lien entre déficience intellectuelle et anomalie chromosomique. Cette découverte génétique a alors permis de préciser le diagnostic de la trisomie 21 au-delà des caractéristiques

² D'après Blumenbach (1752-1840), les membres de l'espèce humaine pouvaient se différencier selon leur morphologie crânienne. Il proposa alors une classification en cinq *racés* : américaine, caucasienne, malaise, éthiopienne et mongole.

physiques et intellectuelles. Ainsi, la trisomie 21 est une maladie d'origine génétique (CIM-10 ; OMS, 1993) due à une aneuploïdie génomique. Ceci fait référence à la présence ou l'absence atypique de copie surnuméraire d'un chromosome. Parmi les aneuploïdies par excès, les trisomies autosomiques viables les plus fréquentes sont la trisomie 18 (syndrome d'Edwards) avec une prévalence à la naissance en Europe de 8,6/100 000 et la trisomie 13 (ou syndrome de Patau) avec 3,7/100 000, d'après le classement par prévalence des maladies rares (Les cahiers d'Orphanet, 2014). Leurs appellations proviennent de la paire du caryotype où se situe le 3^{ème} chromosome. La trisomie 21 représente la principale cause d'anomalie génétique avec une prévalence à la naissance de 98/100 000 en Europe (de Fréminville & Touraine, 2014).

Il existe différents facteurs à l'origine de la trisomie 21 dont Lambert et Rondal (1979) en font la liste. Parmi les facteurs intrinsèques, les facteurs héréditaires regroupent différents cas de figure. La mère T21 présente une forte probabilité (50%) d'avoir un enfant également porteur de trisomie 21 ; il en est de même si un des parents présente un caryotype avec trisomie 21 en mosaïque ou avec translocation. Parmi les autres facteurs intrinsèques, l'âge de la mère a été très étudié comme indice de prévalence. Ainsi, à 17 ans, la mère a une probabilité d'avoir un enfant T21 de 1 cas pour 1 000 naissances (1/1 000), alors qu'à partir de 43 ans, elle est comprise entre 14/1 000 et 20/1 000 naissances (Robert, Pradat & Laborier, 1997). L'âge du père serait également un facteur, mais moins déterminant, à la présence d'une trisomie 21 lors du développement embryonnaire. Les facteurs extrinsèques présents dans l'environnement direct du fœtus en développement sont également à prendre en compte. Parmi les plus fréquents, on note : les radiations (rayons X ou autre), les virus (hépatite ou rougeole), les agents chimiques mutagènes, les désordres thyroïdiens chez la mère, les facteurs immunobiologiques ou les déficiences en vitamines (Carlier & Ayoun, 2007). La trisomie 21 est un syndrome génétique, elle présente donc une particularité épidémiologique dépendant de facteurs intrinsèques et extrinsèques variés. Différents types de trisomie 21 en découlent. Selon la taille de la région sur-répliquée, trois types de trisomie 21 se différencient (Rethoré et al., 2005). La trisomie complète est la plus courante (93%) et a pour origine une non-disjonction d'un chromosome entier lors de la méiose ou de la mitose. Lorsque cette erreur de distribution de chromosome a lieu lors de la deuxième division cellulaire, on parle de trisomie mosaïque. Il est parfois difficile de déterminer l'étendue d'une trisomie mosaïque car les niveaux de mosaïsme peuvent varier

d'un tissu à un autre et l'analyse ne peut pas être faite sur des tissus issus du système neurologique, base du développement intellectuel. Plusieurs études de cas ont pu attester du fait que des personnes présentant un faible taux de cellules avec trisomie 21 faisaient preuve d'un faible retard cognitif (Bhatt et al., 1995 ; Moreira, San Juan, Pereira & De Souza, 2000 ; Finley, Finley, Rosecrans & Tucker, 1966 ; Fishler & Koch, 1991 ; Johnson & Abelson, 1969 ; Paoloni-Giacobino, Lemieux, Lemyre & Lespinasse, 2007 ; Shipe, Reisman, Chung, Darnell & Kelly, 1968). Par exemple, Moreira et collaborateurs (2000) décrivent le parcours d'un adulte dont 3% de ses cellules portent la trisomie 21 et présentant un développement intellectuel moyen. Il a ainsi pu être diplômé du lycée à 17 ans et accéder à un enseignement à l'Université de São Paulo dans le domaine de l'administration et des affaires. Une autre étude, portant cette fois-ci sur 107 individus âgés de 1 mois à 43 ans, a comparé le phénotype des personnes avec mosaïcisme comparativement à celui de personnes avec une trisomie 21 complète à partir d'examen physique, d'évaluation de photographie, d'enquête et/ou de dossier médical (Papavassiliou et al., 2009). Les résultats ont mis en évidence un quotient intellectuel moyen significativement plus élevé dans l'échantillon d'individus avec trisomie mosaïque et l'atteinte des différentes étapes du développement sensori-moteur plus précoce (de l'ordre de quelques mois) par rapport au groupe avec trisomie 21 complète, en particulier pour la marche à quatre pattes, la marche debout et la capacité de s'habiller seul. Ces résultats confirment ainsi la tendance évoquée par Fishler et Koch (1991) qui liait le génotype au phénotype à partir d'une approche étiologique. Le troisième type de trisomie 21 ne concerne pas un chromosome entier mais une partie du chromosome des paires n°13, 14, 15 ou 22 qui se greffe à celui de la paire n°21. Cette surcharge de quantité de gènes donne alors lieu à une trisomie par translocation.

1.2. L'épidémiologie de la trisomie 21

En France, la prévalence totale (nombre de naissances et d'interruptions de grossesse) de la trisomie 21 a doublé entre 1948 et 2005 passant de 14/10 000 à 23/10 000 cas de trisomie 21 au sein de 8 départements français, représentant 10,2% des naissances françaises (Rousseau et al., 2010). Cette augmentation peut s'expliquer par une élévation importante de l'âge maternel, en particulier dans la région parisienne (De Vigan, Khoshnood, Cadio, Vodovar & Goffinet, 2008a). A contrario, la prévalence française des naissances vivantes a diminué pour passer de 14/10 000 en 1978 à 5,1/10 000 naissances en 2005 (Rousseau et al., 2010). En effet, près de 90% des trisomies 21 sont désormais détectées par

dépistage prénatal et dans plus de 78% des cas (85% en région parisienne) la grossesse est alors interrompue (De Vigan, Khoshnood, Cadio, Vodovar & Goffinet, 2008b ; Rousseau et al., 2010). Cette fréquence semble varier selon le pays concerné, étant établie par exemple à 71/100 000 naissances à Paris en France (De Vigan et al., 2008a), à 99/100 000 à New York aux Etats-Unis (Olsen, Cross & Gensburg, 2003), ou à 220/100 000 à Dubaï aux Emirats Arabes Unis (Murthy et al., 2007). Selon le pays, suite à un dépistage, l'interruption médicale de grossesse est ou n'est pas autorisée. La décision finale des parents, dépendant des cultures et de leur environnement religieux, est à prendre en compte dans l'estimation de la fréquence des naissances.

Au cours du siècle dernier, l'espérance de vie des personnes T21 a augmenté considérablement en évoluant de 9 ans (en 1929) à 12 ans (en 1949 ; Penrose, 1949), puis de 25 ans (en 1983) à 49 ans (en 1997 ; Yang, Rasmussen & Friedman, 2002), jusqu'à atteindre 55 ans (en 1993 ; Janicki, Dalton, Henderson & Davidson, 1999) puis 60 ans (en 2000 ; Glasson et al., 2002). Il y a 20 ans, on estimait déjà à 44% la proportion de personnes T21 atteignant l'âge de 60 ans et 14% jusqu'à 68 ans (Bourquin & Lambert, 1998). Cette amélioration continue de leur survie a lieu en particulier au cours de la première année de vie mais également tout au long de la vie (Glasson et al., 2002). Yang, Rasmussen et Friedman (2002) attribuent cette hausse d'espérance de vie par la diminution des institutionnalisations et placements précoces en instituts (Haslam & Milner, 1992), un meilleur traitement des causes fréquentes de décès et à une meilleure prise en charge, en particulier pour la chirurgie cardiaque dès la naissance. Néanmoins, ces gains d'espérance de vie et de longévité sont moindres par rapport aux autres déficiences intellectuelles, ceci étant dû aux nombreuses pathologies rattachées à ce syndrome (Azéma & Martinez, 2005). En effet, dans 45% des naissances, les nouveau-nés T21 présentent des maladies cardiaques et des malformations digestives. Il existe une forte prévalence de surpoids et d'obésité chez les personnes T21 (Chumlea & Cronk, 1981 ; Prasher, 1995), en particulier à la fin de l'enfance et à l'âge adulte (McGowan et al., 2012 ; Styles, Cole, Dennis & Preece, 2002). Le surpoids peut engendrer de nombreux troubles de la santé tels que les maladies cardiovasculaires, le diabète, les troubles musculo-squelettiques et certains cancers (Poirier & Després, 2003 ; Schlienger, Luca, Vinzio & Pradignac, 2009), ainsi que des répercussions d'ordre social et psychologique. Tout comme pour la population typique, ce surpoids est influencé par le régime alimentaire, l'activité physique ainsi que le revenu socio-

économique (Le Petit & Berthelot, 2006 ; Tjepkema, 2006). De plus, au cours de sa vie, l'individu T21 peut être sujet à des problèmes intestinaux, une épilepsie grave ou des déficits sensoriels, tels qu'une coordination binoculaire lente, un strabisme marqué, une myopie ou une perte d'audition. D'après Määttä (2011), les problèmes de santé sont corrélés au déficit intellectuel. Par exemple, des troubles de la mémoire auditive (Jarrod, Baddeley & Phillips, 2002), verbale (Edgin, Pennington & Mervis, 2010), visuelle (Evenhuis, Theunissen, Denkers, Verschuure & Kemme, 2001) ou des problèmes de santé buccale sont corrélés à des difficultés d'acquisition du langage, de la parole ainsi que des déficits cognitifs et intellectuels. Dans la population typique, la majorité des personnes symptomatiques de la maladie d'Alzheimer présente des comportements d'apathie, d'anxiété et de dysphorie (Benoit et al., 2003). Dans l'étude de Coppus et collaborateurs (2006), 16,8% de leurs 506 participants T21 âgés de plus de 45 ans présentent une démence similaire, avec une incidence croissante atteignant 32,1% chez les 55-59 ans. Une autre étude longitudinale (Devenny et al., 1996) a permis de mettre en évidence au sein de la population T21 vieillissante plusieurs paliers de troubles cognitifs associés à la sévérité de la démence. Ainsi, le déclin ne serait ni global ni massif mais débiterait avec la dégradation progressive de la mémoire, de l'attention et de la capacité visuo-spatiale, puis s'étendrait au niveau de la structuration des informations et de la mémoire de travail, pour ensuite se confirmer par une baisse des capacités de mémoires sémantique et à court terme. La maladie d'Alzheimer s'exprimerait alors chez une partie de la population T21, et ce, de façon similaire à la population typique. La seule différence serait l'âge d'apparition des premiers symptômes dû au vieillissement cellulaire et psychologique accéléré caractéristique de la population T21.

1.3. Les critères de la déficience intellectuelle

Avec une fréquence de 50 pour 100 000 naissances, la trisomie 21 représente la première cause de déficience intellectuelle d'origine génétique, devant le syndrome du X-fragile (20/100 000), le syndrome de Smith-Magenis (5,3/100 000), la maladie du « Cri-du-Chat » ou monosomie 5p (4/100 000), le syndrome de Prader-Willi (2,8/100 000), le syndrome de Williams-Beuren (1,8/100 000) et le syndrome d'Angelman (1,1/100 000 ; Les cahiers d'Orphanet, 2013). Ceci souligne le fait que des syndromes génétiques peuvent être à l'origine de déficience intellectuelle, qui est alors de cause innée, mais elle peut également être issue d'une cause acquise (Courbois & Paour, 2007). La possibilité d'une cause innée et d'une cause acquise induit alors deux courbes différenciées d'intelligence, l'une

pathologique et l'autre normale, telles que présentées dans la figure 1 (Iarocci & Petrill, 2012). Dans 30 à 40% des cas, la déficience intellectuelle est due à une anomalie génétique (Yeargin-Allsopp, Murphy, Cordero, Decoufle & Hollowell, 1997). Grâce à la recherche médicale et génétique, de plus en plus de syndromes sont identifiés comme associés à la déficience intellectuelle (L'Abbé, Labine, Lemieux, & Lespinasse, 2004). Plus de 200 mutations génétiques et 800 polymorphismes connus sont à l'origine de déficience intellectuelle (Strømme & Hagberg, 2000). Cette cause innée intervient dans environ 30% des cas de *retard mental* sévère et dans 4 à 8% des cas de *retard mental* léger (Schaefer & Bodensteiner, 1992). A l'opposé, dans plus de 50% des cas de déficience intellectuelle, la cause serait familiale et non pathologique (Iarocci & Petrill, 2012). Elle correspondrait à un niveau léger de déficience intellectuelle, situé dans la partie inférieure de la distribution normale des capacités cognitives (Burack, Hodapp & Zigler, 1988 ; Perret & Faure, 2006).

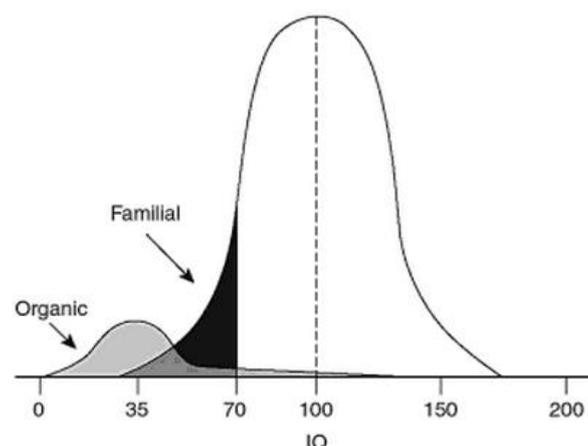


Figure 1. Distribution du QI chez les personnes présentant une déficience intellectuelle de cause innée (Organic) ou acquise (Familial), d'après Iarocci et Petrill (2012).

La communauté scientifique se heurte à la difficulté de définir précisément la déficience intellectuelle. En effet, la mesure du niveau d'efficiency intellectuelle est délicate à réaliser, en particulier au niveau de la frontière entre niveau typique et atypique. D'après la classification statistique internationale des maladies et des problèmes de santé connexes (CIM-10 ; OMS, 1993), le *retard mental*³ fait partie des troubles mentaux et du comportement pouvant être hiérarchisé d'un niveau léger à profond [F70 à F73] selon différents intervalles de quotient intellectuel (QI) : *retard mental* léger (QI = 50-69), moyen (QI = 35-49), grave (QI = 20-34), profond (QI < 20). D'après le DSM-IV-TR (APA, 2000) qui

³ Les termes en italique sont ceux utilisés par les auteurs, ils n'avaient pas de valeur péjorative à leur origine (Zazzo, 1979) mais ont progressivement disparu du vocabulaire scientifique et professionnel dû à la connotation négative attribuée par le parler quotidien (Courbois & Paour, 2007).

reprend cette même classification, 85% des personnes avec déficience intellectuelle présentent un retard léger, 10% un retard moyen, 3-4% un retard grave et 1-2% un retard profond. Comme détaillé dans le tableau 1, le DSM-IV-TR présente des similarités dans les critères d'évaluation de sévérité de la déficience intellectuelle avec la CIM-10. La différence réside dans les limites des tranches de QI pour lesquelles le DSM-IV-TR se veut plus souple en associant la sévérité à des niveaux dont les scores peuvent se recouvrir (QI = de 20-25 à 35-40 pour un *retard mental* grave, QI = de 35-40 à 50-55 pour un *retard mental* moyen). Seulement dans le cas d'un QI équivalent à un score défini dans deux niveaux consécutif (ex. QI = 36), le niveau de fonctionnement adaptatif permettra de trancher. Avec cette hiérarchisation selon le QI, la déficience intellectuelle perd sa composante sociale présentée par Binet et Simon⁴ (1904) ; elle est alors évaluée comme une caractéristique intrinsèque à la personne. Par le fait de se limiter à certains domaines de développement en mesurant de façon brève le développement social, l'utilisation des tests d'intelligence semble controversée. En effet, ces outils qui se voulaient le plus objectif possible ne soulignent que l'incapacité à répondre aux exigences sociales relatives à l'autonomie personnelle (Zazzo, 1973). En 1992, puis révisé en 2002, un modèle théorique est proposé par l'American Association on Mental Retardation⁵ (AAMR), qui suppose l'existence de 5 dimensions au *retard mental* :

- dimension I : aptitudes intellectuelles, dont le meilleur instrument est la mesure du quotient intellectuel,
- dimension II : comportement d'adaptation (conceptuel, social, habiletés pratiques), dont l'évaluation n'est encore que trop peu documentée,
- dimension III : participation, interaction et rôles sociaux,
- dimension IV : santé (physique, mental, étiologie)
- dimension V : contexte (proches, voisinage/communauté, culture/société/pays) avec interaction entre les différentes conditions de vie (Carlier & Ayoun, 2007).

Ce modèle induit alors une définition de la déficience intellectuelle incluant à la fois la dimension intellectuelle et adaptative. Celle-ci est proposée par l'AAMR dans sa 10^{ème} édition de la classification du *retard mental* de 2002 et par l'American Psychiatric

⁴ Binet et Simon sont à l'origine en 1904 de la première échelle métrique de l'intelligence dans laquelle le niveau intellectuel est défini selon les compétences socio-scolaires (langage, lecture, écriture) s'appuyant alors sur la capacité de communication sociale.

⁵ Cette association a été fondée par Edouard Seguin en 1867 sous le nom de « Association of Medical Officers of American Institutions for idiotic and Feeble-minded persons ». Depuis le 1^{er} janvier 2007, elle porte le nom de « American Association on Intellectual and Developmental Disabilities » (AAIDD).

Association (APA) dans le DSM-IV-TR (2003). Elle permet alors de distinguer trois critères diagnostiques de la déficience intellectuelle :

- un fonctionnement intellectuel défini par un QI significativement inférieur à la moyenne,
- une limitation des comportements adaptatifs dans plusieurs secteurs d'aptitude (communication, autonomie, vie domestiques, aptitudes sociales et interpersonnelles, mise à profit des ressources de l'environnement, responsabilité individuelle, utilisation des acquis scolaires, travail, loisirs, santé et sécurité),
- le tout survenant avant l'âge de 18 ans.

Plus récemment, la 5^{ème} version du manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux (DSM-5) publiée par l'APA (2013) fait état du caractère multidimensionnel de la déficience intellectuelle⁶ en excluant la prise en compte du QI. En effet, à partir du profil établi dans les trois domaines conceptuel, social et pratique, le niveau de déficience intellectuelle peut alors être diagnostiqué parmi les niveaux : léger, modéré, sévère, profond. Les critères regroupés dans le tableau 2 sont alors beaucoup plus détaillés par rapport aux précédentes classifications. La version 11 de la CIM, dont la publication est prévue pour 2018, devrait se joindre aux changements du DSM tels que cette approche dimensionnelle de la déficience intellectuelle.

D'après Lambert et Rondal (1979), le quotient intellectuel chez les adultes T21 se situerait à 40-45 en moyenne (Turner & Alborz, 2003). Selon la CIM-10 et le DSM-IV-TR, ce QI correspondrait à un *retard mental* de niveau moyen (QI = de 35 à 49 pour la CIM-10 et QI = de 35-40 à 50-55 pour le DSM-IV-TR). Plus précisément, 86,5% des personnes T21 ont un *retard mental* de niveau modéré, 8% de niveau profond et 5,5% de niveau léger (Comblain & Thibaut, 2009). D'après la classification proposée dans le DSM 5 (APA, 2013), les personnes T21 présenteraient une déficience intellectuelle de niveau modéré avec un développement des aptitudes à un niveau élémentaire, une communication limitée avec autrui et une période étendue d'apprentissage. Vers l'âge de 40 ans, une altération globale des différents acquis cognitifs apparaît vers l'âge de 40 ans (Hodapp, Evans & Gray, 1999 ; Morss, 1983). Cependant, on remarque que cette diminution apparaît majoritairement pour des épreuves verbales en comparaison aux épreuves de performance non verbales (pour

⁶ D'après le DSM-5, « le terme diagnostique *handicap intellectuel* a pour équivalent le diagnostic de *troubles du développement intellectuel* dans la CIM-10. [...] Ainsi, *handicap intellectuel* est le terme communément utilisé par le monde médical, l'enseignement, les autres professions, le grand public et les associations représentatives. » Cependant, pour des raisons de lisibilité, le terme *déficience intellectuelle* sera conservé dans ce manuscrit.

Tableau 1. Différents niveaux de sévérité de la déficience intellectuelle d'après le CIM-10 (OMS, 1993) et le DSM-IV-TR (APA, 2000).

	Léger [F70.x]	Moyen [F71.x]	Grave [F72.x]	Profond [F73.x]
<u>CIM-10</u>				
Fonctionnement intellectuel général	QI = 50 à 69	QI = 35 à 49	QI = 20 à 34	QI < à 20
Fonctionnement adaptatif	Aboutira vraisemblablement à des difficultés scolaires. Beaucoup d'adultes seront capables de travailler et de maintenir de bonnes relations sociales et de s'intégrer à la société.	Aboutira vraisemblablement à d'importants retards de développement dans l'enfance, mais beaucoup peuvent acquérir des aptitudes scolaires et un certain degré d'indépendance et les capacités suffisantes pour communiquer. Les adultes auront besoin d'un soutien de niveaux variés pour travailler et vivre dans la communauté.	Aboutira vraisemblablement à un besoin prolongé de soutien.	Q.I. au-dessous de 20 (chez les adultes, âge mental en dessous de 3 ans). Aboutit à une limitation très marquée des capacités à prendre soin de soi-même, de contrôler ses besoins naturels, de communiquer et de se déplacer.
<u>DSM-IV-TR</u>				
Fonctionnement intellectuel général	QI = 50-55 à 70 environ	QI = 35-40 à 50-55	QI = 20-25 à 35-40	QI < 20-25
Fonctionnement adaptatif	En tant que groupe, les sujets atteints d'un Retard mental de ce niveau développent habituellement des aptitudes à la socialisation et à la communication pendant la période préscolaire (de 0 à 5 ans). Ils ont une altération minimale des fonctions sensori-motrices et ne peuvent souvent être distingués des enfants sans Retard mental qu'à un âge plus avancé. Vers la fin de l'adolescence, ils peuvent faire des acquisitions scolaires jusqu'au niveau de la sixième environ. A l'âge adulte, ils peuvent parvenir à une insertion sociale et professionnelle suffisante pour assurer une autonomie minimale, mais ils peuvent avoir besoin de supervision, d'assistance et de conseils quand ils subissent un stress social ou économique inhabituel. A l'aide de mesures de soutien appropriées, les individus ayant un retard mental léger réussissent habituellement à vivre dans la société, soit de façon indépendante, soit au sein de structures protégées.	La plupart des sujets ayant ce niveau de Retard mental acquièrent des aptitudes à la communication pendant la première enfance. Ils peuvent bénéficier d'un apprentissage professionnel et acquérir une autonomie au prix d'une assistance modérée. Ils peuvent aussi bénéficier d'un apprentissage social et pratique, mais ont peu de chances de poursuivre leur scolarité au-delà du cours élémentaire première année. Ils peuvent apprendre à se déplacer seuls dans des endroits connus. Pendant l'adolescence, leurs difficultés à acquérir les conventions sociales peuvent gêner leurs relations avec leurs camarades. A l'âge adulte, la plupart réussissent dans des travaux non qualifiés ou semi-qualifiés, sous supervision, que ce soit dans des ateliers protégés ou dans le monde du travail. Ils s'adaptent bien à la vie en communauté, généralement dans des structures protégées.	Pendant la première enfance, ils ne développent que peu ou pas de communication verbale. A l'âge scolaire, ils peuvent apprendre à parler et à prendre soin d'eux-mêmes de façon élémentaire. Ils ne profitent que peu de l'instruction qui est donnée à l'école maternelle, comme se familiariser avec l'alphabet et apprendre à compter, mais ils peuvent parvenir à déchiffrer quelques mots essentiels à leur "survie". A l'âge adulte, ils peuvent être capables d'effectuer des tâches simples sous surveillance étroite. La plupart s'adaptent bien à la vie en communauté, en foyer ou dans leur famille, à moins qu'ils ne présentent un handicap associé nécessitant des soins infirmiers spécialisés ou une autre forme de prise en charge.	La plupart des individus ayant ce diagnostic ont une pathologie neurologique définie, responsable de leur Retard mental. Pendant la première enfance, ils présentent des perturbations considérables des fonctions sensori-motrices. Un développement optimal peut survenir dans un environnement très structuré, comportant une assistance et une surveillance constante, ainsi qu'une relation individualisée avec un soignant. Le développement moteur, l'autonomie et les capacités de communication peuvent s'améliorer si un apprentissage adéquat est proposé. Certains sujets parviennent à effectuer des tâches simples dans des conditions très protégées, au prix d'une étroite supervision.

Tableau 2. Différents niveaux de sévérité de la déficience intellectuelle d'après le DSM-5 (APA, 2015).

	Léger	Moyen	Grave	Profond
Domaine conceptuel	Chez les enfants d'âge préscolaire, il peut ne pas y avoir de différence évidente au plan intellectuel. Pour les enfants d'âge scolaire et les adultes, il existe des difficultés à acquérir des compétences scolaires avec besoin d'aide dans un ou plusieurs domaines pour satisfaire aux attentes en rapport avec l'âge. Chez l'adulte, l'abstraction, les fonctions exécutives, la mémoire à court terme tout autant que l'utilisation des compétences scolaires sont altérées. Il existe une approche plutôt concrète des problèmes et des solutions par rapport aux adultes du même âge.	Tout au long du développement, les capacités intellectuelles du sujet restent largement en deçà de celles de ses pairs. Pour les enfants non encore scolarisés, le langage et les compétences préscolaires se développent lentement. Pour les enfants scolarisés, les acquisitions en lecture, écriture, calcul, la compréhension de l'heure et la gestion de l'argent progressent lentement mais sont manifestement limitées par rapport aux autres élèves. Chez les adultes, le développement des capacités intellectuelles reste manifestement à un niveau élémentaire, et une aide est nécessaire pour toute application des apprentissages scolaires dans le monde du travail ou la vie personnelle.	L'acquisition des compétences conceptuelles est limitée. Le sujet a habituellement peu de compréhension du langage écrit et des notions impliquant des nombres, des quantités, le temps et l'argent. Les aidants doivent fournir une aide substantielle pour résoudre les problèmes tout au long de la vie.	Les compétences intellectuelles sont essentiellement centrées sur le monde physique plutôt que sur le monde symbolique. Le sujet peut utiliser des objets de façon appropriée pour prendre soin de lui, travailler ou se distraire. Quelques compétences visuospatiales, comme assortir et trier des objets selon leurs caractéristiques psychiques, peuvent être acquises. Cependant, des déficits sensori-moteurs associés peuvent interdire l'utilisation des objets.
Domaine social	Par rapport aux adultes du même âge, le sujet est immature dans ses interactions sociales. Par exemple, il peut avoir des difficultés à percevoir avec acuité les codes sociaux. La communication, la conversation, le langage sont plus concis ou immatures que ce qui est attendu pour l'âge. Il peut y avoir des difficultés à contrôler l'émotion et le comportement de façon appropriée à l'âge; ces difficultés sont remarquées par les autres dans la vie sociale. Le sujet a une compréhension limitée des risques dans les situations sociales; son jugement y est immature, et il court le risque d'être manipulé par les autres (crédulité).	Le sujet, au cours de son développement, montre de grandes différences par rapport aux autres dans la communication et les comportements sociaux. Le langage parlé reste d'évidence le premier moyen de communication mais à un niveau de complexité nettement inférieur à celui des pairs. La capacité de lier des relations est manifeste avec la famille et des amis; le sujet peut même au cours de sa vie arriver à établir des relations amicales durables voire des relations amoureuses à l'âge adulte. Le jugement social et les capacités décisionnelles sont limités et des aidants doivent assister la personne dans les décisions importantes de la vie.	Le langage parlé est assez limité en termes de vocabulaire et de grammaire. Le discours peut se résumer à des mots ou phrases simples et être complété par des moyens de suppléance. Le discours et la communication sont centrés sur "l'ici et le maintenant" des événements quotidiens. Le langage est plus utilisé à des fins de communication sociale qu'à de l'explication. Les sujets comprennent un discours simple et la communication gestuelle. Les relations avec les membres de la famille et des proches sont une source de plaisir et d'aide.	Le sujet a une compréhension très limitée de la communication symbolique, qu'elle soit orale ou gestuelle. Il peut comprendre des instructions ou des gestes simples. La personne exprime très largement ses désirs et ses émotions dans la communication non verbale et non symbolique. Elle trouve du plaisir dans les relations avec les membres de sa famille qu'elle connaît bien, les soignants, les proches, et amorce ou répond aux interactions sociales par des signes gestuels ou émotionnels. Des déficits sensori-moteurs associés peuvent interdire un grand nombre d'activités sociales.
Domaine pratique	Le sujet peut agir de manière appropriée à son âge pour les soins personnels. Il nécessite cependant une assistance pour les tâches plus complexes de la vie quotidienne. A l'âge adulte, les aides concernent surtout les achats alimentaires, les transports, la prise en charge des enfants et de la maison, la préparation de repas équilibrés, la gestion des comptes et de l'argent. L'aptitude aux loisirs est peu différente des sujets du même âge. A l'âge adulte, le sujet peut réussir à trouver un emploi en milieu normal mais dans des fonctions qui ne mettent pas en avant les compétences intellectuelles. Ces personnes ont généralement besoin d'aide pour prendre des décisions médicales et légales.	Le sujet arrivé à l'âge adulte peut assurer ses besoins personnels pour ce qui est de la nourriture, de l'habillement, de l'élimination sphinctérienne, de la toilette. De même, la participation à toutes les tâches domestiques peut être acquise à l'âge adulte, bien qu'une période prolongée d'éducation soit nécessaire et que des aides suivies soient typiquement indispensables pour accéder à un niveau de performance adulte. Un travail autonome dans des emplois requérant des aptitudes intellectuelles et de communication limitées peut être exercé mais un soutien considérable de la part des collègues de travail, de l'encadrement et des autres est nécessaire pour satisfaire aux attentes sociales, aux difficultés du travail et aux exigences annexes. La personne peut accéder à des activités de loisirs variées.	Le sujet a besoin d'aide pour toute activité du quotidien, ce qui inclut les repas, l'habillement, la toilette, l'élimination. Il nécessite une surveillance de tous les instants. La personne ne peut pas prendre de décisions responsables concernant son bien-être ou celui des autres. A l'âge adulte, la participation à des tâches ménagères, aux distractions et au travail requiert une aide permanente. L'acquisition de compétence en tout domaine nécessite un enseignement prolongé et une aide constante. Un comportement inadapté, incluant l'auto-agressivité, est présent chez une minorité significative de sujets.	Le sujet est dépendant des autres pour tous les aspects du soin quotidien, de sa santé et de sa sécurité bien qu'il puisse aussi être capable de participer à quelques-unes de ces activités. Les individus indemnes d'atteintes physiques graves peuvent aider à certaines tâches domestiques du quotidien. Des actions simples utilisant des objets peuvent servir de base de participation à des activités professionnelles qui nécessitent néanmoins de hauts niveaux d'assistance soutenue. Des déficits physiques et sensoriels associés sont de fréquentes entraves à la participation à ces activités domestiques, de loisirs ou professionnelles. Un comportement inadapté est présent chez une minorité significative.

une revue : Carr, 2005).

Les classifications de la déficience intellectuelle ont vu leurs critères évoluer au cours du siècle dernier, reflétant ainsi l'évolution des représentations face au handicap au sein de la société et de la communauté scientifique. Sous l'égide des organisations internationales et des mouvements des personnes handicapées (Ravaud, 2001), nous sommes passés d'une approche médicale, centrée sur l'individu, à une approche structurelle et sociale. En donnant une place claire aux facteurs environnementaux, la Classification internationale du fonctionnement, du handicap et de la santé (OMS, 2001) conçoit le handicap comme le produit d'une situation, issue d'une interaction entre une personne et son environnement, et non plus comme relevant uniquement de caractéristiques individuelles. Ce changement de paradigme explique que le terme « mental retardation » (retard mental) centré sur la déficience chez l'individu ait été remplacé par celui de « intellectual developmental disability » (trouble du développement intellectuel) incluant ainsi les capacités de l'individu.

1.4. Approche développementale de la déficience intellectuelle

Les postulats autour de la problématique de « retard-différence » ont été formalisés dans les années 60 et continuent toujours d'être questionnés à l'heure actuelle. La question centrale est de savoir si le développement de personnes avec déficience intellectuelle (DI) est simplement ralenti ou s'il est troublé par des déficits spécifiques aboutissant à des différences de fonctionnement cognitif entre les personnes avec et sans DI. L'approche développementale a émergé en réaction à la théorie déficitaire selon laquelle la déficience intellectuelle relève de déficits structuraux sous-tendant une limitation des capacités de base de traitement de l'information (pour une revue : Bennett-Gates & Zigler, 1998). Cette approche a été vivement critiquée au titre que les données pointant des performances moindres chez les personnes DI reposaient sur des comparaisons basées sur l'âge chronologique invalidant la spécificité des déficits (Burack, Russo, Flores, Iarocci & Zigler, 2012). La plupart des travaux empiriques à l'œuvre depuis plus de 40 ans vont dans le sens d'une hypothèse de développement similaire (Paour, 1988 ; Rondal, 2009). L'approche retard a été notamment défendue par Zigler et collaborateurs (Bennett-Gates & Zigler, 1998 ; Weisz, Yeates & Zigler, 1982 ; Zigler, 1969) mettant en avant deux hypothèses :

-
- une structure similaire des conduites produites entre personnes avec DI et sujets au développement typique (DT) de même *âge mental* (ou âge de développement),
 - une séquence similaire selon laquelle les personnes avec DI évoluent suivant les mêmes étapes de développement que leurs pairs au DT.

L'approche développementale de Zigler postule donc une continuité entre développement normal et développement troublé ainsi qu'une synchronie entre différents domaines (pour une revue : Courbois & Paour, 2007). Cependant, il a été montré que la position développementale de Zigler n'était pas défendable dans sa formulation stricte. La méta-analyse réalisée par Weisz et Yeates (1981) s'est intéressée à des études comparant des personnes avec DI (étiologie contrôlée ou non) et des personnes au DT de même âge de développement. Parmi les 104 comparaisons, 75 présentent une absence de différence significative entre personnes avec DI et personnes au DT de même âge de développement. Les résultats des études sont alors en grande majorité en faveur d'un retard de développement chez les personnes avec DI (Weiss, Weisz & Bromfield, 1986). Cependant, les autres études présentent une différence entre les deux groupes, dont 25 révélant une supériorité des performances chez les personnes au DT de même âge de développement, donc en faveur d'une différence de structure entre personnes avec DI et personnes au DT. Enfin, la méta-analyse de Weisz et Yeates a permis de dénombrer 4 études mettant en avant de meilleurs scores chez les personnes avec DI. Les adultes avec DI présentent une expérience de vie plus élevée comparativement à des enfants au DT de même âge de développement, permettant la mise en place de capacités nécessitant plusieurs années d'apprentissage.

La plupart des travaux centrent leurs analyses autour de tendances moyennes et négligent la variabilité interindividuelle ou intraindividuelle. Or, cette variabilité peut être appréhendée comme une source importante d'information. De nombreuses études psychométriques rapportent une forte variabilité interindividuelle (Carr, 1985, 1995 ; Couzens, Cuskelly & Jobling, 2004 ; Couzens, Haynes & Cuskelly, 2012). Ainsi, les travaux de Carr soulignent que le quotient intellectuel des personnes T21 peut varier de 50 à 60 points. Cette variation n'est pas si différente de celle observée chez les enfants au DT même si les valeurs absolues sont plus basses. Les auteurs Couzens, Haynes et Curskelly (2012) se sont intéressés aux facteurs individuels et contextuels pouvant être associés à la variabilité interindividuelle des scores obtenus au test de Stanford-Binet IV auprès de 89 adultes T21.

Les différences de niveau cognitif entre les individus s'expliqueraient en partie par le tempérament, l'éducation maternelle, l'état de santé et les expériences scolaires. Par ailleurs, dans le champ de la trisomie 21, certains chercheurs se sont attachés à mettre en avant l'existence de typologies par le biais des méthodes de classification. L'étude de Jobling (1999) analyse le développement moteur auprès d'enfants T21 âgés de 10 à 16 ans. La population étudiée se répartit en 2 clusters : le premier groupe fait preuve d'une importante capacité à la rapidité et l'agilité en courant, alors que le second témoigne de meilleurs scores visuo-moteurs. En évaluant le tonus musculaire et l'activité motrice chez le nourrisson T21, Dmitriev (2001) souligne également des différences individuelles selon plusieurs clusters : 15 à 25% des nourrissons T21 présentent un tonus musculaire typique et sont capables d'atteindre des étapes clés du développement psychomoteur (maintenir la tête, porter un poids sur les pieds, soulever le torse avec bras tendus) avant l'âge de 4 mois, 50 à 60% des jeunes enfants T21 font preuve d'une disparité de force motrice entre le haut et le bas du corps, et 15 à 25% des nourrissons T21 sont globalement faibles musculairement avec des bras et des jambes flasques. A partir d'évaluation d'enfants T21 à l'aide des Echelles Différentielles d'Efficiences Intellectuelles (EDEI-R; Perron-Borelli, 1996), Tsao et Kindelberger (2009) dégagent quatre types de profil de fonctionnement cognitif indépendamment de l'âge et du sexe. Chaque groupe se distingue quant à ses habiletés dans les différents domaines de développement. Le premier cluster comprend 22 enfants T21 dont les scores se situent autour de la moyenne pour les épreuves verbales (vocabulaire, connaissance, compréhension sociale) et pour les subtests d'analyse catégorielle et d'adaptation pratique. Concernant l'épreuve de classification, un score nettement inférieur à la moyenne est observé. Le cluster 2 regroupe 24 enfants T21 dont les scores se situent nettement en dessous de la moyenne pour les deux types d'échelles. Le cluster 3 comprend 22 enfants T21 ayant des scores nettement au-dessus de la moyenne pour les épreuves verbales avec une baisse pour les épreuves non verbales (surtout pour l'analyse catégorielle et l'adaptation pratique). Le cluster 4 regroupe 20 enfants T21 qui se singularisent par des scores autour de la moyenne pour les épreuves verbales et par un haut niveau pour l'épreuve d'adaptation pratique. Ces données témoignent de la grande variabilité de profil de développement cognitif chez les enfants T21.

Parmi les approches pouvant caractériser la déficience intellectuelle, la variabilité intraindividuelle fût également l'objet de nombreux travaux. D'après Zazzo (1965), au cours

du développement d'un même individu typique ou atypique, l'évolution des aptitudes peut être à vitesse similaire (synchronie⁷) ou décalée (hétérochronie) entre différents domaines. En comparaison aux enfants tout-venants, les enfants avec DI présentent une plus grande hétérochronie développementale globale (Adrien, 1996 ; Guidetti & Tourrette, 1999 ; Nader-Grosbois, 1997, 2001a, 2001b, 2001c). Pour certaines aptitudes telles que la permanence de l'objet ou l'imitation gestuelle, il existe également des régressions développementales lors des transitions inter-stades (Nader-Grosbois, 2001a ; Morss, 1983 ; Dunst, Brassell & Rheingrover, 1981). L'étude de Seynhaeve et Nader-Grosbois (2005a) a porté sur les trajectoires développementales de 3 enfants T21 âgés de 20, 24 et 29 mois. Les résultats sur les décalages entre les scores d'un même secteur de capacités soulignent une différence d'hétérogénéité entre le développement socio-émotionnel et le développement socio-cognitif. Une étude de cas a visé à évaluer les compétences d'adaptation sociale et de régulation émotionnelle d'un enfant de 10 ans (AD = 4 ans 7 mois) présentant une déficience intellectuelle (Baurain & Nader-Grosbois, 2009). Les résultats révèlent une variabilité intraindividuelle plus élevée en comparaison à un enfant au développement typique âgé de 4 ans 5 mois. Une étude s'est intéressée aux comportements adaptatifs chez des enfants T21 évalués à l'aide de l'Echelle Vineland (Dykens, Hodapp & Evans, 2006). Les performances sont meilleures dans les subtests de socialisation et de vie quotidienne, en comparaison à celles obtenues dans le domaine de la communication, en particulier pour les capacités expressives. Il existe également une hétérochronie au sein d'un même domaine, tel que le développement sensori-moteur. Chez l'enfant T21, certaines aptitudes dans le développement sensori-moteur évoluent à une vitesse équivalente, puis, au cours du stade suivant, d'autres capacités évolueront à la même vitesse (Dunst, 1990). Par exemple, parmi les stades définis par les Echelles d'Evaluation du Développement Cognitif Précoce (Nader-Grosbois, 2000), la permanence de l'objet et les moyens pour atteindre un but, d'une part, et les relations spatiales et les schèmes de relation aux objets, d'autre part, évoluent selon des rythmes développementaux distincts (Dunst, 1990). Cette hétérochronie serait plus marquée à des âges chronologiques précoces avec un décalage de 1 à 3 stades piagétien entre les différents groupes d'aptitudes à l'âge de 10-18 mois (Dunst, 1990 ; Nader-Grosbois, 2001a). L'ensemble de ces études sur la variabilité intraindividuelle chez les enfants T21

⁷ Le principe de synchronie, au cœur de la théorie développementale de Piaget, suppose que le développement de l'enfant typique se fait par stades, par étapes. Cette notion s'oppose à celle de dysynchronie ou hétérochronie qui souligne des vitesses de développement variantes selon le domaine de développement de l'individu. La synchronie et l'hétérochronie permettent de caractériser l'absence ou l'existence de décalages dans les rythmes de développement (Nader-Grosbois, 2006).

présente cependant des limites car ce sont essentiellement des études de cas portant sur peu de participants.

Depuis le décryptage du génome, qui a conduit à identifier de multiples anomalies génétiques, les recherches s'attèlent à mettre en avant des phénotypes propres à un ensemble de syndromes génétiques. La déficience intellectuelle n'est plus perçue comme une entité unique mais comme un tableau clinique regroupant différentes anomalies génétiques ayant chacune des phénotypes différents. La problématique du phénotype conduit à la mise en évidence de spécificités comportementales propre à un syndrome génétique. Les recherches comparatives ont généralement recours à trois groupes de participants, dont un groupe de personnes au DT et deux groupes de personnes avec DI mais porteuses d'un syndrome génétique différent. Par exemple, Bellugi et ses collaborateurs ont initié dans les années 90 des recherches comparatives inter-syndromiques entre la trisomie 21 et le syndrome de Williams afin de pouvoir statuer sur la spécificité du profil psychologique attaché au syndrome cible de l'étude, ici le groupe avec un syndrome de Williams. Wang et Bellugi (1993) ont montré que ces deux pathologies présentaient chacune un profil psychologique et neuropsychologique particulier. Les sujets avec syndrome de Williams disposent de capacités relativement préservées dans le domaine du langage alors que des déficits importants sont notés au niveau des habiletés visuo-spatiales. Les sujets T21 présentent d'importantes déficiences dans tous les aspects du langage alors qu'aucun déficit n'est observé au niveau de la cognition spatiale (Bihrlé, Bellugi, Delis & Marks, 1989 ; Wang, Doherty, Rourke & Bellugi, 1995). Les comparaisons inter-syndromiques ont ainsi aidé à affiner les caractéristiques spécifiques de la population T21.

2. Le phénotype comportemental de la trisomie 21

La plupart des auteurs s'accordent à reconnaître un phénotype comportemental spécifique à la trisomie 21 caractérisé par des « strengths » (points forts) et des « weaknesses » (points faibles) dans différents domaines (Burack, Hodapp & Zigler, 1988 ; Dykens & Hodapp, 1999). Ainsi, un lien peut être établi entre le génotype caractéristique de l'anomalie génétique et le phénotype découlant du syndrome génétique et du milieu dans lequel l'individu évolue (pour une revue : Burack, Russo, Flores, Iarocci, Zigler, 2012). Dans le cadre de la trisomie 21, nous allons nous intéresser aux travaux portant sur les

caractéristiques motrices, cognitives et langagières présentes chez la grande majorité des personnes T21.

2.1. Le développement physique et moteur

Bien que les caractéristiques physiques d'un enfant dépendent des gènes parentaux, elles sont également influencées par la présence du chromosome surnuméraire dans le cas de la trisomie 21. Le profil physique des personnes T21 se décrit chez la majorité des individus par un cou court avec un excès de peau, des mains et des pieds courts et des dermatoglyphes anormaux (Céleste & Lauras, 1997). De plus, un dysmorphisme facial est généralement notable avec une tête petite et ronde, une partie arrière plus plate, un visage également plat avec une racine du nez réduite, un nez court, une bouche souvent entrouverte, des petites dents, une langue et des lèvres épaisses (Roche, 2004 ; Rethoré et al., 2005). Au niveau de la croissance, ils atteignent en moyenne une taille finale à 16 ans pour les femmes et 15 ans pour les hommes, ce qui est plus tôt que la population typique (Arnell, Gustafsson, Ivarsson & Anneren, 1996, 1996 ; Kimura, Tachibana, Imaizumi, Kurosawa & Kuroki, 2003 ; Myreliid, Gustafsson, Ollars & Annerén, 2002). La taille est généralement plus petite avec une moyenne de 146 cm (vs. 164 cm) pour les femmes et de 157 cm (vs. 177 cm) pour les hommes (Royaume-Uni ; McGowan et al., 2012 ; UK Growth Chart 2-18 years, 2013).

Concernant la **motricité globale**, les personnes T21 présentent des difficultés, et ce, tout au long du développement. Dès la naissance, les enfants T21 présentent des caractéristiques posturo-motrices spécifiques (Mazzone, Mugno & Mazzone, 2004). Une hypotonie, caractérisée par un faible tonus musculaire, est très marquée au niveau de leurs muscles dorsaux, abdominaux, buccofaciaux, des pieds, des mains et de la ceinture scapulaire (Guidetti & Tourette, 1999 ; Céleste & Lauras, 1997). Associée à ce trouble, une hyperlaxité ligamentaire apparaît sous forme d'une trop grande souplesse des articulations. L'ensemble de ces troubles physiques pourrait être à l'origine d'un délai dans leur développement moteur. Les travaux visant à étudier les âges d'acquisition du développement moteur chez l'enfant T21 sont peu nombreux et relativement anciens. Le tableau 3 présente ainsi une synthèse de la littérature. Il s'avère que les enfants T21 présentent un retard dans l'acquisition d'aptitudes motrices de base telles que la maintien de la tête, la position debout ou la marche (Lambert & Rondal, 1997 ; Palisano et al., 2001 ;

Tudella, Pereira, Basso & Savelsbergh, 2011). Les différentes étapes du développement sont atteintes par la grande majorité (72-99%) ou seulement la moitié (50%) des enfants T21 aux âges indiqués dans le tableau 3. En avançant dans les étapes du développement, l'écart entre population au DT et population T21 se creuse. Par exemple, un retard de 3 mois est à noter pour la tenue de la tête, alors que la marche est acquise en moyenne avec un retard de 2,5 ans chez l'enfant T21. Cette hausse de l'écart d'âges entre T21 et DT serait due à l'augmentation de la dispersion au fil des étapes du développement psychomoteur. En effet, tout comme dans la population au DT, l'environnement va influencer de plus en plus la trajectoire de chaque individu, engendrant une plus grande variabilité interindividuelle. On note également des différences qualitatives des actions motrices et des postures atypiques, certainement dues à cette diminution du tonus musculaire. A titre d'exemple, les enfants T21 s'assoient souvent les jambes extrêmement écartées, marchent selon une base plus étendue, ou écartent leurs jambes en poussant sur leurs mains pour passer d'une position couchée sur le ventre à une position assise (Lydic & Steele, 1979). Malgré ce retard et la présence de mouvements atypiques, les enfants T21 suivent la même trajectoire de développement psychomoteur en comparaison à un enfant typique (Palisano et al., 2001 ; Tudella, Pereira, Basso & Savelsbergh, 2011).

Tout comme pour la motricité globale, les personnes T21 présentent des difficultés dans la **motricité fine**, c'est-à-dire dans les actions motrices exigeant de la précision. En effet, dans le domaine de la déficience intellectuelle, Wuang et collaborateurs (2008) ont évalué les différents niveaux de motricité dans des activités globales (course, équilibre, coordination bilatérale, force) et les activités fines (contrôle visuo-moteur, dextérité des membres supérieurs, vitesse de réponse). Chez l'enfant avec DI de 7 à 8 ans, les activités de motricité fine engendrent en majorité des performances inférieures à 1,5 écart-type de la moyenne comparativement aux activités de motricité globale. La qualité des gestes de l'enfant T21 est souvent décrite comme moins efficiente tant au niveau du temps de planification et/ou d'exécution du mouvement (Henderson, 1986 ; Block, 1991). La lenteur et la maladresse apparaissent comme les caractéristiques principales de la déficience intellectuelle et sont au centre des troubles ou difficultés (Anson, 1992 ; Davis & Kelso, 1982 ; Latash, 1992). Les mouvements d'atteinte et de saisie d'objet sont alors

Tableau 3. Les grandes étapes du développement psychomoteur chez le jeune enfant au développement typique et l'enfant porteur de trisomie 21.

Étapes du développement psychomoteur	Âge d'apparition moyen chez l'enfant au DT	Âge d'apparition moyen chez l'enfant T21	Références étude T21
Tenue de la tête	2 mois ^a	5 mois	Henderson, 1985 ; Lambert & Rondal, 1997
Station debout avec appui	6 mois ^a	12 mois (50%)	Lambert & Rondal, 1997
Roule sur soi-même	7 mois ^b	5 mois (50%)	Lambert & Rondal, 1997
		8 mois	Henderson, 1985
Tire avec appui pour se redresser	8 mois ^a	12 mois (50%)	Lambert & Rondal, 1997
		15 mois	Henderson, 1985
Tient assis sans appui	9 mois (90%) ^c	8 mois (50%)	Lambert & Rondal, 1997
		9 mois	Henderson, 1985
		15 mois (72%) 24 mois (98%)	Carr, 1970 ; Carr, 1975
		12 mois (78%) 18 mois (99%)	Palisano et al., 2001
Se déplace en rampant	10 mois (87%) ^c	15 mois (37%) 24 mois (93%)	Carr, 1970 ; 1975
		36 mois (84%) 48 mois (96%)	Palisano et al., 2001
		18 mois	Henderson, 1985
Tient debout seul	11 mois ^a	24 mois (50%)	Lambert & Rondal, 1997
		24 mois	Melyn & White, 1973
Marche acquise	17 mois (98%) ^c	28 mois	Carr, 1970
		3 ans (78% ou 82%)	Centerwall & Centerwall, 1960 ; Hall, 1970
		3 ans (92%) 4 ans (99%)	Palisano et al., 2001
Saute en avant	3,5 ans (90%) ^c	5 ans (52%) 6 ans (84%)	Palisano et al., 2001

Note. Lorsque la proportion d'enfants présentant le comportement à l'âge donné est précisée dans l'étude, les pourcentages sont indiqués entre parenthèses. DT : développement typique ; T21 : porteur de trisomie 21 ; ^a : Keogh & Sugden, 1985 ; ^b : Jover, 2000 ; ^c : Lion François & Des Portes, 2004.

décrits comme altérés aussi bien chez le jeune enfant de 3 ans (Kearney & Gentile, 2003) que chez l'enfant de 8 à 10 ans (Charlton, Ihsen & Lavelle, 2000). Différents types de saisies d'objet sont à noter dans la population T21. La prise palmaire semble être plus fréquemment utilisée chez l'enfant T21 que chez les enfants DT (Charlton, Ihsen & Lavelle, 2000 ; Kearney & Gentile, 2003). Cependant, les personnes T21 présentent généralement des mains plutôt courtes, il est donc important de prendre en compte la taille de l'objet par rapport à la taille de la main pour pouvoir comparer une population T21 à une population typique (Savelsbergh, van der Kamp & Davis, 2001). Une étude portant sur les caractéristiques spécifiques lors de prise d'objet auprès d'enfants T21 âgés de 4 à 18 ans a montré qu'en adaptant la taille de l'objet par rapport à la taille de la main, la préférence pour la saisie palmaire disparaissait (Jover, Ayoun, Berton & Carlier, 2010). Les enfants T21 ont alors utilisé significativement moins de doigts que les enfants typiques. Wong et Whishaw (2004) ont établi que plus il y avait de doigts recrutés, plus la prise était stable, ce qui peut laisser supposer que la prise chez les enfants T21 serait moins stable donc moins efficace. De plus, les saisies étaient parfois atypiques (non utilisation de l'index) et les doigts non utilisés étaient le plus souvent en extension. Cette présence de positions atypiques avait déjà été notée par d'autres études (Moss & Hogg, 1981 ; Thombs & Sugden, 1991) avec, entre autre, une saisie à l'aide du dessous des doigts plutôt que du bout des doigts (Charlton, Ihsen & Lavelle, 2000). A l'image du développement postural (Jobling & Mon-Williams, 2000), les travaux sur la motricité manuelle mettent en évidence une variabilité interindividuelle pour les âges d'émergence des comportements d'atteinte (de Campos, Rocha & Savelsbergh, 2010) ainsi qu'une variabilité intraindividuelle avec des variations de position de mains d'un essai à un autre chez un même individu (Charlton, Ihsen & Lavelle, 2000 ; Kearney & Gentile, 2003). Les travaux sur les tâches d'atteinte et/ou de saisie se sont appuyés sur l'analyse cinématique du mouvement afin de décomposer l'ensemble des processus de programmation et d'exécution. Ces recherches mettent ainsi en avant des anomalies cinétiques dans les phases d'approche, de saisie et de transport d'objets (Charlton, Ihsen & Oxley, 1996 ; Kearney & Gentile, 2003 ; Mellier & Elloy, 1998). L'étude de Kearney et Gentile (2003) souligne que les enfants T21 de 3 ans ont tendance à ouvrir la main une fois le contact avec l'objet établi. Une lenteur sur le plan des séquences d'action est observée, ainsi que des défauts dans l'ajustement du mouvement en phase de décélération signalant des difficultés à anticiper et à réguler les mouvements d'atteinte et de saisie sur la base d'informations

visuelles et proprioceptives. En parallèle de l'étude de la saisie manuelle, la motricité fine concerne également la latéralité. Dans la population typique, la majorité des personnes préfèrent manipuler avec la main droite lors de tâches nécessitant de la précision et de l'habileté (Corballis, 2003). Généralement, la latéralité manuelle est atypique dans les populations présentant une déficience intellectuelle (Carlier & Ayoun, 2007). Chez 45 adolescents T21, 17,3% ont une préférence main gauche pour effectuer différentes tâches motrices telles qu'écrire, se brosser les dents ou piocher une carte (Carlier et al., 2006). Ce résultat est légèrement supérieur au groupe contrôle, composé de 81 enfants de 8 ans en moyenne, qui présente un taux de 11,4% de gauchers. La latéralité manuelle a également été étudiée auprès de 32 adolescents et adultes T21 (de 12 à 34 ans) comparativement à un groupe contrôle au DT de même âge chronologique (Carlier et al., 2011). Les résultats révèlent dans le groupe T21 un taux de latéralité mixte (68,8%) supérieur au groupe au DT (27,8%). Cette latéralité mixte correspond ici à l'utilisation indifférenciée de l'une ou l'autre main pour une même activité évaluée à deux temps différents.

Il a été souligné que les personnes T21 présentaient un déficit global des capacités motrices, en particulier dans les activités de motricité fine. Différentes hypothèses sur les **origines du déficit moteur** sont également questionnées dans l'étude de ces difficultés motrices. La première se centre sur le contrôle moteur qui régit les mouvements et qui serait de type rétroactif dans la population T21. Une seconde réflexion repose sur une particularité hémisphérique chez les personnes T21, exposée par le modèle de dissociation hémisphérique. Enfin, des hypothèses supplémentaires seront succinctement présentées afin d'englober les potentielles origines du trouble moteur dans la population T21.

Tout d'abord, la lenteur motrice dont font preuve les personnes T21 correspondrait à un mode de contrôle privilégié d'après l'étude de Charlton, Ihsen et Lavelle (1996). En effet, la lenteur des mouvements s'explique par une phase de décélération plus longue lors de la trajectoire, dévoilant plusieurs unités de mouvement⁸. La lenteur des mouvements est d'autant plus élevée qu'une précision des mouvements est requise (Hodges, Cunningham, Lyons, Kerr & Elliott, 1995). Ainsi, les niveaux de performances pour des tâches de motricité fine telles que l'atteinte et la prise d'objet sont plus faibles que celles lors de tâches motrices globales (de Campos, Rocha & Savelsbergh, 2009 ; Jover, Ayoun, Berton & Carlier, 2010).

⁸ Une unité de mouvement se calcule sur la base des profils de vitesse compris entre une phase d'accélération et de décélération.

L'ensemble de ces études souligne des difficultés d'intégration perceptivo-motrice dès le plus jeune âge en cas de déficience intellectuelle ainsi que leur persistance au cours du développement. Pour Latash (1992), la lenteur décisionnelle et motrice est envisagée comme une stratégie adaptée pour pallier à des déficits au niveau des mécanismes perceptivo-moteurs élémentaires. Les personnes T21 seraient ainsi contraintes à la lenteur du fait de la nécessité d'utiliser leur attention dans la vérification incessante des mouvements qui demeurent désordonnés et peu efficaces. Par conséquent, la difficulté à réguler un déplacement en fonction d'un projet spatial serait due à l'organisation du mouvement dépendante d'un mode de contrôle rétroactif avec *feedback*. Ces difficultés d'autorégulation sont typiques chez les personnes présentant une déficience intellectuelle (Orsini-Bouichou, Hurtig, Paour & Planche, 1990 ; Whitman, 1990 ; Nader-Grosbois, 2007).

L'hémisphère gauche est spécialisé dans l'apprentissage et le contrôle moteur, ainsi que dans la fonction langagière dans la population typique (pour une revue : Chua, Weeks & Elliott, 1996). Dans la population T21, un modèle de dissociation hémisphérique entre ces deux fonctions pourrait être à l'origine de difficultés dans le domaine moteur. La figure 2 illustre les transferts hémisphériques d'information dans la population typique et la population T21 d'après ce modèle. Afin de révéler l'altération de l'information chez les personnes T21, le trajet de l'information de l'hémisphère droit vers l'hémisphère gauche est représenté par une flèche en hachuré. Tout comme dans la population typique, l'hémisphère gauche est spécialisé dans l'organisation et le contrôle du mouvement dans la population T21 (pour une revue : Chua, Weeks & Elliott, 1996). En effet, dans une tâche de *tapping*, des adolescents et adultes T21 droitiers sont plus rapides et plus constants dans le temps lorsque la tâche est réalisée avec la main droite (contrôlée par hémisphère gauche) par rapport à la main gauche (hémisphère droit) (Elliott, Weeks & Jones, 1986). De plus, après avoir appris une séquence rapide de mouvements des doigts, Elliott (1985) a noté plus de transferts à l'autre main lorsque l'apprentissage était réalisé avec la main gauche. Ceci serait dû, comme dans la population typique, à une implication des deux hémisphères avec le contrôle du membre par l'hémisphère droit et l'organisation du mouvement par l'hémisphère gauche (Taylor & Heilman, 1980). Le paradigme d'écoute dichotique permet d'examiner de façon non invasive la spécialisation du cerveau pour la perception du langage. Il consiste en la présentation simultanée de deux lettres, mots ou chiffres dans les deux oreilles à l'aide d'un casque. La tâche peut alors être une répétition par le participant de ce

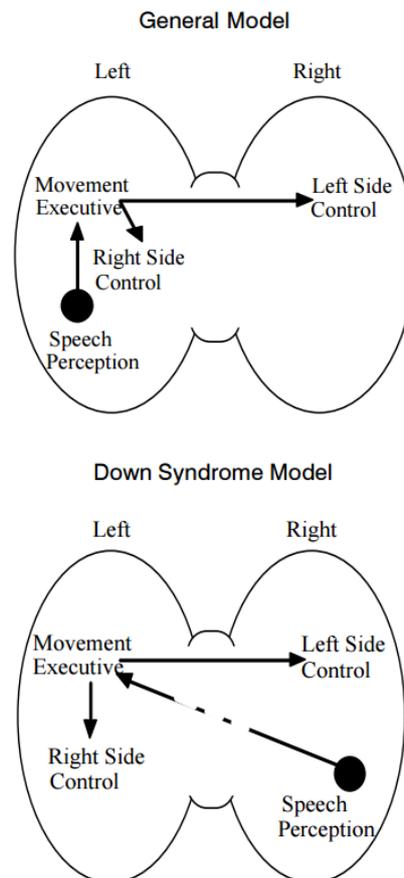


Figure 2. Modèle de l'organisation cérébrale fonctionnelle chez les personnes au développement typique (haut) et chez les personnes T21 (bas). Illustration issue de Chua, Weeks et Elliott (1996).

qui a été entendu, ou bien une écoute sélective par rapport à une oreille ou l'autre. Dans la population typique, enfant et adulte droitiers ont un meilleur rappel pour l'oreille droite, contrôlée par l'hémisphère gauche. Une méta-analyse réalisée par Elliott, Weeks et Chua (1994) a porté sur 19 analyses d'écoute dichotique sur la latéralisation des fonctions langagières chez l'enfant et l'adulte T21. Comparativement à la population au DT et aux autres populations avec DI, la population T21 présenterait une latéralisation atypique de la perception du langage au niveau de l'hémisphère droit engendrant un avantage de l'oreille gauche. Afin d'étudier le lien entre fonctions langagières et fonctions motrices chez les personnes T21, différentes études ont porté sur des tâches verbo-motrices. Dans une étude de Elliott, Weeks et Gray (1990), des adultes T21 réalisent des mouvements individuels ou sous forme de séquence, d'après des instructions verbales (« buzz like a bee », « blow out a match ») ou d'après une démonstration visuelle (taper dans ses mains, mettre le doigt dans son oreille). Les adultes T21 présentent plus de difficulté dans les tâches motrices impliquant la parole par rapport aux activités visuo-motrices. Cette différence s'accentuerait avec la longueur de la séquence de mouvements. Dans la condition verbale, pour contrôler la compréhension et la mémorisation de ces instructions énoncées, les

participants réalisent une tâche supplémentaire où ils doivent pointer l'image qui représente une personne réalisant le mouvement attendu. Aucune différence n'a été relevée entre les adultes T21 et les personnes au DT de même âge de développement pour cette tâche de pointage. D'après les auteurs, les difficultés de cette tâche verbo-motrice se situeraient donc au niveau de la traduction de l'instruction verbale en séquence de mouvements. Cette complexité spécifique au domaine perceptivo-moteur pourrait s'expliquer par un profil atypique au niveau de l'organisation cérébrale (Chua, Weeks & Elliott, 1996). Le modèle de dissociation fonctionnelle a alors été proposé par Chua, Weeks et Elliott (1996) afin d'expliquer cette altération des performances motrices lorsque la perception du langage est sollicitée. Cette fonction langagière serait située dans l'hémisphère droit, distante de la fonction motrice dans l'hémisphère gauche. De plus, la population T21 se caractérise par un développement incomplet du corps calleux (Wang, Doherty, Hesselink, & Bellugi, 1992), partie importante du cerveau permettant la communication inter-hémisphérique.

Les difficultés d'apprentissage dans le domaine moteur ont également été attribuées à d'autres causes, telles qu'une limitation cognitive (Latash & Anson, 1996) ou un usage inefficace des capacités précoces lors des phases d'acquisition et de consolidation des apprentissages (Wishart, 1990). Dans des tâches de motricité fine, le retard développemental ainsi que la variabilité intraindividuelle peuvent également être attribués à d'autres facteurs. Dans le domaine biophysique, la population T21 présente un faible tonus musculaire (Shields & Dodd, 2004), pouvant alors engendrer des difficultés de maintien en équilibre dans une posture (Carvalho & Almeida, 2009 ; Rigoldi, Galli, Mainardi, Crivellini & Albertin, 2011 ; Gomes & Barela, 2007). De plus, une coactivation atypique des muscles antagonistes a pu être relevée dans des positions en équilibre (Carvalho & Almeida, 2009), en faveur de troubles nerveux, voire neurologiques (Moldrich, Dauphinot, Laffaire, Rossier & Potier, 2007) impactant directement le contrôle moteur. Enfin, le système perceptif chez les personnes T21 fait état d'une expérience sensorielle limitée (Uyanik, Bumin & Kayihan, 2003) et d'une intégration sensorimotrice altérée (Vuillerme, Marin & Debû, 2001), pouvant engendrer des difficultés de perception dans les réponses posturales (Elliott & Bunn, 2004 ; Ulrich, Ulrich & Chapman, 1997). Enfin, les personnes T21 ont des difficultés à générer une action motrice mémorisée à court terme, selon une information visuelle ou visuo-spatiale (Pennington, Moon, Edgin, Stedron & Nadel, 2003; pour une revue : Simon, Watson & Elliott,

2005). Un dysfonctionnement de l'hippocampe typique chez cette population pourrait en être à l'origine (Jernigan, Bellugi, Sowell, Doherty & Hesselink, 1993).

Les différentes causes du déficit moteur énumérées ici mettent en évidence le lien entre capacités motrices et capacités cognitives telles que le langage ou la mémoire et soulignent la diversité des facteurs en cause. Après cette synthèse des caractéristiques motrices chez les personnes T21, nous nous intéressons à présent au domaine cognitif marqué par une altération des apprentissages.

2.2. Le développement cognitif

La mémoire à court terme chez les personnes T21 est globalement altérée, en particulier dans le domaine du langage par rapport aux informations visuo-spatiales (Laws, 2002 ; Jarrold, Baddeley & Phillips, 1999 ; Wang & Bellugi, 1994). En comparant des enfants T21 et des enfants atteints du syndrome de Williams (SW), différentes études mettent en avant un meilleur empan⁹ verbal chez les enfants SW et un meilleur empan visuo-spatial chez les enfants T21 (pour une revue : Vicari, 2005). Plus précisément, les « relative strengths » des personnes T21 se situeraient principalement au niveau de la mémoire spatiale séquentielle, correspondant à la mémorisation de l'ordre temporel d'information spatiale (Yang, Connors et Merrill, 2014). Des difficultés dans la mémoire verbale à court terme ont été recensées chez les personnes T21 (Vicari, 2006). Dans des tâches de rappel de chiffres ou de mots, l'empan de mémoire verbale à court terme est réduit en comparaison à des enfants au DT de même âge de développement (pour une revue : Comblain & Thibaut, 2009). De plus, cet empan chez les personnes T21 n'augmente pas avec l'âge chronologique mais son évolution dépendrait plutôt de l'âge de développement. Malgré ces résultats, on note dans la littérature une certaine similarité de fonctionnement de la mémoire verbale à court terme entre personnes T21 et enfants au DT. En effet, chez les adolescents et adultes T21, l'effet de similarité phonologique existe, engendrant un meilleur rappel pour des listes de mots bien distincts (*barre, mur, ville, pouce*) par rapport à des mots phonologiquement proches (*mont, son, pont, rond*), tout comme celui de longueur des mots qui induit un empan plus élevé pour des listes de mots courts par rapport à des mots longs (Broadley, MacDonald & Buckley, 1995 ; Comblain, 1996). La mémoire phonologique à court terme est cependant

⁹ L'empan correspond au nombre maximum d'éléments énumérés par le sujet lors d'un rappel immédiat. Il représente la capacité de stockage dans la mémoire à court terme qui peut être par exemple verbale ou spatiale.

altérée (Comblain, 2001 ; Fidler, Philofsky & Hepburn, 2007 ; Pennington & Bennetto, 1998), en particulier dans le domaine syntaxique plutôt que lexical (Chapman, Seung, Schwartz & Bird, 1998 ; Joffe & Varlokosta, 2007). La mémoire de travail a aussi fait l'objet d'étude au sein de la population T21. Baddeley (1992) propose la notion de mémoire de travail qui comprend des fonctions de maintien temporaire de l'information lors de la réalisation simultanée de différentes tâches. Deux opérations mentales régies par un administrateur central peuvent être alors mobilisées : 1) la boucle phonologique permet le stockage de l'information phonologique et repose sur la répétition subvocale ; 2) le calepin visuo-spatial stocke l'information visuelle et spatiale afin de rendre manipulable une représentation mentale. Concernant la mémoire de travail verbale, Hulme et Mackenzie (1992) ont mis en place une tâche de rappel de séquences verbales phonologiquement similaires ou non et de taille variante auprès d'enfants T21, d'enfants avec DI d'étiologie variée et d'enfants au DT de même âge de développement. Chez les personnes T21, les scores de rappel sont inférieurs à ceux des deux autres groupes. Les auteurs suggèrent que la boucle phonologique ne serait pas autant mobilisée que chez des enfants au DT de même âge de développement. Comblain (2001) souligne l'avantage d'un entraînement à l'utilisation de la stratégie d'autorépétition permettant ainsi d'améliorer les performances de mémoire verbale. Dans l'étude de Vicari, Verucci et Carlesimo (2007), les auteurs se sont intéressés la mémoire de travail dans le domaine visuo-spatial chez 18 adolescents T21 et 18 enfants au DT de même âge de développement. Différents pré-tests ont permis d'évaluer les capacités de perception et de représentation de matériel spatial (position dans l'espace) ou visuel (forme de l'objet). Les adolescents T21 ont des performances spatiales similaires et des performances visuelles inférieures aux enfants au DT. Deux tests ont ensuite été proposés pour explorer les capacités en mémoire de travail basées sur une information spatiale ou visuelle. Dans le premier test, le participant doit reproduire la séquence d'apparition d'une forme géométrique selon différentes positions spatiales. Le deuxième consiste à reproduire l'ordre d'apparition de différentes formes géométriques au centre de l'écran. Les adolescents T21 ont présenté des performances inférieures aux enfants au DT dans les deux tâches. Après ajustement des données selon leur niveau au pré-test de perception visuelle, cette différence intergroupe disparaît. Les auteurs en concluent que les capacités faibles en mémoire de travail sont dues à des capacités altérées dans la perception visuelle.

Au-delà des performances moindres en mémoire à court terme par rapport à la population typique, des difficultés ont été observées dans la mémoire à long terme chez les personnes T21. Dans une étude de Carlesimo, Marotta et Vicari (1997), la mémoire explicite verbale et la mémoire explicite visuo-perceptuelle sont évaluées chez 15 adolescents T21, 15 adolescents au DT de même âge chronologique et 15 enfants de même âge de développement. Diverses tâches sont présentées à l'ensemble des participants, telles que le rappel d'une liste écrite de mots, d'un court récit lu ou d'une figure graphique. Le rappel peut être immédiat ou différé de 15 minutes. Dans l'ensemble des tâches, les performances de mémoire explicite chez les adolescents T21 sont inférieures aux deux autres groupes. Concernant la mémoire implicite, un test d'amorçage est proposé aux trois groupes. L'amorçage implique la récupération non consciente d'une information stockée en mémoire. Cet effet peut être étudié à l'aide d'une amorce présentant une similitude (par exemple, sémantique ou visuelle) avec la cible qui doit être rappelée. Les résultats soulignent une similarité des performances parmi les participants. Cet effet d'amorçage présent aussi bien chez les enfants T21 que chez les enfants au DT est retrouvé dans des tâches visuelle et verbale. Ces résultats confirment une dissociation entre la mémoire explicite à long terme et la mémoire implicite à long terme chez les personnes T21.

Un certain nombre de travaux se sont attachés à étudier les caractéristiques cérébrales des personnes T21, tentant ainsi d'expliquer les difficultés observées sur le plan cognitif par des altérations du système nerveux central. Du point de vue neurobiologique, le profil cognitif chez les personnes T21 peut être associé à un développement atypique de l'encéphale (Lott & Dierssen, 2010 ; Vicari, 2005). Les données *post mortem* indiquent un poids global de l'encéphale plus petit et un cervelet, des lobes frontaux et temporaux de plus petite taille en comparaison à la population typique (Schmidt-Sidor, Wisniewski, Shepard & Sersen, 1990 ; Wisniewski, 1990). Les données en IRM confirment ces résultats mais indiquent également une similarité avec la population au DT au niveau des régions sous-corticales (Bellugi, Lichtenberger, Mills, Galaburda & Korenberg, 1999 ; Pinter, Eliez, Schmitt, Capone & Reiss, 2001). Des altérations cellulaires subsistent dans certaines parties du cerveau (lobes frontal, pariétal, et temporal, cervelet), ce qui expliquerait le déficit d'apprentissage et de mémoire chez les personnes T21 (Hodapp & Dykens, 2001 ; Vicari, 2001). Plus précisément, l'hippocampe présente des altérations microstructurelles et fonctionnelles, ce qui pourrait être corrélé aux déficits dans les tâches nécessitant le

stockage à long terme de la mémoire explicite (Pennington, Moon, Edgin, Stedron & Nadel, 2003) et la mémoire épisodique (Carlesimo, Marotta & Vicari, 1997). Les régions dorsales, siège du traitement spatial, sont relativement préservées par rapport aux régions ventrales impliquées dans le traitement du matériel visuel (Courtney, Ungerleider, Keil & Haxby, 1996 ; Nelson et al., 2000), ce qui pourrait alors induire une meilleure performance en mémoire visuelle d'objet plutôt qu'en mémoire visuo-spatiale (Vicari, 2005). Enfin, des anomalies sont à noter au niveau de structures fronto-cérébelleuses, siège de l'articulation et de la mémoire de travail verbale (Fabbro, Alberti, Gagliardi & Borgatti, 2002), pouvant alors induire les faibles performances dans des tâches linguistiques.

2.3. Le langage oral

Les personnes T21, tout comme les enfants au DT, sont capables d'utiliser diverses fonctions communicatives afin de s'adapter au contexte social et situationnel (pour une revue : Nader Grosbois, 2006). Dans le domaine de la communication non verbale, les enfants T21 présentent de nombreux comportements d'approche envers leurs pairs (Fidler, 2005 ; Freeman & Kasari, 2002 ; Sigman & Ruskin, 1999 ; Zickler, Morrow & Bull, 1998). La majorité des enfants T21 est capable de s'investir dans des relations avec leurs camarades qui peuvent atteindre le statut de réelle amitié (Freeman & Kasari, 2002). A partir d'observations directes, il a été montré que l'enfant T21 de moins de 5 ans avait tendance à sourire plus fréquemment que les enfants tout-venants (Kasari, Mundy, Yirmiya & Sigman, 1990 ; Kneips, Walden & Baxter, 1994). Cette habileté à communiquer une émotion positive faciliterait les interactions sociales (Messinger, Fogel & Dickson, 2001). Les personnes T21 présentent des aptitudes d'adaptation sociale relativement préservées, ce qui représente un réel avantage pour leur inclusion scolaire.

Concernant le langage oral chez les personnes T21, la revue de questions par Comblain et Thibaut (2009) fait état d'un développement ralenti mais similaire à la population typique. Pour le développement lexical, les premiers mots sont acquis tardivement¹⁰ à un âge moyen compris entre 20 et 24 mois. L'explosion lexicale prend place entre 2 et 4 ans (Chapman & Hesketh, 2000). La taille du vocabulaire acquis dépendrait à la fois de l'âge chronologique et de l'âge de développement. Une grande majorité des enfants

¹⁰ Dans la population typique, l'âge moyen d'apparition des premiers mots est estimé entre 11 et 13 mois (Pitrou & Thibault, 2012) et l'explosion lexicale a lieu aux alentours de 16 à 19 mois (Poulin-Dubois et Graham, 1994).

T21 (65%) présente un niveau de vocabulaire inférieur aux enfants typiques bien que chez certains (35%), la vitesse d'acquisition est similaire à celle des enfants typiques (Miller, 1999). Malgré un retard général, l'acquisition du vocabulaire chez les enfants T21 suit les mêmes étapes comparativement à la population typique : les noms d'objet, puis les mots sociaux, et les mots relationnels. La catégorisation d'objets et l'inclusion d'un nouvel objet dans une catégorie préétablie selon un référent sont des processus conceptuels présents aussi bien chez l'enfant T21 que chez l'enfant typique. Des difficultés sont observées au niveau du développement articulatoire, ce qui peut s'expliquer en partie par le développement atypique des cordes vocales, de la cavité buccale, du palais et du tonus musculaire chez les personnes T21 (pour une revue : Daunhaueur & Fidler, 2011). Entre langage oral et langage écrit, des difficultés de compréhension sont présentes chez les enfants T21 (Comblain & Thibaut, 2009). En effet, la compréhension du langage oral limiterait le développement de la compréhension du langage écrit. Courbois et Paour (2007) préconisent alors de développer au plus tôt ces compétences de communication en faisant intervenir leurs capacités dans le domaine visuel (langage signé et lecture) pour compenser leurs déficits langagiers. Pour le développement de la morpho-syntaxe, Comblain et Thibaut (2009) font état d'une maîtrise du langage oral chez l'enfant et l'adulte T21 mais à un niveau moindre par rapport à la population typique. Les aspects syntaxiques sont mieux appréhendés que les aspects de morphologie grammaticale. L'ordre des mots dans la construction d'une phrase est maîtrisé mais les phrases sont généralement plus courtes et moins complexes par rapport aux enfants typiques. Les articles définis ou indéfinis et les morphèmes grammaticaux tels que l'accord au féminin ou au pluriel sont parfois omis. Lors d'une tâche de répétition, les performances d'imitation s'améliorent avec l'âge mais plafonnent lorsque la complexité des énoncés à répéter est supérieure à celle des énoncés produits spontanément. Le langage pragmatique fait référence à l'utilisation du langage en contexte social dans l'intention de communiquer. Chez les enfants T21, les capacités dans le langage pragmatique sont relativement préservées tels que demander un objet hors de portée. De plus, le nombre d'interactions sur un même sujet entre l'enfant T21 et sa mère est similaire au nombre d'échanges avec un enfant typique de même âge de développement et de communication (pour une revue : Roberts, Price & Malkin, 2007). Les enfants T21 présentent une capacité à maintenir le sujet de la conversation et à l'utilisation de réponses, commentaires ou protestations d'un niveau comparable voire supérieur à celui d'enfants typiques appariés selon le niveau de langage. D'un point de vue général, les personnes T21

présentent relativement préservé malgré un développement un langage oral ralenti et limité en termes de performances.

Aujourd'hui, de nombreux travaux s'accordent à reconnaître un phénotype spécifique à la trisomie 21. Il se caractérise par un déficit cognitif et langagier comparativement à des capacités d'adaptation sociale et de traitement d'information visuospatiale relativement préservées. Ces altérations laissent supposer des difficultés au niveau des apprentissages scolaires. Compte tenu de la problématique ce travail de thèse, nous nous intéresserons particulièrement à l'apprentissage du langage écrit.

3. L'inclusion et les apprentissages scolaires

Suite au traité d'Amsterdam (1997) et à la Charte des droits fondamentaux de l'UE (2000) interdisant toute discrimination fondée sur le handicap, ainsi qu'à la déclaration de Montréal sur la déficience intellectuelle (6 octobre 2004), la France a adopté la loi de 2005 (n°2005-102). Cette loi pour l'égalité des droits et des chances, la participation et la citoyenneté des personnes handicapées renforce, entre autre, l'accessibilité à la scolarité et à l'insertion professionnelle (Art. 19-40). Depuis, l'école française tend vers une politique inclusive, accueillant de plus en plus d'élèves en situation de handicap dont le nombre d'inscrits en milieu ordinaire¹¹ augmente de 6,6% par an¹². A la rentrée 2015-2016, plus de 260 000 enfants en situation de handicap sont scolarisés dans le premier et le second degré. Parmi ces élèves en scolarisation individuelle ou collective, les handicaps les plus fréquents sont : les troubles intellectuels et cognitifs (41%), les troubles du psychisme (19%) et les troubles du langage et de la parole (16%) (DEPP, 2015). Les critères présentés par l'Education Nationale ne précisent pas le type de syndrome ni la fréquence des groupes de populations d'élèves suivis.

3.1. Le niveau scolaire dans la trisomie 21

En France, aucune d'étude n'a porté sur le niveau scolaire général des élèves T21. Nous pouvons cependant nous appuyer sur une étude longitudinale réalisée au Royaume-

¹¹ La scolarisation en milieu ordinaire correspond à la scolarisation individuelle en classe ordinaire et à la scolarisation collective en ULIS (Unités Localisées pour l'Inclusion Scolaire).

¹² Le taux d'augmentation de nombre d'élèves scolarisés en milieu ordinaire est calculé à partir du nombre d'enfants en situation de handicap scolarisés en premier et second degré entre 2006 et 2014 d'après Repères Et Références Statistiques de la DEPP (2014 ; 2015).

Uni entre 1986 et 2000 et synthétisée par Turner et Alborz (2003). L'objectif était de suivre une cohorte (n=106) d'enfants T21 jusqu'à la fin de leur scolarisation afin d'estimer l'évolution de leurs compétences scolaires. La scolarisation des élèves T21 de l'étude s'est faite entre 1986 et 2000 en école spécialisée pour 79-80% d'entre eux ou en école classique (15-18%). Un score composite (Academic Attainments Index), conçu spécialement pour les élèves T21, porte sur les premières capacités scolaires (Sloper, Cunningham, Turner & Knussen, 1990). Il est calculé à partir de 17 items pour la lecture, 19 pour l'écriture et 22 pour le calcul, évalués par l'enseignant référent, sinon par les parents. Par comparaison aux capacités ciblées par le programme scolaire du Royaume-Uni (National Curriculum), les auteurs ont pu établir une estimation du niveau scolaire des élèves T21. A la fin de leur scolarité (à l'âge de 18-19 ans en majorité), 75% des personnes T21 ont atteint le niveau scolaire d'un enfant de 5 ans. Ceci correspond aux items « reconnaître visuellement 25 mots », « écrire indépendamment le nom et le prénom », et « nommer les chiffres de 0 à 9 ». De plus, 50% d'entre eux atteignent le niveau d'un enfant de 7 ans (« construire des mots simples à l'aide du son des lettres », « écrire une phrase simple de 4 mots ou plus », « additionner des chiffres écrits jusqu'à 10 à l'aide de matériel ») et 25 % celui d'un enfant de 11 ans (« lire et suivre une ligne d'instructions », « écrire une courte lettre personnelle », « additionner deux nombres jusqu'à 20 sans matériel »). A partir de ces résultats, les auteurs ont ensuite réalisé une seconde étude portant sur les facteurs prédictifs des compétences scolaires (Turner, Alborz & Gayle, 2008). Les données sont issues de questionnaires et d'entretiens avec les tuteurs et les parents. Chez l'élève T21, le niveau scolaire dépend de l'âge de développement pour l'enfant et l'adolescent, puis de l'âge chronologique pour le jeune adulte. Les capacités attentionnelles sont également un facteur prédictif du score AAI. Outre une influence de la sévérité des altérations cognitives de l'élève T21, l'environnement familial a également un impact. Les compétences scolaires seront alors meilleures si les parents présentent une bonne capacité à interpréter (*locus* de contrôle interne chez le père) et à réagir face à une situation stressante (stratégie de *coping* chez la mère). Enfin, le fait d'être scolarisé en milieu ordinaire engendre un niveau des élèves T21 supérieur à ceux scolarisés en milieu spécialisé, et ce, tout au long de la scolarité (entre 9 et 21 ans). Compte tenu de notre problématique portant sur l'écriture, nous allons nous questionner plus en détails sur les capacités des personnes T21 dans le domaine du langage écrit.

3.2. La lecture et la production écrite

Les aptitudes à comprendre et utiliser l'information écrite jouent un rôle décisif sur les opportunités d'activités à l'école, à la maison, au travail ou encore au sein de la collectivité. D'une part, la lecture repose sur le décodage et la compréhension du langage écrit. D'autre part, la production écrite consiste à former et à exprimer des idées à l'écrit.

Dans le domaine de la lecture, on dénombre peu de travaux réalisés dans la population T21 (pour une revue : Comblain & Thibaut, 2009). Une enquête exploratoire menée auprès de parents a porté sur leurs priorités éducatives et les capacités de leur enfant T21 dans le domaine de l'écrit (Trenholm & Miranda, 2006). Entre 5 et 9 ans, 29% des enfants T21 sont capables de reconnaître des lettres et, chez 27% d'entre eux, la lecture d'un simple texte serait acquise. Entre 9 et 13 ans, le niveau de lecture d'un enfant typique de 6-8 ans est atteint chez 29% d'entre eux. Les adolescents T21 de 13 à 19 ans parviennent en partie (29%) à un niveau de lecture d'un enfant de 8-10 ans. Chez l'adulte de 19 à 41 ans, presque la moitié (47%) atteint ce niveau de lecture et certains vont le dépasser jusqu'à celui d'un adolescent typique de 10-12 ans (15%) voire de 12-14 ans (6%). La revue de questions de Kay-Raining Bird et Chapman (2011) confirme que les individus T21 sont bel et bien capables de lire. Les scores obtenus aux échelles de développement global, non verbal ou en vocabulaire réceptif sont inférieurs à ceux obtenus en décodage de mots. La lecture est une activité complexe qui nécessite l'acquisition d'une conscience syllabique et d'une conscience phonologique. Elles représentent la capacité d'identifier les composantes respectivement syllabiques (l'unité d'articulation qui découpe un mot) et phonologiques (la plus petite unité sonore composée d'une ou deux lettres) des unités linguistiques. Lors de l'apprentissage du langage, les enfants T21 présentent généralement une faible conscience phonologique (Lemons & Fuchs, 2010 ; Næss, Melby-Lervåg, Hulme & Lyster, 2012). Chez les enfants T21, la compétence métaphonologique, qui permet de manipuler les phonèmes de façon volontaire, est bien inférieure à celle d'enfants typiques appariés selon leur niveau de lecture (Gombert, 2002). De plus, il existe une variabilité du niveau d'habileté selon le type d'épreuves métaphonologiques, les enfants T21 ayant de meilleures performances pour détecter le phonème initial que pour identifier la rime. Concernant les stratégies cognitives engagées dans une activité de lecture chez les enfants T21, une stratégie logographique serait dominante et engendrerait des erreurs visuelles et sémantiques (Buckley, Birds & Byrne, 1996). Cette stratégie repose sur une lecture holistique ou globale

du mot en se basant sur sa longueur, sa forme ou la première lettre. Contrairement aux enfants typiques, les enfants T21 éprouvent ensuite plus de difficultés lors de l'application des règles de correspondance entre graphème et phonème (Gombert, 2002). Selon Kay-Raining Bird et Chapman (2011), le meilleur prédicteur du niveau de lecture serait l'âge de développement. De plus, les performances en décodage de mots dépendraient de plusieurs facteurs tels que l'âge chronologique avec une augmentation du niveau de lecture au cours de l'adolescence puis un phénomène de ralentissement à l'âge adulte. L'environnement familial tel que le statut socio-économique impacterait également. A ce jour, une seule étude de cas s'est intéressée à l'effet d'une exploration auditive et haptique sur la reconnaissance des lettres chez l'enfant T21 (Labat, Ecalle & Magnan, 2013). L'enfant âgé de 7 ans a été apparié à un groupe de 7 enfants au DT (3 ans en moyenne) d'après son niveau d'intelligence non verbale, de reconnaissance visuelle de lettres et de connaissance du son des lettres. L'entraînement était composé de 4 séances : 1) identification de la lettre cible avec exploration haptique avec et sans vision et correspondance lettre-son ; 2) exercice phonologique ciblé sur la segmentation phonologique ; 3) exercice sensoriel avec plusieurs explorations haptiques en absence de vision. Chez l'enfant T21, l'intervention engendre une meilleure reconnaissance haptique des lettres mais les performances de reconnaissance visuelle ou auditive ne s'améliorent pas. D'après les auteurs, le transfert inter-modal nécessaire à la reconnaissance de la lettre dans une modalité différente de l'entraînement semble être altéré chez les enfants T21.

Dans le domaine de la production écrite, Kay-Raining Bird, Cleave, White, Pike et Helmkey (2008) se sont intéressés à la comparaison entre capacités de narration écrites et orales chez l'enfant et l'adolescent T21. Les différentes narrations de 21 élèves T21 âgés entre 6 et 19 ans et 17 enfants au DT appariés selon le niveau de lecture ont été produites à partir de séquences d'images. Dans les deux groupes, la narration orale est plus longue et plus complexe que la narration écrite. Une similarité inter-groupe a été mise en évidence pour la complexité linguistique, la structure narrative, l'orthographe et la ponctuation. Les enfants et adolescents T21 présentent des performances inférieures au groupe typique pour la longueur narrative écrite et orale. Les capacités narratives ne dépendraient pas de l'âge chronologique, mais du niveau de compréhension du vocabulaire chez les personnes avec T21. Une récente étude de Varuzza, De Rose, Vicari et Menghini (2015) s'est intéressée aux habiletés de langage écrit dans trois groupes : 12 enfants et adultes T21 âgés de 7 à 31 ans

(âge de développement : 5 à 8 ans), 13 adolescents et adultes avec syndrome de Williams (SW) âgés de 13 à 29 ans (âge de développement : 5 à 10 ans) et 11 enfants au DT de même âge de développement (6-7 ans). Une tâche de composition de texte est proposée aux trois groupes dans laquelle les participants doivent produire une narration écrite à partir de 6 séquences d'images différentes. Avant d'écrire, le participant explique à l'oral l'histoire afin de contrôler sa capacité à décrire les séquences. Les résultats indiquent une similarité entre les trois groupes au niveau du nombre de mots par séquence, du nombre d'erreurs et de la nature des erreurs majoritairement orthographiques plutôt que syntaxiques. Afin d'évaluer la qualité de la narration, la présence de lien logique entre chaque phrase a été étudiée et révèle des performances inférieures chez les personnes T21 (42% de liens logiques) par rapport aux personnes SW (92%) et aux enfants au DT (100%). Les auteurs interprètent ces résultats comme la conséquence d'un profil cognitif spécifique à la population T21.

Après avoir caractérisé le phénotype de la trisomie 21 et de la déficience intellectuelle de niveau modéré qui l'accompagne, nous avons pu pointer plus précisément la présence d'altérations dans le développement moteur et cognitif. Plus précisément, les mouvements sont soumis à un contrôle rétroactif qui engendre une lenteur et un manque de précision dans les gestes. Dans le domaine cognitif, les apprentissages et la mémoire sont altérés, en particulier pour le langage comparativement aux capacités visuo-spatiales. De façon générale, ces caractéristiques comportementales engendrent des difficultés dans les compétences scolaires et notamment dans la lecture et la production écrite. Or, à l'heure d'une politique inclusive en France, les capacités dans le domaine de l'écrit chez les personnes présentant un handicap tel que la trisomie 21 devraient être davantage étudiées, en particulier au niveau de l'analyse de l'exécution des mouvements afin de rendre compte des processus impliqués dans le geste graphomoteur. Dans cette perspective, nous nous intéressons au chapitre suivant à l'écriture en tant que capacité graphomotrice et à son apprentissage dans la population typique.

Chapitre 2 - L'écriture manuscrite

Ce second chapitre a pour objectif de présenter les données de la littérature dans le domaine de l'écriture, problématique centrale de ce travail de thèse. Dans un premier temps, nous nous interrogerons sur l'importance de l'usage de l'écriture dans le cursus scolaire et de son rôle sur la production écrite. Dans un second temps, l'étude de l'écriture sera développée à partir de travaux relatifs à la maîtrise du geste graphomoteur, à l'apprentissage moteur ainsi qu'aux modèles permettant de mieux comprendre les processus en jeu dans l'écriture. Puis, seront détaillés les facteurs propres à l'individu influençant les performances d'écriture tels que l'âge, le genre ou les capacités perceptivo-motrices ainsi que les facteurs contextuels se rapportant aux pratiques d'enseignement. Enfin, les difficultés d'écriture seront présentées chez l'enfant tout venant, chez l'enfant avec des troubles neuro-développementaux puis, pour finir, chez les enfants et adultes porteurs de T21.

1. L'intérêt d'étudier l'écriture

L'écriture manuscrite fait intervenir de nombreux processus, tels que moteurs, biophysiques, cognitifs, linguistiques et culturels (Bonney, 1992 ; van Galen, 1991 ; Viviani, 1994 ; Zesiger, 1995). C'est par cette complexité qu'elle nécessite de nombreuses années d'apprentissage. Malgré le fait que les nouvelles technologies se répandent de plus en plus dans notre quotidien, l'usage de l'écriture manuscrite reste constant dans le cadre scolaire et, à ce titre, mérite toute l'attention des chercheurs en tant qu'objet d'étude.

1.1. Une activité quotidienne dans le cadre scolaire

L'écriture manuscrite est enseignée sur les bancs de l'école depuis la fin du XIX^{ème} siècle mais l'écriture tapuscrite, définie comme la production de texte électronique saisi à l'aide d'un clavier, permettrait à l'enfant de se concentrer davantage sur le contenu plutôt que sur la forme (pour une revue : Dinehart, 2015). Depuis le début des années 1990, l'utilisation de l'ordinateur et du traitement de texte a connu une réelle envolée dans le domaine professionnel, privé et également scolaire. L'International Society for Technology

in Education (2007) suggère que l'enfant devrait être formé à l'utilisation technologique dès l'âge de 5 ans. L'association Handwriting Without Tears® rejoint ces propos en défendant l'idée que l'écriture tapuscrite devrait être introduite à l'école primaire dès le *grade 2* (CE1) pour être ensuite maîtrisée au collège (*grade 6* et plus). Avec l'apport de l'ordinateur à l'école, certaines études ont par la suite comparé écriture manuscrite et écriture tapuscrite (Cahill, 2009). Chez les enfants de 4 à 11 ans, les vitesses d'écriture déterminées soit par le nombre de lettres écrites manuellement soit par le nombre de touches de clavier tapées durant 2 minutes, sont hautement corrélées (Christensen, 2004 ; Connelly, Gee, & Walsh, 2007). Cependant, sans entraînement spécifique à l'écriture tapuscrite, les élèves de 9 à 11 ans ont tendance à produire des textes plus longs et de meilleure qualité s'ils écrivent à la main comparativement au clavier (Connelly, Gee, & Walsh, 2007 ; Preminger, Weiss & Weintraub, 2004).

En France, dans le cycle des apprentissages premiers correspondant à la petite, moyenne et grande section de maternelle, différentes connaissances et compétences d'écriture sont attendues de la part de l'élève (B.O. spécial n°2 du 26 mars 2015). Ainsi, l'enfant en fin d'école maternelle doit savoir « reconnaître les lettres de l'alphabet et connaître les correspondances entre les trois manières de les écrire (cursive, script, capitales d'imprimerie), copier à l'aide d'un clavier, écrire son prénom en écriture cursive, sans modèle, écrire seul un mot en utilisant des lettres ou groupes de lettres empruntés aux mots connus. » A la rentrée 2016-2017, un nouveau programme d'enseignement de l'école élémentaire et du collège entrera en vigueur en France. Dans le bulletin officiel de l'éducation nationale (B.O. spécial n°11 du 26 novembre 2015), l'élève à la fin du cycle des apprentissages fondamentaux (cycle 2, du CP au CE2), l'élève doit savoir « copier ou transcrire, dans une écriture lisible, un texte d'une dizaine de lignes en respectant la ponctuation, l'orthographe et en soignant la présentation ; rédiger un texte d'environ une demi-page, cohérent, organisé, ponctué, pertinent par rapport à la visée et au destinataire ; améliorer une production, notamment l'orthographe, en tenant compte d'indications. » A la fin du cycle de consolidation (cycle 3, du CM1 à la 6^{ème}), l'élève doit être capable « d'écrire un texte d'une à deux pages adapté à son destinataire ; après révision, obtenir un texte organisé et cohérent, à la graphie lisible et respectant les régularités orthographiques étudiées au cours du cycle. » L'écriture manuscrite est une capacité graphomotrice au centre des apprentissages essentiellement au primaire. Dans leur étude, McHale et Cermak (1992)

se sont intéressées à la quantité de temps alloué aux tâches de motricité fine et intégrée dans six classes de *grade 2* (CE1), *grade 4* (CM1) et *grade 6* (6^{ème}) aux Etats-Unis. Les activités de motricité fine, telles que l'écriture, l'utilisation de ciseaux ou d'un clavier d'ordinateur, représentent respectivement 45% (CE1), 31% (CM1) et 60% (6^{ème}) du temps scolaire. De plus, les tâches de motricité fine impliquent en majorité (85%) des activités avec support papier-crayon (copie, dictée, prise de notes, réponse écrite aux questions, production écrite de texte, dessiner). Récemment l'association Handwriting Without Tears® a mené une enquête auprès de 459 écoliers américains du *kindergarden* (GSM) au *grade 5* (CM2) entre juin et août 2013 (Handwriting Without Tears®, 2014). Il s'avère que 24 à 58% de leurs temps scolaire est toujours dédié quotidiennement à des tâches d'écriture manuscrite tandis qu'ils passent entre 15 et 22% de leurs temps sur divers supports numériques (tablette, ordinateur, tableau interactif). Malgré l'essor des nouvelles technologies, l'écriture manuscrite est, à ce jour, encore présente à l'école. Bien que nous ne disposons pas de données de ce type en France, nous pouvons supposer, au regard de la relative similarité de nos systèmes éducatifs, que les situations soient analogues entre nos deux pays. L'écriture manuscrite ne se limite pas au contexte scolaire, elle est également une compétence requise à l'âge adulte. En effet, elle représente dans notre société un moyen de communication et une aptitude nécessaire, par exemple, pour écrire un courrier administratif ou une carte postale, noter une adresse ou un numéro de téléphone, remplir un chèque ou un formulaire de candidature. Par ailleurs, dans un souci d'environnement plus intégré et omniprésent dans notre quotidien, les fabricants de téléphone portable et de tablette proposent des logiciels de reconnaissance de l'écriture manuscrite.

1.2. L'écriture parmi les apprentissages scolaires

Si la transcription graphique demande peu d'effort pour le scripteur expert, il n'en est pas de même pour l'enfant. Les travaux initiés par Berninger et collaborateurs (pour une revue : Berninger, 2009) ont mis en évidence le coût cognitif important que représente la transcription graphique pour l'enfant ainsi que son interférence avec les processus de construction et de génération de textes écrits. En effet, l'écriture mobilise d'importantes ressources attentionnelles de traitement chez l'enfant, en particulier lors des débuts de l'apprentissage (Bourdin & Fayol, 2000). Pour produire des textes écrits créatifs et correctement structurés, il est nécessaire de maîtriser en amont le geste graphomoteur (Berninger et al., 2002 ; Bourdin, Cogis & Foulin, 2010 ; Christensen, 2005 ; Medwell & Wray,

2008). Au début de l'école primaire, les enfants consacrent la majorité des ressources attentionnelles à gérer les aspects orthographiques et graphomoteurs de l'écriture. En début d'apprentissage, l'enfant a tendance à oublier ses idées avant de pouvoir les écrire altérant ainsi la qualité de sa production de texte (Graham & Weintraub, 1996). Une fois les scripteurs devenus experts, ils parviennent à se concentrer sur les caractéristiques de production de texte, telles que la génération d'idées, le choix des mots, la gestion des activités cognitives ou l'édition de texte (Bara & Gentaz, 2006 ; Medwell & Wray, 2008 ; Vinter & Zesiger, 2008). Le coût de cette charge cognitive a notamment été mis en évidence au travers de comparaisons entre la qualité des productions selon deux modalités d'expression, orale ou écrite. Il s'avère que les enfants (10 à 12 ans) qui dictent produisent une narration plus longue, avec moins d'erreurs grammaticales et de meilleure qualité comparativement aux enfants qui écrivent manuellement (De La Paz & Graham, 1997 ; Graham, 1990). De plus, le rappel d'information est meilleur à l'oral qu'à l'écrit, et ce, exclusivement chez les enfants (Bourdin & Fayol, 1994 ; 2000). Ces différences de performances de l'écrit par rapport à l'oral sont dues au coût cognitif que représente la gestion des processus graphomoteurs. Par ailleurs, certains auteurs (Graham, Harris & Fink, 2000 ; Jones & Christensen, 1999) ont pu observer qu'un entraînement de l'écriture centré sur la qualité et la fluidité de tracé chez des enfants de 6-7 ans améliorerait la qualité de leurs productions de texte. L'écriture impacte d'autres types d'apprentissages scolaires comme, par exemple, la lecture, la dictée ou même les mathématiques. Les travaux de Longcamp et collaborateurs (Longcamp, Zerbato-Poudou & Velay, 2005 ; Longcamp et al., 2006 ; 2008) ont pu montrer que la discrimination de caractères écrits chez l'enfant de 4 ans est meilleure si les lettres ont été apprises en les écrivant manuellement par rapport à un entraînement à l'aide d'un clavier. En effet, la perception et l'action seraient reliées grâce aux neurones miroirs (Chao & Martin, 2000). Ainsi, la présentation visuelle d'instruments ou d'objets saisissables (par exemple, des ciseaux ou une tasse) activerait une zone du cortex prémoteur sans qu'aucune réponse motrice ne soit requise. A la vision de la lettre et lors de son écriture, la même zone du cortex prémoteur gauche est activée, favorisant ainsi un meilleur modèle interne de la lettre (Longcamp, Anton, Roth & Velay, 2003). Fayol et Miret (2005) se sont intéressés au lien entre graphisme, orthographe et lecture chez 77 enfants de CE2, dont 22 étaient faibles en graphisme et 19 bons en graphisme (évaluation réalisée à partir du nombre de lettres de l'alphabet correctement retranscrites de mémoire). En comparant les groupes, les enfants faibles en graphisme présentent un niveau en dictée et en lecture

inférieur à celui des enfants bons en graphisme. Dans l'étude de Dinehart et Manfra (2013), 3234 enfants ont été suivis avant l'entrée au primaire et au CE1. Le graphisme est évalué à la fin de la maternelle au travers d'une série de tâches : imitation de traits, copie de lettres, nombres et formes et dessin d'objets. Il s'avère que le niveau en graphisme est prédicteur des scores obtenus aux évaluations en mathématiques et en lecture en fin de CE1.

1.3. Les différents types d'évaluation de l'écriture

En vue d'évaluer le niveau d'écriture, différentes approches ont été rapportées dans la littérature. Parmi les plus anciennes, l'évaluation globale et l'évaluation analytique s'effectuent grâce à une tâche classique papier/crayon au cours de dictée ou de copie de texte. Avec l'apport des outils numériques, l'évaluation de l'écriture peut également se faire en cours d'exécution en analysant les mouvements d'écriture permettant ainsi d'étudier les processus cognitifs sous-jacents.

Dès les années 1910, certains travaux dans le domaine de la psychologie portaient sur l'évaluation de l'écriture (pour une revue : Rosenblum, Weiss & Parush, 2003). Elle était évaluée essentiellement selon la lisibilité du produit final qui pouvait prendre la forme de mot, phrase, paragraphe ou texte. Cette **évaluation globale** de la lisibilité consiste à comparer l'écriture à un ensemble d'extraits standards notés selon leur lisibilité. Le correcteur doit alors attribuer une note d'après les modèles à disposition. Parmi ces tests d'évaluation globale, l'échelle du Wisconsin (Herrick & Elebacher, 1963) fournit plus de 200 modèles variant selon la taille des lettres, l'inclinaison et la lisibilité. Au regard du nombre important de modèles à comparer à la production, ce test ainsi que d'autres tels que le TOLH (Test of Legible Handwriting ; Larsen & Hammill, 1989) ou le ETCH (Evaluation Tool of Children's Handwriting ; Amundson, 1995) nécessitent un entraînement préliminaire du correcteur. L'évaluation ne se base sur aucun critère pré-défini, elle dépend alors de chaque correcteur. Compte tenu de sa subjectivité et de son coût en termes de temps, l'évaluation globale présente un aspect pratique limité (Rosenblum, Weiss & Parush, 2003).

Afin de contrer cette difficulté liée au protocole méthodologique, divers tests d'**évaluation analytique** de la lisibilité avec des critères prédéterminés ont vu le jour dans les années 1980 (pour une revue : Rosenblum, Weiss & Parush, 2003). Ce type d'évaluation présuppose l'existence d'une relation entre la lisibilité de l'écrit et la qualité de

caractéristiques spécifiques, telles que la taille des lettres (hauteur, largeur), l'inclinaison, l'espace (entre lettres, entre mots), le degré de rectitude de la ligne, ou la forme de la lettre. L'écriture est alors jugée par une notation individuelle de chacune des caractéristiques pour obtenir un score global. Par exemple, le CHES (Children Handwriting Evaluation Scale ; Phelps, Stempel & Speck, 1985) porte sur l'évaluation de la qualité et vitesse d'écriture lors d'une tâche de copie de texte chez des enfants de 8 à 13 ans. La vitesse d'écriture correspond au nombre de lettres copiées en 2 minutes, valeur ensuite rapportée à un tableau de normes selon l'âge ; le correcteur obtient alors un score compris sur une échelle à 5 points. De même, la qualité d'écriture équivaut à un score maximum de 5 points portant, pour chaque point, sur la forme, l'inclinaison, le rythme, l'espace et l'apparence générale du texte. La fiabilité de l'échelle du CHES a été validée à partir de 150 productions écrites. Un autre exemple de test analytique est celui du DRHP (Diagnosis and Remediation of Handwriting Problems ; Stott, Moyes & Henderson, 1984) qui s'intéresse à la fois aux difficultés d'écriture liées à l'apprentissage des normes calligraphiques (espace, forme), au défaut de contrôle perceptivo-moteur (taille, inclinaison) et de la tenue du stylo, et à la position d'écriture par observation directe. Les instructions à l'intention du correcteur ont cependant été jugées trop imprécises car aucune étude ne présente une norme pour les scores et aucune validité n'a été répertoriée (Rosenblum, Weiss & Parush, 2003). Hors du cadre du système d'écriture latin, le HHE (Hebrew Handwriting Evaluation ; Erez, Yoshman & Parush, 1996, 1999) permet l'évaluation analytique d'écriture de l'hébreu. Trois tâches sont proposées : copie des lettres de l'alphabet hébreu, copie d'une courte histoire de 30 mots, écriture sous dictée. Trois facteurs sont évalués : vitesse d'écriture, qualité d'écriture (forme de la lettre et organisation spatiale), facteurs ergonomiques (pression, tenue du stylo, maintien de la prise, position du corps, position de la feuille, stabilisation). Mise à part la vitesse estimée par le nombre de caractères écrits en 1 minute, l'ensemble de ces facteurs sont évalués selon des échelles notées de 1 à 4. L'échelle du BHK (Beknopte Beoordelingsmethode voor Kinderhandschriften ; Hamstra-Bletz, DeBie & Den Brinker, 1987) se distingue par la quantité des recherches portant sur ses propriétés psychométriques et par son utilisation auprès de diverses populations typiques et pathologiques. Ce test consiste en la copie d'un texte durant 5 minutes sur une feuille blanche. Au total, treize critères composent le score composite de qualité : écriture grande, inclinaison de la marge vers la droite, lignes non planes, mots serrés, écriture chaotique, liens interrompus entre les lettres, télescopes, variations dans la hauteur des lettres troncs, hauteur relative incorrecte des différentes

sortes de lettres, distorsion des lettres, formes de lettres ambiguës, lettres retouchées, et mauvaise trace écrite, hésitations et tremblements. D'après une analyse factorielle des items du BHK réalisés par 182 enfants typiques âgés de 8 à 11 ans, il est possible de classer les critères selon 4 groupes factoriels (Sage, 2010). Le tableau 4 présente ainsi parmi les 13 critères : 4 critères portant sur l'organisation spatiale des lettres dans l'espace feuille, 3 critères sur l'organisation spatiale des lettres dans le mot, 3 critères sur la forme et la constance des lettres et 3 critères sur la réalisation motrice des lettres. Cette classification permet de rendre compte des différentes composantes de l'écriture. Ainsi, le score composite portera sur l'organisation spatiale des tracés dans la feuille et dans le mot (composantes topocinétiques), ainsi que sur la forme, la constance et la réalisation motrice des lettres (composantes morphocinétiques). La vitesse d'écriture est mesurée en comptabilisant le nombre de caractères écrits au cours des 5 minutes. La version française du test BHK (Charles, Soppelsa & Albaret, 2003) a été validée en se basant sur une population d'étalonnage composée de 837 enfants de 6 à 11 ans. La fidélité intercorrecteur est élevée (entre .71 et .89), ainsi que la fidélité test-retest qui est comprise entre 80 et 92%.

Tableau 4. Facteurs qualitatifs des 13 critères du BHK, d'après Sage (2010).

Facteurs qualitatifs	Critère du BHK
Organisation spatiale des lettres dans l'espace feuille	Lignes non planes
	Lettres retouchées
	Inclinaison de la marge vers la droite
	Liens interrompus entre les lettres
Organisation spatiale des lettres dans le mot	Mots serrés
	Hauteur relative incorrecte des différentes sortes de lettres
	Télescopages
Forme et constance des lettres	Formes de lettres ambiguës
	Variations dans la hauteur des lettres troncs
	Distorsion des lettres
Réalisation motrice des lettres	Mauvaise trace écrite, hésitations et tremblements
	Ecriture grande
	Ecriture chaotique

Chacun de ces tests permet d'établir un score composite en évaluant la production d'après différents critères. Cette décomposition de l'écriture engendre une absence de perspective globale telle que proposée par l'évaluation globale. De plus, une trop grande

variation des critères d'un test à l'autre rend difficile leurs comparaisons (Bonney, 1992 ; Graham, 1986a, 1986b ; Graham & Weintraub, 1996 ; Rosenblum, Weiss & Parush, 2003 ; Rubin & Henderson, 1982). Aucune de ces échelles, globales ou analytiques, réalisées sur papier ne donne d'informations sur le traitement de l'écriture. Seule une description des caractéristiques dynamiques en temps réel peut offrir un aperçu des mécanismes du contrôle moteur au cours de l'écriture (Dobbie & Askov, 1995 ; Graham & Weintraub, 1996 ; Longstaff & Health, 1997 ; Sjøvik, Arntzen & Thygesen, 1987a, 1987b).

Suite à l'explosion technologique au cours des années 1990, un autre type d'évaluation de l'écriture a pu voir le jour, celle des **analyses numériques** (Rosenblum, Weiss & Parush, 2003). Son principe se base sur l'utilisation d'une tablette numérique, c'est-à-dire une surface électronique capable d'enregistrer les coordonnées spatiales du stylo en cours de production. L'objectif est d'acquérir et d'analyser l'écriture selon des données spatio-temporelles pour une meilleure compréhension des processus mis en jeu. A titre d'exemple, Rosenblum, Parush et Weiss (2003a) ont développé un outil d'évaluation nommé le CompPET (Computerized Penmanship Evaluation Tool, ancien POET). Le matériel se compose d'une feuille A4 centrée sur la surface d'une tablette numérique WACOM Intuos, d'un stylo électronique avec pointe sensible à la pression. La saisie des données se fait grâce à un ordinateur portable connecté à la tablette, mesurant les coordonnées x et y et l'inclinaison du stylo à une fréquence de 150 Hz (Rosenblum, Dvorkin & Weiss, 2006). L'analyse des données est incluse dans le logiciel et se réalise en ligne à l'aide du logiciel Matlab. Grâce à ce dispositif, les analyses avec tablette numérique sont de plus en plus fréquentes dans les recherches étudiant l'écriture. Ce type d'analyse permet de situer temporellement et spatialement les difficultés engendrant une altération du tracé. Elles peuvent alors être axées sur l'étude des caractéristiques en termes de mouvement et de contrôle moteur chez l'enfant en cours d'apprentissage ou chez l'adulte normoscripteur. De plus, l'analyse numérique peut être réalisée dans le cadre d'étude des phénomènes pathologiques liés à l'écriture.

Dans leur étude, Rosenblum, Weiss et Parush (2004) comparent l'évaluation numérique à l'évaluation analytique de l'écriture. Parmi 100 écoliers israéliens du *grade 3* (CE2), un questionnaire a été distribué à leurs enseignants afin de déterminer les enfants avec troubles de l'écriture ($n=50$) et les enfants normoscripteurs ($n=50$). L'évaluation d'exercices de copie et dictée s'est réalisée à l'aide du test HHE et à l'aide d'un dispositif

semblable à celui du ComPET. Les deux types d'évaluation (analytique et numérique) permettent de différencier les deux groupes d'élèves et les résultats révèlent une corrélation élevée entre les mesures analytiques et les mesures spatio-temporelles. Il semble alors intéressant de combiner les résultats des méthodes conventionnelles à ceux des études numériques pour apporter des informations liées à la problématique des mécanismes sous-jacents à l'écriture (Rosenblum, Weiss & Parush, 2004). Ainsi, l'évaluation peut se faire *a posteriori* (évaluation globale et évaluation analytique) en vue d'analyser la trace laissée sur le papier et/ou en cours de production (évaluation numérique) pour étudier les processus mis en jeu dans le geste graphomoteur.

Le réel enjeu dans l'acquisition de l'écriture manuscrite va être la libération des capacités attentionnelles qui pourront alors être allouées à des processus de plus haut niveau tels que la production de textes. Or, la mise en place de l'écriture manuscrite se réalise progressivement au cours de la scolarité de l'enfant. Nous allons désormais nous intéresser plus en détails à l'apprentissage et à l'évaluation de cette habileté graphomotrice au cours du développement typique.

2. L'écriture, un acte moteur

L'apprentissage de l'écriture, en tant qu'habileté graphomotrice, dépend de la mobilisation d'articulations motrices régies sous un contrôle moteur évoluant au cours du développement. En effet, nous nous intéresserons plus particulièrement aux contrôles moteurs rétroactif et proactif. L'étude de l'écriture permet également de mettre en évidence différentes étapes de développement mis en place grâce à l'enseignement de l'écriture et dont les caractéristiques seront détaillées. Enfin, l'apport des neurosciences et de la psycholinguistique nous apporte différents modèles de l'écriture qui seront présentés chez l'adulte expert puis chez l'enfant apprenti scripteur.

2.1. Le contrôle moteur

L'écriture, comme le dessin, relève du même système effecteur qui inclut, d'une part, les articulations proximales et, d'autre part, les articulations distales. L'épaule, responsable des mouvements du bras, et le coude, impliqué dans les mouvements de l'avant-bras, composent les articulations proximales. Elles permettent le déplacement dans l'espace graphique grâce à des mouvements de translation lente et continue, de gauche à droite et de

haut en bas avec retour à la ligne, d'après le système d'écriture latine. La séquentialisation des tracés varie selon la culture et le système d'écriture. Par exemple, contrairement à l'écriture latine horizontale, les pays d'Asie de l'Est (Mongolie, Chine, Japon, Corée) peuvent présenter une écriture verticale décomposant le mot de haut en bas. De plus, la progression horizontale de l'écriture peut se faire de façon dextroverse (de gauche à droite) dans le système d'écriture latine, et également selon le sens sinistroverse (de droite à gauche) dans les systèmes d'écriture arabe et hébreu. Indépendamment des variations présentes dans les différents systèmes d'écriture, les articulations proximales sont d'autant plus sollicitées que l'écriture produite est de grande taille, de forte amplitude. De plus, à l'aide de ces mouvements, elles contrôlent les composantes topocinétiques de l'écriture en assurant l'agencement des formes graphiques, tel que l'espace entre les lettres, les signes de ponctuation ou les lignes (Paillard, 1991). Les articulations distales sont, quant à elles, composées du poignet et de la main, respectivement responsables des mouvements de la main et des doigts. Elles sont directement sollicitées pour la formation de lettres de taille « normale », selon les méthodes d'instruction scolaire. Tant que l'écriture demeure de taille réduite, elles contrôlent majoritairement les composantes morphocinétiques. Cet ensemble de trajectoires cursives dans l'espace graphique va ainsi influencer les formes caractéristiques de chaque lettre (majuscule, minuscule, script, cursive, taille...). Les composantes topocinétiques et morphocinétiques sont en effet dissociées et indépendantes car leurs modes de contrôle moteur sont différents (e.g. Paillard, 1991 ; van Doorn & Keuss, 1993 ; Zesiger, 1995). Lors de privation visuelle chez l'adulte, l'arrangement spatial des mots sur la ligne horizontale est affecté, contrairement à la forme des lettres qui reste relativement inchangée. Il est classique en psychologie cognitive, notamment depuis les travaux de Schmidt (1975) sur l'apprentissage moteur, de distinguer deux types de contrôle. Le contrôle en boucle fermée (rétroactif) s'applique à des mouvements relativement lents et permet d'ajuster le mouvement en cours d'exécution sur la base d'informations sensorielles. Il s'agit du type de contrôle dominant chez l'enfant en début d'apprentissage d'écriture. Il se caractérise par la forte dépendance aux informations visuelles pour les composantes topocinétiques. Un contrôle en boucle ouverte (proactif) sous-tend que le mouvement est entièrement programmé par avance et s'applique à des mouvements rapides. Il porte essentiellement sur la régulation des composantes morphocinétiques. Lorsque l'écriture est dite experte, le tracé dépend alors de programmes moteurs qui sont des représentations abstraites d'un acte moteur, non spécifiques à un groupe musculaire

(van Galen & Teulings, 1983). Ces automatismes moteurs peuvent être sollicités indépendamment de la présence d'informations sensorielles sur le mouvement en cours.

Tout comme les autres actes moteurs, les mouvements d'écriture font preuve de nombreuses régularités suffisamment stables chez l'adulte expert pour qu'elles soient identifiées comme des principes (Wann & Kardikamanathan, 1991). Ainsi, il est possible de produire les mêmes lettres avec des effecteurs différents, telles que la main, la bouche ou le pied, tout en conservant les caractéristiques individuelles ou personnelles de la forme des lettres (Merton, 1973). Ce principe d'équivalence motrice révèle une représentation interne de la forme de la lettre indépendante de l'activation des muscles impliqués (van Galen & Teulings, 1983). De plus, les principes d'homothétie spatiale et temporelle indiquent une invariance des rapports de longueur et de temps entre chaque segment (trait) d'une lettre et la lettre entière. Cependant l'homothétie temporelle est moins stable que l'homothétie spatiale (Teulings, Thomassen & van Galen, 1986). Si l'écriture est de taille nettement supérieure à la normale, l'ensemble de ces principes perd en stabilité (Thomassen & Teulings, 1985). Ces principes sont révélateurs du contenu des programmes moteurs de l'écriture. Il semblerait que la maîtrise des paramètres absolus des lettres, tels que sa taille, n'est pas essentielle à la mise en place des premiers automatismes. Le principe d'isochronie énonce qu'il existe une relation entre la vitesse d'exécution d'une lettre et la longueur de sa trajectoire. Ainsi, plus la taille de la lettre tracée est grande, plus la vitesse de tracé augmente. Bien qu'il dépende de la vitesse globale du mouvement, ce degré d'isochronie reste stable, selon les auteurs, entre 6 et 11 ans (Thomassen & Teulings, 1983), 7 et 9 ans (Meulenbroek & van Galen, 1986), ou 5 et 12 ans (Viviani & Schneider, 1991). Malgré cet ensemble de principes énumérant l'invariance spatiale de l'écriture, il existe une légère variation des formes due à la fluctuation de la manifestation des instructions centrales au niveau périphérique au cours des répliques (Glencross, 1980 ; Heuer, 1988 ; Rosenbaum, 1991). En effet, il existerait un bruit neuromoteur qui s'ajouterait aux instructions induites par le système central (van Galen, van Doorn & Schomaker, 1990). Par conséquent, les caractéristiques spatiales de l'écriture ne sont pas invariantes mais varient dans une limite de tolérance (Maarse, van Galen & Thomassen, 1989 ; van Doorn & Keuss, 1992). Le bruit neuromoteur correspond à un spectre de fréquence de la vitesse proche de celle du tremblement physiologique. Ce bruit neuromoteur a été étudié récemment par Danna, Paz-Villagràn et Velay (2013) chez des enfants dysgraphiques. L'indice utilisé dans cette étude

consiste à ôter les pics de vitesse typiques dus aux variations de courbure dans la lettre (observées à 5 Hz ; en gris dans la figure 3) pour évaluer les micro-fluctuations atypiques de vitesse (observées à 10 Hz ; en noir). Cet indice s'est révélé nettement supérieur chez les enfants dysgraphiques en comparaison avec des enfants et adultes normo-scripteurs.

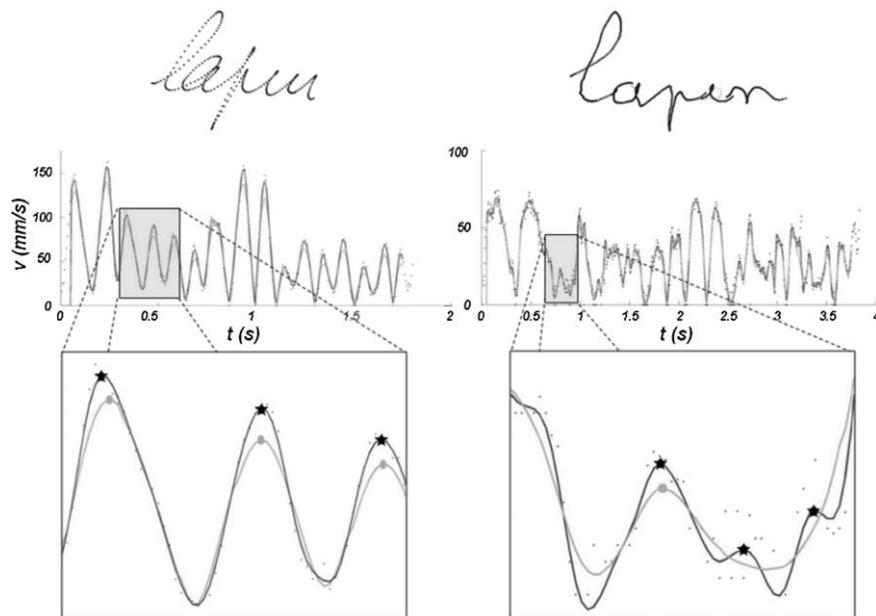


Figure 3. Exemple du mot *lapin* écrit par un adulte expert (gauche) et un enfant dysgraphique (droite). Les graphiques représentent la vitesse de tracé au cours du temps dont une partie est zoomée (encadré) : en noir, vitesse filtrée à 10 Hz ; en gris, vitesse filtrée à 5 Hz. Les pics de vitesse sont représentés par l'étoile ou le point selon la courbe. Issu de Danna, Paz-Villagràn & Velay (2013).

Deux autres indices de la fluidité du mouvement classiquement utilisés dans la littérature (le nombre d'inversions de vitesse et le nombre de mouvements brusques) ont été mesurés et ont permis de conforter ce résultat. Le bruit neuromoteur de vitesse serait alors pertinent dans l'évaluation de troubles de l'écriture. L'acquisition d'un geste graphomoteur ajusté va alors engendrer une faible variation intraindividuelle. Le bruit neuromoteur sera alors à son minimum, signe d'une stabilité du geste. Précisons que la mise en place d'un contrôle moteur de type proactif nécessite de nombreuses années d'apprentissage.

2.2. L'apprentissage de l'écriture

Apprendre à écrire c'est acquérir un ensemble de morphocinèses et de topocinèses nécessaires au tracé correct d'une écriture lisible. Cette évolution des traces écrites s'explique par l'apprentissage en classe mais également par la maturation du système moteur qui permet à l'enfant d'exécuter les gestes fins requis pour former les lettres (Auzias & Ajuriaguerra, 1986). D'après Lurçat ainsi que Perron & Coumes dont les travaux datent

des années 1960 et 1970, la mise en place de l'écriture peut être décrite en différents niveaux et phases chez le jeune enfant :

- 2 ans niveau moteur,
- 2-3 ans niveau perceptif,
- 3-6 ans niveau représentationnel,
- 6-8 ans phase pré-calligraphique,
- 8-10 ans phase calligraphique,
- ≥ 12 ans phase post-calligraphique.

Selon Lurçat (1974 ; 1980), la première phase d'apprentissage de l'écriture correspond au **niveau moteur**. Entre 20 et 24 mois, les mouvements sont rapides et impulsifs, dus à un contrôle exclusivement proximal et donc de forte amplitude. L'enfant de moins de 2 ans produit des marques graphiques indifférenciées pour les dessins, les lettres et les nombres (Yamagata, 2007). Une première forme de coordination apparaît entre les articulations proximales et distales au travers des premiers tracés de cercles. L'espace graphique limité par la feuille impose l'organisation de quelques topocinèses. Le **niveau perceptif** va ensuite prendre place entre 2 et 3 ans et laisser apparaître la contribution des articulations distales entraînant une diminution de la taille des tracés (Lurçat, 1974 ; 1980). De plus, le mouvement se ralentit et le contrôle visuel s'intensifie. L'écriture évolue alors de lignes ondulantes à des suites de cercles, de pseudo-lettres et enfin de lettres. En effet, il existe un lien entre le tracé de formes élémentaires et le tracé de lettres (Zesiger, 1995; Smith-Engelsman, Niemeijer & van Galen, 2001). Le dessin est régi par une grammaire d'action composée de différentes règles syntaxiques d'organisation, de planification et d'exécution graphique pour la composition des tracés (Goodnow & Levine, 1973). En partant du principe qu'écriture et dessin partagent, au début de l'apprentissage, certaines habiletés, Simner (1981) a comparé les procédures utilisées par les enfants dans des tâches d'écriture avant et après apprentissage de l'alphabet avec les prédictions qui peuvent être dérivées de la grammaire d'action. L'auteur a mis en avant une uniformité entre les règles syntaxiques du dessin et les procédures allouées à la copie de lettres chez des enfants non scripteurs (5 ans) et apprentis scripteurs (6 et 7 ans). Les règles de départ (départ en haut à gauche) et de progression (haut-bas et gauche-droite) se retrouvent aussi bien dans le dessin que dans des tâches d'écriture. A l'inverse des conclusions de Simner, d'autres recherches montrent que l'apprentissage de l'écriture peut induire des changements dans

les principes qui sont appliqués au dessin, comme par exemple pour le tracé des lettres *a* ou *o* (pour une revue, Vinter & Zesiger, 2007). La direction des mouvements dépendrait de la main dominante utilisée par l'enfant. Pour la main droite, les tracés se font de préférence de gauche à droite et pour la main gauche, de droite à gauche. De plus, le sens de rotation horaire est privilégié lors de l'utilisation de la main droite. Ces mouvements de translation sur l'espace graphique révèlent l'émergence de nouvelles topocinèses. Entre 3 et 6 ans, la naissance de production de lettre va marquer le passage vers un **niveau représentationnel** (Lurçat, 1974 ; 1980). Les lettres produites tendent à correspondre aux caractéristiques phonologiques de phrases dictées (Gombert & Fayol, 1992 ; Noyer & Baldy, 2002). Grâce à l'émergence de morphocinèses spécifiques et à la progression de l'organisation topocinétique, les premières coordinations entre articulations se mettent en place. Le dessin et l'écriture s'apparentent alors à deux habiletés motrices bien différenciées avec une émergence graduelle d'un avantage de l'écriture sur le dessin en termes de vitesse (Adi-Japha & Freeman, 2001). A cette étape, l'enfant constitue son répertoire de primitives graphiques grâce à la copie de modèles externes, basée sur un très fort contrôle visuel et kinesthésique. De nombreuses erreurs de copie interviennent, dues au contrôle visuel intense exercé sur le geste et au regard alternant entre le modèle et la copie. Il y a alors un conflit entre les composantes morphocinétiques et topocinétiques : l'enfant copiera correctement la forme de la lettre mais respectera moins sa trajectoire. Par la suite, avec la mise en place de l'instruction scolaire de l'écriture, la forme et la trajectoire de la lettre s'associent correctement, malgré un tracé incertain, des courbures inappropriées, une taille trop grande (Charles, Soppelsa & Albaret, 2003), une incohérence de taille entre les segments d'une même lettre ou plusieurs lettres adjacentes (Ajuriaguerra, Auzias & Denner, 1971). L'étude de l'écriture chez l'enfant de 6 à 12 ans par Perron et Coumes (1964) a permis de compléter les travaux de Lurçat sur le développement du geste graphomoteur. De 6 à 8 ans, âges bornant la **phase pré-calligraphique**, le développement de la qualité d'écriture est très rapide (Karlsdottir & Stefansson, 2002). Entre 7 et 9 ans, la vitesse d'écriture augmente (Phelps, Stempel & Speck, 1985 ; Hamstra-Bletz & Blöte, 1990) et la taille des lettres diminue. Concernant la cinématique du tracé, la pression diminue et la fluidité s'améliore en termes de nombre de pics de vitesse, de nombre et de durée des pauses (Meulenbroek & van Galen, 1988 ; Zesiger, 1995). Au début de la **phase calligraphique** (Perron & Coumes, 1964), l'écriture devient régulière avec la présence de liens entre les lettres et de lignes d'écriture droites. L'enfant a la volonté de s'appliquer, d'être plus précis

et d'aboutir à une meilleure qualité du tracé. Face à l'apprentissage de nouvelles lettres, l'enfant modifie son mode de contrôle du mouvement en réutilisant intensément les feedbacks sensoriels. Jusqu'à l'âge de 10 ans, l'enfant utilise de façon massive toutes les informations sensorielles pertinentes, visuelles, kinesthésiques et proprioceptives pour exécuter les tracés (Chartrel & Vinter, 2004). En effet, en l'absence de feedbacks visuels, les enfants de 7 à 9 ans augmentent la vitesse, l'amplitude, la fluidité et la pression de leur écriture, alors que les adultes augmentent uniquement la pression exercée sur le stylo (Chartrel & Vinter, 2006). Au cours de la phase calligraphique, vers l'âge de 10 ans, le contrôle proactif prédomine, laissant place à une écriture de meilleure qualité (Zesiger, 1995). A l'âge de 12 ans, début de la **phase post-calligraphique** (Perron & Coumes, 1964), une fluidité du mouvement et une harmonie du tracé s'installent grâce à la régulation simultanée par le contrôle proactif et le contrôle perceptif des mouvements (Meulenbroek & van Galen, 1988 ; Zesiger, 1995). Grâce à la mise en place de cette écriture maîtrisée, l'adolescent peut adopter une trace écrite personnalisée en l'inclinant, en augmentant ou en diminuant sa taille, en combinant le cursif et le script au bénéfice de la vitesse d'écriture (Graham, Berninger, Weintraub & Schafer, 1998). Il établit alors le meilleur compromis entre les exigences de lisibilité, de rapidité et de style.

Au cours du développement, la posture du corps suit également une évolution au fil de l'apprentissage de l'écriture (pour une revue : Sage, 2010). Entre 5 et 14 ans, on observe progressivement un redressement de la tête et du tronc, un assouplissement des articulations et une stabilisation du tronc. La diminution de l'appui du tronc, de l'avant-bras et du poignet sur la table engendre la libération des articulations distales et proximales pour la production des mouvements. Lors de la phase pré-calligraphique (5 à 7 ans ; Perron & Coumes, 1964), la progression du mouvement se fait sur la ligne graphique et selon un phénomène de reptation : la main est à l'arrêt, les doigts se fléchissent progressivement, la main se déplace en s'étendant et les doigts se déplient, puis la main s'arrête à nouveau, etc... A cette période de l'apprentissage, le contrôle visuel est important sur les mouvements graphiques et leur résultat. La feuille est donc positionnée droite face au corps du scripteur et sa tête est rapprochée du support. Puis au cours de la période post-calligraphique, on observe une nouvelle posture : la progression du mouvement se fait alors par rotation de la main autour du poignet et de façon coordonnée au mouvement de l'avant-bras.

Les processus moteurs contribueraient en partie à l'instauration de l'écriture manuscrite. Ceci correspond sur le plan neuropsychologique à la mise en place de programmes moteurs internes engendrant le passage d'un contrôle moteur rétroactif à un contrôle proactif. Les caractéristiques de la forme de la lettre, son positionnement ainsi que les groupes musculaires associés au tracé vont y être définis. Différents modèles ont été proposés en vue d'en rendre compte.

2.3. Les modèles de l'écriture

La production du mouvement d'écriture repose sur un traitement intervenant à des niveaux hiérarchiques différents, selon un processus sériel (pour une revue : Albaret, Danna, Soppelsa & Kaiser, 2013). Les modules de plus haut niveau sont communs à la production d'autres tâches linguistiques, telles que la parole. Ainsi, après l'activation d'une idée, elle est exprimée au moyen de concepts puis formulée à l'aide d'une phrase, décomposée ensuite en mots. Suite à ces étapes, la sélection de modules spécifiques à l'écriture active les programmes moteurs associés. Chez l'adulte, deux modèles traitant de cette programmation motrice sont les plus fréquemment cités dans la littérature : celui d'Ellis et Young (1988) et celui de van Galen (1991). Par ailleurs, le modèle de l'écriture chez l'enfant de Zesiger (2003) sera aussi présenté compte tenu du fait qu'il intègre de façon détaillée des mécanismes de rétroaction susceptibles de rendre compte des processus à l'œuvre dans les phénomènes pathologiques liées à l'écriture.

A partir de l'observation de patients adultes cérébrolésés, **Ellis et Young** (1988) ont proposé un modèle de la reconnaissance et de la production du langage (oral et écrit) qui est encore à ce jour le modèle de références de nombreux chercheurs (pour une revue : Albaret, Danna, Soppelsa & Kaiser, 2013). La particularité de ce modèle est la présence de voies neurologiques descendantes mais également ascendantes avec boucles rétroactives. Le langage oral et le langage écrit sont ici imbriqués l'un avec l'autre à l'aide de différentes voies croisées. Nous nous intéresserons ici principalement à la voie de l'écriture représentée par la partie droite du modèle (figure 7). Prenons l'exemple d'un adulte lisant un *mot écrit* qu'il doit ensuite copier à l'écrit. Il va alors identifier visuellement les lettres composant ce mot grâce au module *système d'analyse visuelle*. Si le mot est familier, il peut être reconnu après décryptage visuel parmi le *lexique d'entrée visuel*. Le *système cognitif sémantique* va alors être sollicité afin d'engager les modules associés à l'écriture. Le *lexique de sortie*

graphémique est une mémoire tampon stockant temporairement les unités graphémiques du mot et contribuant à l'organisation des lettres et à sa structure orthographique. Si le mot est inconnu, les graphèmes vont être convertis en phonèmes au *niveau phonémique* puis être convertis à nouveau en graphèmes au *niveau graphémique*. Si cette conversion graphème-phonème est impossible (par exemple en langue étrangère), la conversion se fera directement du *système d'analyse visuelle* au *niveau graphémique*, indépendamment de la voie lexicale et de la voie phonémique. Le niveau graphémique est donc sollicité pour toute tâche d'écriture, que le mot soit connu ou non. Le *niveau allographique* prend alors le relai pour retrouver en mémoire la forme du graphème (*b/d, m/n, p/q*) et la forme de la lettre (scripte, cursive, majuscule, minuscule, italique). Enfin, les *patrons graphomoteurs* (ou programmes moteurs) déterminent l'ordre et la séquence des traits, la taille des traits et la sélection des groupes musculaires (muscles agonistes/antagonistes) à activer. La voie ascendante (du mouvement vers le système nerveux central) est ici représentée par une boucle rétroactive de l'*écriture* au modèle du *mot écrit*. Elle permet la vérification de correspondance entre la production écrite et le modèle, permettant ainsi une correction en cours de production. Ce modèle a la particularité d'allier le langage oral et le langage écrit au travers de voies croisées au niveau du système sémantique. D'après ce modèle, il est alors possible d'écrire un mot entendu ou de lire un mot écrit. Différentes études en neuropsychologie ont permis de conforter la présence de deux voies parallèles de la lecture et de l'écriture. En effet, dans une étude de cas, Hamilton et Coslett (2007) présentent une patiente ayant des difficultés à écrire des mots complexes sous dictée, signe d'une altération entre le module *mot entendu* et le module *écriture*. Cependant, cette patiente ne démontrait aucun trouble lors de la lecture de ces mêmes mots écrits (voie de *mot écrit* à *langage oral*). D'autres résultats mis en évidence par Delazer, Lochy, Jenner, Domahs et Benke (2002) confortent ce modèle. Les auteurs y décrivent un patient cérébrolésé rencontrant des difficultés à écrire un mot dicté. Ces difficultés s'estompent lorsque le patient copie un mot écrit.

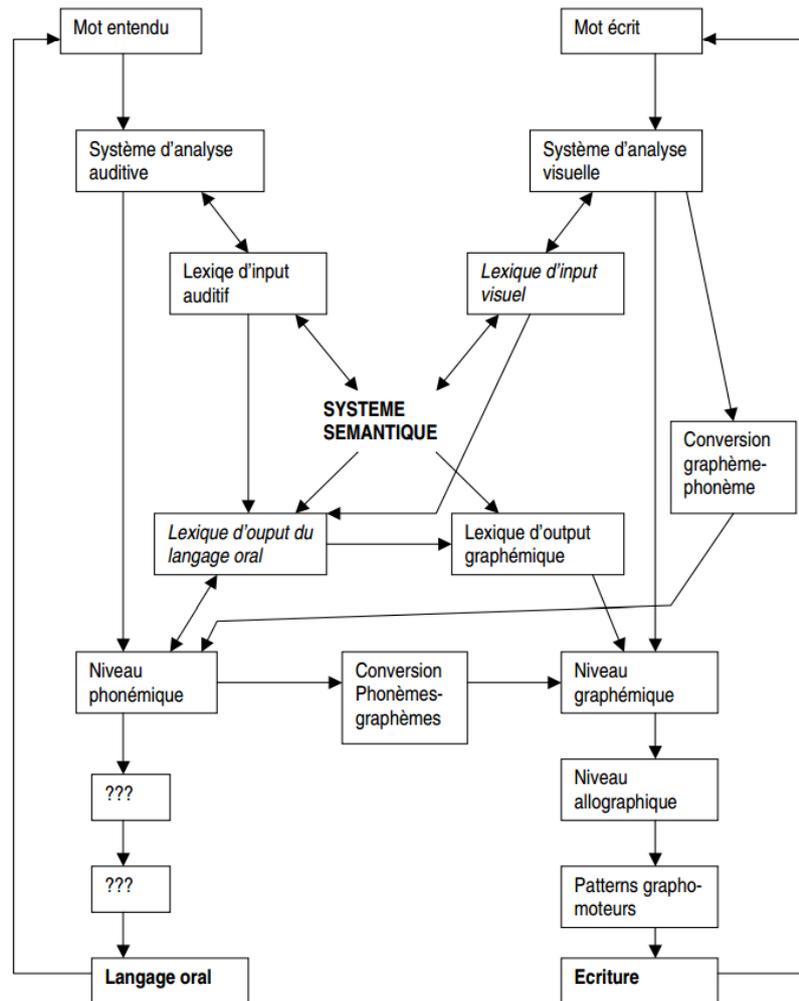


Figure 4. Modèle d'Ellis & Young (1988), traduit et issu de Kaiser (2009, p.9).

Le modèle de **van Galen** (1991) porte uniquement sur la production écrite. Ce modèle a la particularité de proposer des processus sériels et parallèles, représentés en figure 8 avec 3 colonnes. Contrairement au modèle d'Ellis et Young (1988), les processus moteurs (colonne de gauche) se réalisent en parallèle des processus linguistiques (colonne du milieu). On retrouve cependant une certaine hiérarchisation entre les différents modules où chaque niveau a pour entrée la réponse du niveau précédent. Au fil des modules, la taille de l'unité linguistique va diminuer en décomposant une idée en phrases, en mots, puis en lettres (*graphèmes*) à l'aide de la mémoire tampon orthographique. Le passage au contrôle moteur de l'écriture se fait après le module d'*épellation* avec la *sélection d'allographes* (niveau allographique). Les composants des patrons graphomoteurs du modèle d'Ellis et Young (1988) ont été ici hiérarchisés avec le *contrôle de la taille* de l'allographe et le contrôle de la vitesse, suivis des *ajustements musculaires* liés aux courbes de la lettre. Aucune boucle ascendante n'est proposée dans ce modèle, il n'y a donc pas de contrôle sur la production écrite en cours d'exécution. Compte tenu de l'absence de *feedbacks* sensoriels, le modèle de

van Galen (1991) n'est adapté que chez l'adulte normo-scripteur dont l'écriture est régie sous un contrôle proactif.

Les deux modèles (Ellis & Young, 1988 ; van Galen, 1991) s'accordent sur la présence de trois modules correspondant à un niveau orthographique, un niveau allographique et un niveau graphomoteur. Différentes études ont permis de conforter l'influence de ces trois niveaux sur l'écriture, et ce, de façon dissociable. Au niveau orthographique, la durée d'écriture des traits chez des enfants de CP-CE1 est plus longue pour des mots à orthographe irrégulière par rapport aux mots à orthographe régulière (Kandel & Valdois, 2005). De plus, chez des enfants de 9 ans, les mouvements d'écriture sont produits plus rapidement pour des mots fréquents par rapport à des mots peu fréquents (Søvik, Arntzen, Samuelstuen & Heggberget, 1994). Au niveau allographique, chez l'enfant de 10 ans, la préparation au geste d'écriture est plus longue pour des lettres qui peuvent être confondues avec des chiffres ou d'autres lettres (*b/d, p/q*) (Meulenbroek & van Galen, 1990). Le geste d'initiation de l'écriture va être plus lent pour des lettres à allographes multiples (*r, s, f*) en opposition à celles présentant un seul allographe (*e, j, o*). Certaines lettres de l'alphabet sont également associées à une complexité motrice d'exécution (*k, x, r, z*), dû à la présence de courbes et de changements soudains d'orientation. De plus, on retrouve souvent chez le jeune enfant des mots composés de différents types de lettres, telles que certaines en majuscule et d'autres en minuscule. Au niveau graphomoteur, Adi-Japha et collaborateurs (2007) ont étudié les troubles de l'écriture chez l'enfant avec trouble déficit de l'attention avec/sans hyperactivité (TDA/H). Les 20 enfants TDA/H de *grade 6* (6^{ème}) ont présenté plus d'erreurs d'insertion, de substitution, de transposition de d'omission de lettres par rapport à des enfants typiques. Les auteurs suggèrent alors que ces erreurs seraient dues à des capacités d'attention altérées au niveau de la planification motrice. D'après ces études, les programmes moteurs mis en place lors du développement peuvent influencer l'écriture au niveau orthographique, allographique et graphomoteur.

Cette modélisation de la programmation motrice dans l'écriture a été largement discutée et critiquée par la suite (pour une revue : Bara & Gentaz, 2010). La capacité à positionner la lettre sur la page contrôlée par les composantes topocinétiques n'a pas été prise en compte dans les deux modèles. Ainsi, Graham et collaborateurs (2006) ont évalué

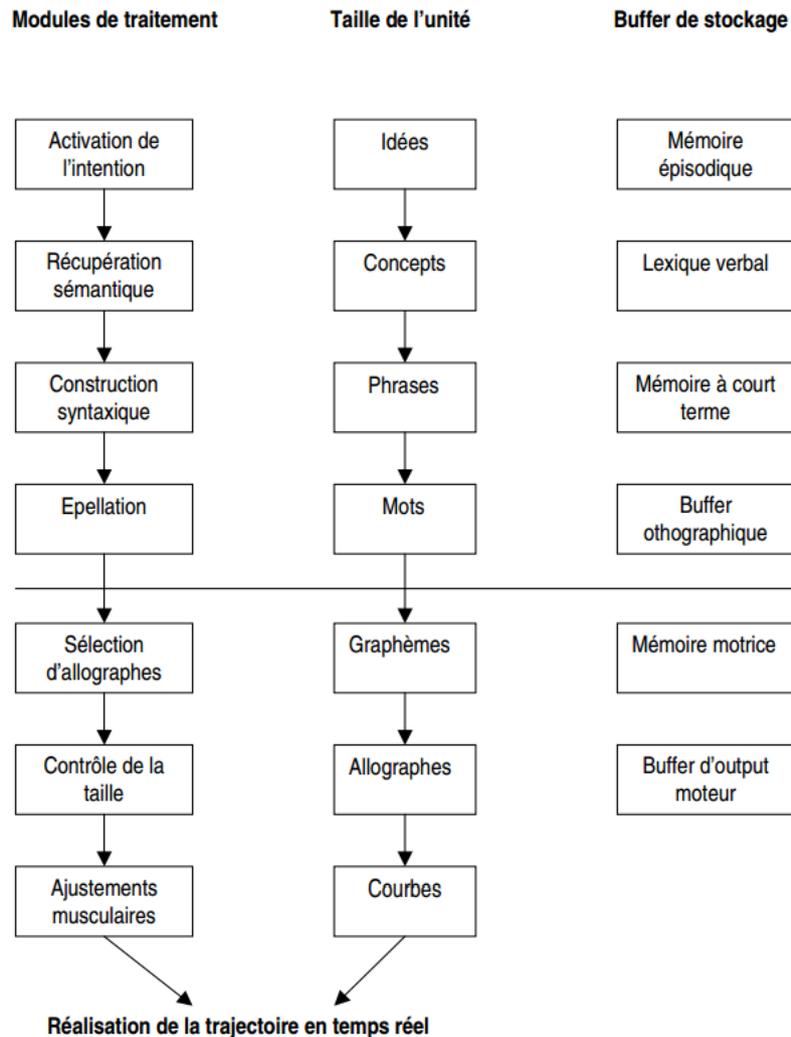


Figure 5. Modèle de van Galen (1991), traduit et issu de Kaiser (2009, p.12)¹³.

l'arrangement spatial chez des enfants de *grade 1* et *2* (CP-CE1). Les résultats révèlent que les enfants faibles scripteurs présentent une plus grande variabilité d'espacement et d'alignement entre les lettres et les mots. Les auteurs suggèrent alors qu'après l'accès au programme moteur, la décision de l'arrangement spatial interviendrait. Ceci est en accord avec l'hypothèse qu'un programme moteur contiendrait essentiellement des informations de nature spatiale plutôt que des indices dynamiques (Teulings & Schomaker, 1993). Portant sur l'écriture chez l'adulte, ces modèles ne prennent pas en compte la question de la taille de l'unité de base. Cependant, au cours de l'apprentissage, les représentations internes seraient influencées par des unités graphiques de taille de plus en plus grande (pour une revue : Lambert & Espéret, 1996). Ce principe de *chunking* consiste en l'assemblage cognitif de plusieurs items indépendants en une seule unité facilement activable, principe retrouvé

¹³ Une correction a été apportée en intervertissant les modules « Phrases » et « Mots » d'après le modèle d'origine de van Galen (1991).

dans les domaines de la mémoire, des échecs, de la lecture, ou du dessin. Lors de l'automatisation des traits de base, ceux-ci s'assemblent en une unité plus grande, correspondant à une seule unité indissociable d'un point de vue cognitif. Au cours de l'apprentissage, les premiers tracés se feraient d'abord trait par trait, puis lettre par lettre (Portier, van Galen, & Meulenbroek, 1990). Kandel, Alvarez et Vallée (2006) se sont intéressés à la syllabe comme unité de base dans la programmation motrice chez l'adulte. Ils ont alors mesuré l'intervalle de temps entre deux lettres au sein de différents mots afin d'investir le mécanisme sous-jacent de production motrice. Les résultats ont alors mis en évidence des intervalles de temps plus longs entre les syllabes par rapport aux intervalles au sein d'une même syllabe. L'exécution motrice lors de l'écriture d'une lettre serait alors influencée par sa position syllabique au sein du mot, en particulier avec un ralentissement en bordure de syllabe (Sausset, Lambert, Olive & Larocque, 2012). Elle serait également dépendante du nombre de syllabes au niveau du temps de latence avant l'exécution du mouvement (Lambert, Kandel, Fayol & Espéret, 2008). Cette influence de la syllabe sur l'exécution motrice pourrait être liée au traitement phonologique qui sépare chaque mot en syllabe. Lambert, Sausset et Rigalleau (2015) ont alors essayé d'établir le type de traitement, orthographique ou phonologique, mis en place dans l'écriture de mots. Les mots contenant un *e* muet (par exemple, le mot *culture* est composé de 3 ortho-syllabes mais seulement 2 syllabes phonologiques) engendrent des latences d'écriture similaires aux mots de 3 ortho-syllabes sans *e* (par exemple, *saleté*). Ces résultats confirment le traitement orthographique, et non phonologique, de la syllabe lors de l'écriture d'un mot. Le traitement d'un mot à copier se fait également en cours de production du précédent mot (Lambert, Alamargot, Larocque & Caporossi, 2011). Ce principe de « chunking » au niveau de la syllabe et du mot se met en place lorsque la tâche présente peu de contraintes graphomotrices, par exemple lors d'une tâche de copie de mots en minuscules (Sausset, Lambert, Olive & Larocque, 2012) ou de mots fréquents et réguliers (Lambert et al., 2011).

Concernant ces deux modèles, Zesiger (2000) s'est interrogé sur la place des afférences perceptives qui semblent secondaires dans le modèle d'Ellis et Young, voire inexistantes dans le modèle de van Galen. En effet, chez l'adulte, l'écriture dépend principalement de la programmation motrice mise en place au cours du développement. Les mécanismes de rétroaction sont une condition naturelle mais non indispensable à la génération de l'écrit. Or, d'après Zesiger (2000), les informations visuelles et tactilo-

kinesthésiques permettent d'assurer un bon agencement des lettres dans le mot, des mots selon la ligne, ou même du texte dans l'espace feuille. Les deux précédents modèles ne sont donc pertinents que dans la mesure où l'écriture est automatisée et réalisée sous contrôle proactif, autrement dit chez un adulte normoscripteur. Chez un certain nombre d'adultes atteints de pathologie, l'écriture est loin d'être une habileté rapide et automatisée dont le contrôle s'effectuerait en amont, via une programmation motrice. Les modèles de l'écriture chez l'enfant intégrant des mécanismes de rétroaction plus complexes semblent plus à même de rendre compte de l'ensemble des processus à l'œuvre dans les phénomènes pathologiques liés à l'écriture. Parmi les travaux sur l'étude de l'écriture, Zesiger (2003) propose un modèle chez l'enfant typique (figure 6).

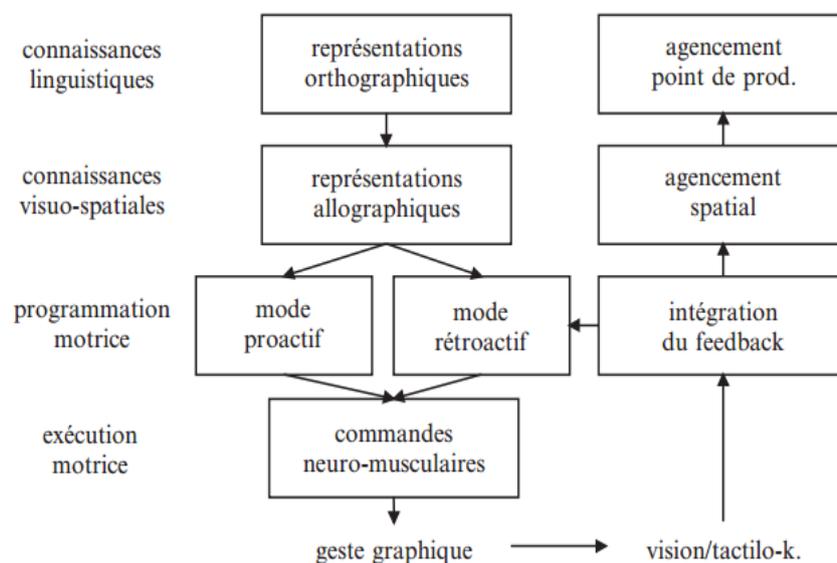


Figure 6. Schéma représentant les types de connaissances (colonne de gauche), les composants impliqués dans l'apprentissage de l'écriture (colonne centrale) et les fonctions des afférences perceptives (colonne de droite). Issu de Zesiger (2003).

Le modèle de **Zesiger (2003)** se base sur le modèle d'apprentissage moteur amorcé par Schmidt (1975), différenciant le contrôle rétroactif du contrôle proactif. Chez le scripteur non-expert tel qu'un jeune enfant en cours d'apprentissage, les informations visuelles et tactilo-kinesthésiques vont être analysées pendant et après l'exécution de chaque segment (pour une revue : Mayor, Deonna et Zesiger, 2000). Sous ce contrôle en boucle fermée, les lettres produites sont alors de grande taille, cabossées, et irrégulières. Le tracé est lent avec une multitude de couples d'accélération et de décélération, de nombreuses pauses et une pression importante exercée sur le stylo. Ce *feedback* sensoriel permet à l'enfant de contrôler la production du tracé dans l'espace de la feuille et de l'ajuster en fonction des lettres produites par rapport à celles qui restent à produire. Cette voie

ascendante sera de moins en moins sollicitée au fil des années d'apprentissage dû au développement de programmes moteurs spécifiques à chaque allographe. Le contrôle proactif représente l'augmentation de la taille de l'unité de base : chaque trait composant une lettre se limite à un couple d'accélération et de décélération. La fluidité du tracé est améliorée, la vitesse augmente et devient régulière avec peu de pauses et une pression diminuée. Vers l'âge de 10 ans, la taille des lettres est proche de celles des adultes. Le modèle de Zesiger (2003) semble être un modèle pertinent pour rendre compte de l'altération des processus en jeu dans l'écriture au sein de population avec pathologie.

Les modèles de l'écriture ont permis une compréhension plus précise des processus impliqués dans le geste graphomoteur. Au-delà de caractéristiques générales décrivant l'évolution de l'écriture en termes de processus cognitifs chez l'enfant, il existe des variations interindividuelles pouvant s'expliquer par une pluralité de facteurs impactant sur l'écriture.

3. Les facteurs influençant l'écriture

Les habiletés d'écriture, en termes de qualité, de vitesse ou de fluidité du geste, peuvent varier selon différentes caractéristiques propres à l'individu. Dans les travaux de recherche sur l'écriture chez l'enfant au développement typique, les facteurs individuels les plus fréquemment étudiés se réfèrent à l'âge, le genre, la position du corps, la tenue du stylo et les capacités perceptivo-motrices telles que la coordination de la motricité fine, l'intégration visuo-motrice, la perception visuelle ou l'attention visuelle. De plus, les pratiques d'enseignement favorisant la mise en place de l'écriture peuvent varier selon le style d'écriture (script ou cursif) et la modalité de présentation du modèle de la lettre (visuelle, verbale, tactilo-kinesthésique).

3.1. Les facteurs individuels

Tout d'abord, l'**âge chronologique** joue un rôle majeur dans les performances d'écriture. En effet, comme détaillé en 2.2., les caractéristiques de l'écriture évoluent au cours du développement. Grâce à la mise en place d'un enseignement scolaire de l'écriture, l'écriture va subir d'importants changements. L'étude de Sage (2010) s'est intéressée à l'influence de l'âge sur la qualité et la vitesse d'écriture chez l'enfant de 8 à 11 ans. Les résultats mettent en évidence une augmentation de la vitesse d'écriture et une amélioration

de la qualité portant sur la réalisation motrice des lettres, en particulier entre 8 et 10 ans. Au-delà de cet âge, l'écriture va se stabiliser. A l'âge adulte, peu de changements sont observés jusqu'à l'âge de 40 ans à partir duquel une baisse de la lisibilité et de la rapidité sont rapportées (Berwick & Winickoff, 1996).

Concernant le **genre**, la qualité d'écriture se différencie entre garçons et filles. Chez l'enfant âgé de 8 à 11 ans, une comparaison inter-genre a été faite selon les 13 critères du test BHK regroupés en 4 facteurs distincts : 1) réalisation motrice des lettres, 2) formes et constance des lettres, 3) organisation spatiale dans le mot, 4) organisation spatiale dans la feuille (Sage, 2010). Un avantage des filles a été montré, variant selon l'âge et le facteur concerné : les items d'organisation spatiale des lettres dans le mot (à 9 ans et à 11 ans) et ceux d'organisation spatiale dans la feuille (à 10 ans) sont mieux maîtrisés par les filles par rapport aux garçons. L'étude de Dorfberger, Adi-Japha et Karni (2009) met en évidence une vitesse d'écriture supérieure chez les filles de 12 ans par rapport aux garçons de même âge. Chez l'adulte, les femmes écrivent plus lisiblement que les hommes (Berwick & Winickoff, 1996 ; Schneider, Murray, Shaddock & Meyers, 2006). D'après Burr (2002), les différences sont tellement importantes qu'il est généralement possible de distinguer l'écriture entre les deux genres par des juges non experts. Au niveau de la vitesse d'écriture, les femmes semblent écrire également plus de caractères que les hommes (Hackel, Wolfe, Bang & Canfield, 1992; Jebson, Taylor, Trieschman, Trotter & Howard, 1969; Agnew & Maas, 1982).

La **position du corps** aurait une influence sur la qualité de l'écriture. Ainsi, chez l'enfant, écrire en-dessous de la ligne d'écriture (exemples en figure 7) impliquerait une meilleure réalisation motrice des lettres par rapport à une écriture au niveau de la ligne (Sage, 2010). La vitesse d'écriture serait plus importante si la position de la feuille se situe dans l'axe du bras scripteur, en comparaison à une position face au scripteur. La feuille est inclinée et positionnée vers un des hémichamp, dépendant de la latéralité de l'enfant. La position du corps lors de l'écriture peut varier selon l'âge et le genre (Sage, Zesiger & Garitte, 2009). Ainsi, chez l'enfant de 8 à 12 ans, les filles vont avoir tendance à placer la feuille selon l'axe du bras alors que les garçons vont la positionner davantage face à eux (Sage, 2010). Une différence inter-genre existe également au niveau de la position du bassin, par laquelle les garçons se positionnent davantage que les filles en rétroversion en ramenant en arrière les os iliaques. De plus, la position du dos s'améliore chez l'enfant en étant d'abord penché sur le bureau puis en adoptant une position de dos droit. Le genre comme facteur prédictif

de la qualité d'écriture pourrait alors être lié à la position d'écriture de la main et de la feuille variant entre les garçons et les filles.



Figure 7. Exemples de positionnement de la main au-dessus (gauche) et en-dessous (droite) de la ligne d'écriture. Repéré à l'adresse : <http://www.reeducation-ecriture.com>

Le **type de tenue du stylo** évolue au cours de l'apprentissage de l'écriture (Schneck & Henderson, 1990). Ainsi, au cours de la période pré-calligraphique, la saisie se fait de façon « primitive » en enveloppant le crayon avec la main entière (figure 8, A et B) puis évolue vers une tenue avec les doigts (figure 8, C à E). A l'âge de 7-8 ans, le trépied dynamique a pris place, preuve de maturité : le pouce et l'index sont en opposition et le majeur est en dessous du crayon (figure 8, I-J). Concernant la qualité ou la vitesse d'écriture, il n'y a pas de différences entre les tenues de stylo chez l'enfant de 9 ans (Schwellnus et al., 2012). La tenue du stylo peut différer d'une activité à une autre ou au sein d'une même tâche, ce qui peut avoir un impact sur les performances d'écriture. Chez des enfants de 3-4 ans, il existe une variabilité importante dans la tenue du stylo, en particulier dans des tâches de dessin libre (Braswell, Rosengren & Pierrousakos, 2007). Certains enfants d'âge pré-scolaire présentent une plus grande variabilité de la tenue de stylo par rapport à d'autres enfants de même âge. L'étude a révélé que les enfants adoptant différentes tenues de stylo dessinent des formes géométriques de moins bonne qualité dans des tâches de copie. La constance dans le type de prise du stylo est alors un facteur permettant de stabiliser le geste graphomoteur et d'améliorer les capacités. Chez l'adulte, la façon dont le stylo est tenu peut aussi influencer les performances d'écriture. Par exemple, dans l'étude de Stevens (2008), 51% des adultes écrivent en trépied dynamique et 20% en trépied latéral. Les participants devaient copier durant cinq minutes un texte jusqu'à ce qu'ils ne puissent plus écrire. Indépendamment de la prise du stylo, tous les participants ont écrit le même nombre de mots. Cependant, le groupe présentant une tenue en trépied latéral s'est arrêté plus tôt d'écrire, suggérant qu'ils ressentiraient plus rapidement de la fatigue et seraient donc moins endurants. Précisons que la différence inter-groupes ne se retrouve plus lors d'une tâche d'écriture de deux heures (Wallen, Bonney & Lennox, 1996).

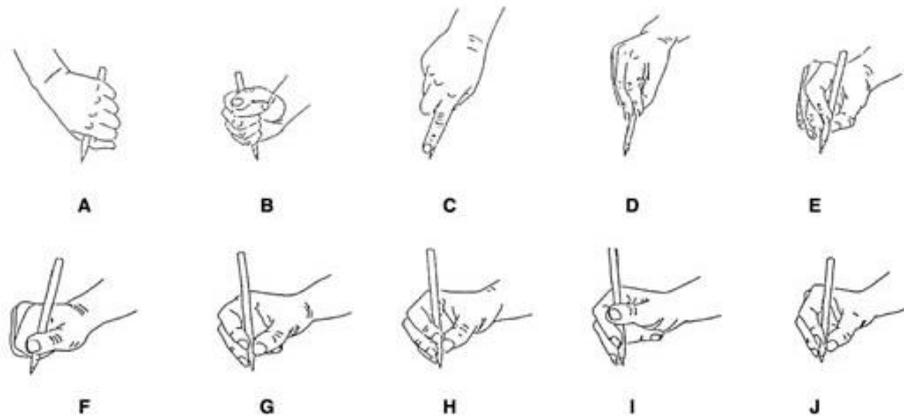


Figure 8. Exemples de prises en main du crayon par ordre développemental. Issu de Schneck & Henderson (1990).

Outre ces facteurs liés au positionnement de la main, la **latéralité** a été également étudiée dans un certain nombre d'études auprès d'enfants et d'adultes. Il s'avère que la latéralité n'influence pas l'écriture en termes de qualité et de vitesse d'écriture chez l'enfant de 8 à 12 ans (Sage, 2010). Cependant, les enfants gauchers ont tendance à adopter une tenue intermédiaire du stylo, oscillant entre une posture inversée / non inversée, par rapport à celle des droitiers (Athenes & Guiard, 1990). La latéralité manuelle présente également un impact sur la posture par rapport à la feuille (Sage, Zesiger & Garitte, 2009). Ainsi, la main se situe plus fréquemment au-dessus de la ligne d'écriture chez les gauchers par rapport aux droitiers. La feuille est plus souvent positionnée selon l'axe du bras chez les droitiers et elle est placée perpendiculairement à cet axe davantage chez les gauchers (Sage, 2010). De plus, les gauchers semblent exercer une plus grande force sur le bras non scripteur que les droitiers. Chez l'adulte, l'écriture des droitiers ne diffère pas de celle des gauchers, tant au niveau de la rapidité (Auzias, 1970 ; Ziviani & Elkins, 1984), que de la lisibilité (Groff, 1964) ou encore des caractéristiques cinématiques des mouvements (Meulenbroek & van Galen, 1989).

L'écriture requiert différentes capacités perceptivo-motrices constituant des facteurs individuels pouvant influencer les performances d'écriture (pour une revue : Kaiser, Carrasco, Soppelsa & Albaret, 2013). Lors de l'écriture, le scripteur doit à la fois tenir le stylo, réaliser des mouvements coordonnés et efficaces, percevoir et discriminer les lettres par leurs formes et également être attentif à l'ensemble des tracés à effectuer. Aussi, notre regard portera sur l'influence de la coordination de la motricité fine, de l'intégration visuo-motrice, de la perception visuelle et de l'attention visuelle sur la qualité et/ou la vitesse d'écriture.

La **coordination de la motricité fine** est définie par le déliement digital qui permet la dissociation et la coordination entre les doigts d'une main. Afin d'évaluer cette capacité composite, le *Purdue Pegboard* (Lafayette Instrument Company, 1985) et le *DTB* (Bonnardel, 2008) proposent plusieurs tâches de dextérité digitale et de dextérité manuelle. La dextérité digitale est la capacité à manipuler rapidement, efficacement et de façon contrôlée des petits objets, dont l'utilisation des doigts est primordiale. La dextérité manuelle consiste aux mêmes aptitudes mais sur des objets plus gros. En termes de qualité d'écriture, les comparaisons entre faibles scripteurs et bons scripteurs révèlent une différenciation entre les deux groupes au niveau de la dextérité digitale (Cornhill & Case-Smith, 1996 ; Kaiser, Albaret & Doudin, 2009 ; van Hoorn, Maathius, Peters & Hadders-Algra, 2010 ; Weintraub & Graham, 2000) et au niveau de la dextérité manuelle (Smits-Engelsman, Niemeijer & van Galen, 2001 ; Volman, van Schendel & Jongmans, 2006). Une seule étude a porté sur la vitesse d'écriture et a mis en évidence que la dextérité digitale est le meilleur facteur prédicteur de la vitesse (Feder et al., 2005).

L'**intégration visuo-motrice**, basée sur la coordination entre l'information visuelle et la réponse motrice (Amundson, 1992 ; Tseng & Cermak, 1993), peut également influencer l'écriture, aussi bien chez l'enfant que l'adulte. Cette capacité est évaluée en partie selon l'aptitude à copier des formes géométriques sur un support papier-crayon (Kushki, Chau & Anagnostou, 2011). D'après Kaiser, Carrasco, Soppelsa et Albaret (2013), l'intégration visuo-motrice peut également être évaluée dans des épreuves de traçage entre deux lignes. Ce qui différencie ces deux tâches est le recours à la perception visuelle pour la copie de formes et le recours au contrôle visuel dans la tâche de traçage. En effet, l'intégration visuo-motrice implique deux grandes voies corticales : la voie ventrale pour la perception visuelle et la voie dorsale pour le contrôle visuel. Indépendamment du type d'exercice, ces tâches évaluent l'intégration entre la coordination de la motricité fine (main, doigts) et la perception ou le contrôle visuel. De nombreuses études ont permis de mettre en évidence une forte corrélation entre le niveau d'intégration visuo-motrice et la qualité d'écriture chez l'enfant (Cornhill & Case-Smith, 1996 ; Maeland, 1992 ; Tseng & Murray, 1994 ; Volman et al., 2006 ; Weil & Amundson, 1994 ; Weintraub & Graham 2000). Jusqu'à l'âge de 10 ans, cette intégration visuo-motrice s'améliore (Bard & Hay, 1983). Au travers d'une tâche de tracé de précision, les performances de cette capacité augmentent avec la qualité d'écriture au test BHK (Kaiser, Albaret & Doudin, 2009). Une étude a également porté sur la vitesse

d'écriture chez l'enfant typique (Tseng & Chow, 2000). L'un des facteurs prédicteurs de la vitesse d'écriture est l'intégration visuo-motrice chez les scripteurs lents mais pas chez les scripteurs écrivant à une vitesse typique. Certains auteurs préconisent alors que les enfants doivent maîtriser la copie des 9 premières formes du DTVMI avant de débiter l'écriture (Daly, Kelley & Krauss, 2003 ; Tseng & Cermak 1993).

La **perception visuelle** joue un rôle important dans la mise en place d'une écriture experte (Ziviani & Wallen, 2006). Au cours de l'apprentissage, ce traitement permet la discrimination entre les différentes formes des lettres (Tseng & Chow, 2000). De plus, cette information visuelle sert de contrôle en cas d'erreur de tracé (Zesiger, 2003). En effet, dans le développement des compétences visuo-spatiales présenté par Del Giudice et collaborateurs (2000), l'acquisition de l'écriture dépend de la mise en place des compétences visuo-perceptives ainsi que de la représentation spatiale. Le niveau de perception visuelle des formes peut être évalué par la recherche d'une image parmi d'autres images en arrière-plan. L'étude de Maeland (1992) met en évidence chez l'enfant de 10 ans une amélioration de la perception visuelle avec la qualité d'écriture. Chez les enfants de 7 à 9 ans, la vitesse d'écriture ainsi que l'amplitude, la fluidité et la pression sur le stylo augmentent lors de privation visuelle (Chartrel & Vinter, 2006). Avec l'automatisation du geste, la dépendance visuelle diminue progressivement (Tseng & Chow 2000 ; Ziviani & Wallen 2006 ; Graham & Weintraub 1996). Chez l'adulte, en l'absence de vision, les caractéristiques morphocinétiques de l'écriture demeurent invariantes. Lors de privation visuelle, l'arrangement spatial des mots sur la ligne horizontale est par contre affecté (Paillard, 1990).

Une **attention visuelle** soutenue est également nécessaire lors d'une tâche d'écriture sur une période prolongée (Amundson, 1992). Un faible empan d'attention risque de limiter l'entraînement à l'écriture, ce qui engendre une faible maîtrise de la formation des lettres (Feder & Majnemer, 2007). En effet, pour certains auteurs, les problèmes d'écriture seraient en partie associés à des difficultés d'attention (Adi-Japha et al., 2007). Les problèmes d'attention, même s'ils sont faibles, exposent les enfants à des difficultés académiques et pouvant mener au décrochage scolaire (Currie & Stabile, 2006 ; Pagani et al., 2008). À l'inverse, de bonnes capacités attentionnelles prédisent, dès la maternelle, la réussite scolaire ultérieure (Duncan et al., 2007). A notre connaissance, une seule étude s'est intéressée à la relation entre attention visuelle et performances d'écriture chez l'adulte

(Tucha, Mecklinger, Walita & Lange, 2006). L'attention visuelle était évaluée à partir de différentes tâches reposant sur un stimulus visuel (alerte, attention divisée, go/no-go, flexibilité, vigilance). Les résultats n'ont révélé aucune corrélation entre l'attention visuelle et la qualité et la vitesse d'écriture.

De nombreux facteurs propres à l'individu ont été révélés comme influençant les performances d'écriture. Néanmoins, l'écriture peut également dépendre de facteurs contextuels tels que le type d'enseignement suivi par l'apprenant.

3.2. Les facteurs contextuels

De nombreux exercices d'écriture permettent la mise en place de son apprentissage. Chez l'enfant d'âge préscolaire, l'introduction à la graphomotricité va se faire au travers d'exercices graphiques qui permettent l'émergence de diverses habiletés, tant sur le plan perceptivo-moteur que sur celui de la manipulation de symboles et de signes, sur lesquelles viendra se greffer l'apprentissage de l'écriture (Mackenzie, 2011). Dans une enquête réalisée en France et au Québec, des enseignants du *cycle 1* ont été questionnés sur leurs pratiques concernant l'enseignement de l'écriture (Bara, Morin, Montésinos-Gelet & Lavoie, 2011). Parmi les activités recensées, de nombreuses similitudes se retrouvent en France et au Québec. La majorité d'entre eux déclarent laisser les élèves travailler de façon assez autonome sur un cahier de calligraphie (79% pour les enseignants français et 89% pour les québécois), présenter un modèle de lettre au tableau que les enfants recopient (79% et 59%), enseigner le sens du tracé (89% et 85%) et insister sur la taille relative des lettres (84% et 74%). Ces résultats mettent en avant la variabilité des tâches proposées dans le domaine scolaire. Dans leur étude, Jones et Christensen (1999) se sont intéressés à l'effet d'une intervention d'un enseignant sur l'écriture d'enfants de 6-7 ans présentant des difficultés d'écriture. Le protocole, étendu sur une période de 8 semaines, consistait en un enseignement direct (individuel ou en petit groupe) sur le tracé des lettres accompagné d'activités telles que l'utilisation de points lumineux pour le point de départ et les arrêts, le tracé multiple d'une même lettre avec plusieurs couleurs (lettre « arc-en-ciel »), l'association visuelle pour faciliter la mémorisation de la forme (« w est comme un ver de terre ») ou la mise en pratique du tracé d'une lettre avec son corps (« dessine dans les airs la façon dont le s s'écrit », « saute autour du g sur le sol »). Afin d'évaluer l'effet de cette instruction, un test de l'alphabet a été réalisé en pré-test et post-test auprès du groupe

d'enfants présentant des difficultés d'écriture (groupe test) et d'un groupe d'enfants de même âge de lecture (groupe contrôle). Avant instruction, les performances d'écriture dans le groupe test sont inférieures à celles du groupe contrôle puis, après 7 mois d'instruction, les différences disparaissent. Ces résultats soulignent l'effet de l'enseignement sur les difficultés d'écriture.

Le **style d'écriture** à enseigner a donné lieu à de nombreux débats et a fait l'objet d'un certain nombre d'études. En France, l'écriture cursive est majoritairement enseignée dès les premiers apprentissages de l'écriture, alors que dans d'autres pays tels que les Etats Unis ou le Mexique l'écriture scripte prédomine. Une enquête réalisée auprès d'enseignants en France et au Québec permet d'étayer la différenciation des pratiques concernant le style d'écriture enseigné (Bara, Morin, Montésinos-Gelet & Lavoie, 2011). Parmi les 45 enseignants rencontrés, 18 enseignent le script en première année de cycle 1 au Québec alors que les autres préfèrent l'écriture cursive (9 au Québec et 18 en France). L'écriture scripte est plus rapide à exécuter et plus lisible par la simplification des traits, engendrant une acquisition du geste d'écriture plus rapide. Grâce aux caractères segmentés de l'écriture scripte, les enfants ont l'opportunité de prendre le temps d'anticiper le geste moteur de la lettre suivante. Cette simplification des caractères présente cependant un défaut perceptif pour les lettres miroirs (*p/q, b/d*) qui sont alors plus difficiles à discerner qu'en cursif (Paoletti, 1999). Dans l'écriture cursive, la distinction des lettres et leur enchaînement continu permettent d'accéder à une écriture plus rapide (Meulenbroek & van Galen, 1986) et à une amélioration de la fluidité du geste graphomoteur (Paoletti, 1999). Afin de contribuer à ce débat entre écriture scripte et cursive, Graham, Berninger et Weintraub (1998) ont comparé les performances d'écriture chez des collégiens écrivant en script ou en cursif ou les deux. Parmi les 600 élèves, ceux combinant les lettres scriptes et cursives ont présenté une vitesse d'écriture (nombre total de lettres copiées) supérieure à celle des deux autres groupes. D'après les auteurs, l'apprentissage d'une écriture mixte permettrait à l'enfant d'accéder en mémoire à l'allographe, script ou cursif, retrouvé en premier pour le reproduire le plus rapidement. Cependant, ce double apprentissage en début de scolarité engendrerait une surcharge cognitive ralentissant l'acquisition des autres composantes de l'écriture. C'est pourquoi, les deux styles d'écriture pourraient être enseignés non pas simultanément mais en commençant par l'écriture scripte, proche du dessin et des

caractères d'imprimerie retrouvés dans les livres, puis évoluant vers une écriture cursive pour pouvoir fluidifier le tracé.

De nombreuses études se sont intéressées à la façon dont le format de présentation de lettres pouvait inférer sur le tracé. Les modalités visuelles et verbales ont fait l'objet de recherches chez l'enfant typique depuis plusieurs décennies tandis que les travaux sur la modalité tactilo-kinesthésique sont beaucoup plus récents. La **modalité visuelle** est effectivement la modalité de présentation la plus étudiée dans le domaine de l'écriture. La démonstration visuelle des lettres a été étudiée par Berninger et collaborateurs (1997) chez 144 enfants de *grade 1* (CP) présentant des troubles de l'écriture. Chaque groupe reçoit un entraînement différent: 1) la copie d'une lettre écrite par un enseignant, 2) la copie d'un modèle avec pour indices visuels des flèches indiquant le départ et la direction des tracés, 3) la copie de mémoire d'un modèle statique (la lettre est masquée) ou 4) la copie de mémoire d'un modèle avec indices visuels. Les enfants ayant suivi l'entraînement bimodal (mémorisation avec indices visuels) présentent de meilleurs scores dans la tâche de l'alphabet (nombre de lettres rappelées de mémoire à l'écrit), la copie de phrase (nombre de lettres correctement formées) et la copie de texte (lettres, mots et qualité). Les auteurs défendent alors l'hypothèse que la combinaison multidimensionnelle de deux entraînements (mémorisation et visuel) permet une meilleure automatisation du geste graphomoteur. En effet, la représentation interne de la lettre de nature multimodale permet la libération des ressources en mémoire de travail pour la production de texte. La présentation d'un modèle visuo-dynamique en mouvement semble engendrer une amélioration de la fluidité du mouvement dans l'écriture. L'étude de Wright et Wright (1980) porte sur la copie de lettres chez 116 enfants du *grade 1* (CP). La moitié des enfants avait accès à un modèle dynamique grâce à un folioscope¹⁴ dans lequel le tracé de la lettre apparaît en faisant défiler rapidement chaque page du support. L'autre moitié des enfants utilisait un modèle statique de la lettre. Les résultats indiquent que l'entraînement avec le folioscope engendre de meilleurs scores en termes de lisibilité et de forme de la lettre. Dans leur étude, Hillairet de Boisferon, Bara, Gentaz et Colé (2007) se sont intéressés à l'impact d'un modèle visuel par rapport à un modèle dynamique écologique. Chaque séance se concentre sur une lettre selon le degré de complexité de la lettre : *a, i, r, l, t, p, b*. Dans les deux groupes de 22 enfants âgés de 5 à 6 ans, 1) une comptine est lue aux enfants et ouvre

¹⁴ Le folioscope, ou *flipbook*, est un petit livre d'images qui, feuilleté rapidement et en continu avec le pouce, donne l'impression d'une séquence animée.

sur une activité centrée sur le tracé et la forme de la lettre, 2) une activité d'identification sur poster d'images associées à la lettre, 3) une activité d'exploration et 4) un jeu de cartes avec des mots cibles. Un premier groupe « visuel-auditif-métaphonologique » d'enfants a été entraîné avec des lettres imprimées sur un morceau de papier collé sur une petite carte (1) et des lignes de lettres cibles parmi des distracteurs (3). Un second groupe « visuel-auditif-métaphonologique-biologique » a été entraîné selon les mêmes étapes mais avec une présentation du tracé séquentiel de la lettre sur un écran d'ordinateur. Les résultats révèlent un progrès de performances similaire entre les deux entraînements pour le test d'identification de phonèmes en position initiale et finale, pour le test d'identification de lettres et pour le test de décodage de pseudo-mots à partir des lettres entraînées. Dans cette étude, la forme de la lettre est présentée soit de façon statique (groupe VAM) soit de façon dynamique (groupe VAM-biologique). D'après ces résultats, l'effet de la démonstration visuelle ne dépendrait pas de sa conformité aux règles de production motrice. Les auteurs supposent alors que la perception visuelle des mouvements dépendrait des capacités motrices des sujets et de leur expérience visuelle. A l'âge de 5 ans, les enfants, ayant peu d'expérience avec l'écriture, ne tiennent pas compte des informations liées à la cinématique du mouvement, ils ne se limiteraient qu'à la forme visuelle du tracé de la lettre. Dans leur étude, Jolly et Gentaz (2013) se sont intéressés à l'écriture de lettres cursives auprès de 70 enfants de CP présentant des difficultés de tracé. Grâce à une tablette tactile, des vidéos de tracé de lettres ont été présentées. Les enfants entraînés avec la tablette présentent des tracés plus fluides comparativement aux enfants ayant suivi un entraînement similaire mais sur papier ou aucun entraînement. De plus, Berninger, Nagy, Tanimoto, Thompson et Abbott (2015) ont évalué l'effet d'un apprentissage numérique chez des enfants dysgraphiques de *grade 4* à 9 (CM1 à 3^{ème}) sur l'écriture de lettres. L'enseignement se réalise sur un support de tablette numérique (iPad) et comprend 5 étapes : 1) l'enfant observe l'animation en mouvement de la formation de la lettre, 2) il forme la lettre en maintenant les tracés à l'intérieur du contour de la lettre, 3) il copie la lettre présentée, 4) il écrit une nouvelle lettre qui est cette fois-ci dictée, 5) il écrit la lettre présentée avant et après celle dictée. L'efficacité du traitement sur l'écriture manuscrite est évaluée à partir du nombre de lettres de l'alphabet écrites lisiblement en un temps imparti et de la vitesse d'écriture par le test DASH (Barnett, Henderson, Scheib, & Schulz, 2007). Les résultats révèlent que l'entraînement à l'aide d'un outil numérique engendre une amélioration du niveau d'écriture.

De nombreux auteurs se sont également intéressés à la **modalité verbale** dans l'apprentissage des lettres (pour une revue : Bara & Gentaz, 2010). Les instructions verbales, ou *ductus*, présentent l'ordre et la direction selon lesquels on trace les traits composant la lettre. Dans son étude, Hayes (1982) s'est intéressé à l'impact de cette modalité de présentation sur l'écriture de pseudo-lettres chez 45 enfants de grande section de maternelle et 45 enfants de *grade 3* (CE2). Les enfants sont répartis selon différents entraînements. Le premier groupe copie les pseudo-lettres inscrites sur un tableau noir, sans instruction. Le second groupe reçoit une démonstration visuelle présentant la séquence de traits un à un, avant d'écrire la pseudo-lettre cinq fois. Une instruction visuelle similaire est donnée au troisième groupe avec une description verbale simultanée par un adulte. Enfin, le quatrième groupe regroupe la démonstration visuelle, la description verbale et une verbalisation par l'enfant. Dans les deux classes, les enfants du quatrième groupe ont réalisé des tracés de pseudo-lettres de meilleure qualité. Les résultats suggèrent que l'entraînement perceptif au cours d'une tâche de copie mène à une reproduction plus exacte des formes. Toutefois, tous les groupes ont de meilleures performances comparés à un groupe contrôle n'ayant subi aucune instruction. Ce résultat en faveur de l'apport d'instructions verbales se retrouve également chez l'enfant plus âgé. L'étude de Karlsdottir (1996) compare l'impact d'un exercice de copie de lettres à un exercice avec instructions verbales des caractéristiques des lettres auprès de 61 enfants de *grade 4* (CM1). L'amélioration de la qualité d'écriture n'est significative qu'avec l'entraînement verbal. Ce résultat suggère que l'apport d'instructions verbales permet de contrer les difficultés rencontrées par l'enfant en cours d'apprentissage grâce à la mise en place d'une automatisation du geste graphomoteur.

L'écriture de lettres peut également être enseignée par la **modalité tactilo-kinesthésique**, qui implique à la fois le toucher et la proprioception des mouvements. Dans leurs travaux, Longcamp et collaborateurs (2005, 2006, 2008) suggèrent que les gestes d'écriture impacteraient sur la mémorisation, la représentation et la reconnaissance visuelle des lettres. Des tâches impliquant des gestes présents dans l'acte d'écrire pourraient permettre une amélioration de son apprentissage. Vinter et Chartrel (2010) ont cherché à étudier l'apport d'un entraînement visuel, moteur et visuo-moteur sur la production de lettres cursives chez l'enfant d'âge préscolaire (5-6 ans). Dans le groupe « visual », l'enfant regarde 6 fois successivement la lettre en mouvement (préalablement écrite par un normo-

scripteur) et copie la lettre une fois à la fin des 6 présentations. Le groupe « motor » copie la lettre après présentation d'un modèle statique ; la séquence est reproduite 6 fois, pour chaque lettre. Dans le groupe « visual-motor » l'enfant observe une vidéo de la lettre écrite au préalable par un normo-scripteur, puis copie la lettre sur la feuille ; le tout est reproduit 6 fois, pour chaque lettre. Pour le groupe contrôle, la séquence est la même mais l'enfant copie la lettre qu'une fois à la fin des 6 présentations du modèle statique. Les entraînements visuels (« visual » et « visual-motor ») engendrent une diminution de la durée du mouvement et du nombre de pics de vitesse, et ce, dès la deuxième session pour le groupe « visual-motor ». Cette amélioration de la fluidité du mouvement peut être induite, selon les auteurs, par l'augmentation de la vitesse de tracé. Les moindres performances du groupe « visual » seraient liées à l'absence d'une répétition des capacités motrices impliquées dans l'exécution des trajectoires spécifiques. L'entraînement visuel engendre une meilleure qualité du tracé (évaluée par deux juges d'après la forme et la lisibilité de la lettre), et ce, grâce à l'observation visuelle du mouvement facilitant l'apprentissage des trajectoires. Le groupe « motor » présente une amélioration au niveau de la cinématique du mouvement par rapport au groupe contrôle. À l'aide de cet entraînement moteur, les enfants ont alors l'opportunité d'adapter leurs programmes moteurs selon les *feedbacks* visuel et proprioceptif. Dans le domaine tactilo-kinesthésique, l'enfant peut également interagir avec le modèle de la lettre en le touchant. Dans l'étude précédemment détaillée de Hillairet de Boisferon et collaborateurs (2007), un entraînement visuo-haptique a été proposé à un troisième groupe d'enfants de 5 à 6 ans. Dans le groupe « haptique-visuel-auditif-métaphonologique » (HVAM), une lettre mobile en plastique est manipulée lors de l'activité d'identification des lettres. Dans la tâche de manipulation des lettres, des grandes lettres en mousses puis des petites lettres en plastique sont distribuées. L'enfant doit suivre le sens de l'écriture indiqué par des flèches numérotées avec son index, puis le suivi de la lettre se fait les yeux fermés. Une tâche sans contrôle visuel de reconnaissance tactile de la petite lettre est ensuite proposée (figure 9). Tout comme dans le groupe VAM et VAM-biologique, il y a une amélioration au niveau de l'identification et du décodage de lettres grâce à l'entraînement HVAM. Au-delà de l'écriture manuscrite, le niveau de compréhension du principe alphabétique et de son utilisation sont évalués. De meilleures performances sont à noter pour le groupe HVAM au test de décodage de pseudo-mots par rapport au groupe VAM. D'après les auteurs, l'exploration visuo-haptique puis haptique serait plus efficace qu'une simple exploration visuelle grâce à une amélioration des connaissances des lettres, étant un

facteur prédictif du niveau de lecture. Cette amélioration du décodage serait due à une meilleure connexion entre les représentations des lettres et des sons associés, c'est-à-dire un double codage engendrant une activation plus rapide et automatique.



Figure 9. Exemple d'exercice visuo-haptique proposés par Hillairet de Boisferon et al., (2007). Photographie repérée à l'adresse <http://www.cndp.fr/bienlire/04-media/a-contribution.asp>

L'avantage d'un entraînement visuo-haptique (VH) par rapport à un entraînement visuel (V) est mis en évidence dans l'étude de Bara et Gentaz (2011). Deux entraînements sont proposés à des enfants de 5-6 ans et se composent de 4 exercices : identification de la lettre imprimée ou en mousse, exploration V ou VH, discrimination V ou VH, et copie de la lettre. L'exploration haptique conduit à une amélioration des performances dans une tâche de reconnaissance de la lettre et de copie de lettres comparativement au modèle visuel. Ces résultats confirment l'hypothèse d'un lien entre perception et action motrice dans les processus d'apprentissage de l'écriture. La représentation de la lettre ne se limiterait pas à la modalité visuelle mais serait également motrice. La qualité du tracé de lettres serait influencée par la qualité de la représentation mentale de la lettre dans le système moteur (Jolly, Palluel-Germain & Gentaz, 2013). Ceci rejoint les résultats de Longcamp et collaborateurs (2005, 2006, 2008) démontrant l'avantage d'un entraînement à l'écriture manuscrite par rapport à l'écriture tapuscrite pour la reconnaissance de l'orientation des lettres chez des enfants de 5-6 ans. Les études en imagerie cérébrale permettent de conforter ce lien entre production motrice et perception visuelle des lettres (pour une revue : Bara & Gentaz, 2010). En effet, la présentation visuelle d'une lettre permet d'activer chez l'adulte une zone dans le cortex prémoteur, même si l'individu n'écrit pas la lettre (Longcamp, Anton, Roth & Velay, 2003). Cependant, ce phénomène disparaît si les caractères ne sont pas précédemment appris, tels que des pseudo-lettres. Une représentation interne de la lettre serait nécessaire pour la reconnaissance sensorimotrice des objets manipulables. Chez l'enfant, l'apport des lettres en mousse permet alors de

rendre les lettres manipulables et ainsi consoliderait leur représentation associée au mouvement de tracé. Dans leur étude, Bara, Fredembach et Gentaz (2010) se sont intéressés à l'impact d'un entraînement visuo-haptique chez des enfants de grande section de maternelle. Comparativement à un entraînement visuel classique, l'entraînement (6 séances de 20-25min) avec 6 lettres en creux permet d'améliorer le sens du tracé des lettres lors d'une tâche de rappel à l'écrit, de copie des lettres avec modèle et après avoir observé l'expérimentateur les tracer. On note cependant des performances similaires entre les deux entraînements (classique et lettres en creux) pour la qualité de l'écriture et le niveau de décodage de pseudo-mots. Les auteurs ont alors proposé une deuxième expérience dans leur étude permettant de comparer l'effet d'un entraînement haptique selon le matériel utilisé. Des lettres en relief ont été fabriquées à partir de plaque en mousse rigide puis collées sur des supports en carton ; les lettres en creux sont similaires à la première expérience. Un test de reconnaissance visuelle avec modèle haptique et un test de reconnaissance haptique avec modèle visuel sont proposés à chaque enfant pour les 6 lettres en relief et 6 lettres en creux. Les résultats révèlent pour les deux tests une meilleure reconnaissance des lettres avec un entraînement utilisant les lettres en relief. Les auteurs suggèrent que cet avantage des lettres en relief est dû au fait que les enfants pouvaient manipuler la lettre en l'enveloppant dans leur main, permettant d'obtenir des informations sur la forme globale de l'objet. Le suivi de contour réalisé avec les deux types de lettres implique un coût de traitement élevé et peu rapide car les informations sont plus fines et séquentielles. L'exploration des lettres en relief engendre alors la mise en place d'une meilleure perception des lettres. L'effet d'une exploration orientée a été étudié par Labat, Magnan et Ecalle (2011). Des enfants de GSM présentant de faibles performances en reconnaissance de lettres ont bénéficié d'une exploration visuelle et auditive. Le groupe « visuo-haptique séquentiel libre » (VHsl) explorait la lettre creuse librement et sans contrainte. Le groupe « visuo-haptique séquentiel orienté » (VHso) découvrait progressivement la lettre creuse dans le sens conventionnel de l'écriture illustré par des points de couleur et des flèches de direction. Le groupe « visuo-graphomoteur séquentiel orienté » (VGso) n'explorait pas la lettre avec le doigt mais devait surligner la lettre avec un stylo en suivant le sens imposé. Les groupes VHso et VGso présentent de meilleures performances dans une tâche d'écriture de pseudo-mots dictés (nombre de lettres cibles correctement écrites) par rapport au groupe VHsl. L'exploration séquentielle orientée des lettres faciliterait alors la reconnaissance des lettres et leur correspondance entre

graphème-phonème. Cinq mois après ce premier post-test, le groupe VGso présente un avantage par rapport au groupe VHso. L'entraînement graphomoteur a permis à l'enfant de corriger son tracé, d'appliquer un contrôle en cours d'exécution ou sur la production finale. Les informations tactilo-kinesthésiques sollicités lors de l'entraînement VGso semblent plus efficaces car elles permettent l'installation d'une représentation procédurale. D'après les auteurs, le traitement graphomoteur serait plus adapté aux premiers apprentissages de l'écriture car il faciliterait l'élaboration et le maintien des connaissances lors de l'exécution du tracé.

Les performances d'écritures sont influencées par de nombreux facteurs individuels tels que l'âge, le genre, la tenue du stylo et le traitement perceptivo-moteur, et par des facteurs contextuels liés notamment aux pratiques d'enseignement. Toutefois, l'acquisition de l'écriture reste un exercice difficile pour une part importante de la population scolaire.

4. Troubles de l'écriture

Les troubles de l'écriture sont regroupés sous le terme de dysgraphie. Cependant la dysgraphie n'est pas répertoriée dans les classifications CIM-10 (1993), DSM-IV TR (2004) et DSM-5 (2013), soulignant le fait que la présence d'une altération de l'écriture n'est pas reconnue comme un syndrome distinct. Dans la littérature portant sur les troubles de l'écriture, il n'existe à ce jour aucun consensus sur la définition de la dysgraphie (pour une revue : Albaret, Kaiser & Soppelsa, 2013). Selon Ajuriaguerra, Auzias et Denner (1971), la dysgraphie serait liée à la déficience de la qualité de l'écriture, sans trouble neurologique ou intellectuel associé. D'après Alston (1985), elle est définie comme le dysfonctionnement graphique caractérisé par une absence de fluence et de niveau de maîtrise suffisants pour la prise de note rapide et des tâches autres que l'acte même d'écrire. La dysgraphie est définie par Rubin et Henderson (1982) comme une atteinte de la fonction graphique scripturale visible dans les composantes spatiales de l'écriture indépendamment des composantes morphosyntaxiques. D'après Hamstra-Bletz et Blöte (1993), elle représente un trouble du langage écrit affectant les composantes mécaniques de l'écriture intervenant chez un enfant d'intelligence normale, en l'absence de trouble neurologique ou de handicap perceptivo-moteur. De plus, selon certains auteurs, une distinction est faite entre dysgraphie et faible écriture manuelle. Par exemple, Smits-Engelsman, Niemeijer et van Galen (2001) proposent une caractérisation des faibles scripteurs par un score inférieur d'un écart-type à la

moyenne d'un test d'évaluation de l'écriture. La dysgraphie serait diagnostiquée à partir de deux écart-types en dessous de la moyenne. Pour d'autres auteurs, il n'existe pas de distinction entre faible écriture manuelle et dysgraphie. Dans cette perspective, Albaret, Kaiser et Soppelsa (2013) proposent une définition de la dysgraphie sous le terme de trouble de l'apprentissage de la graphomotricité, dont voici les critères : « 1. Les réalisations en écriture, évaluées par des tests standardisés passés de façon individuelle mesurant la qualité et la fréquence d'inscription de l'écriture, sont nettement au-dessous du niveau escompté compte tenu de l'âge chronologique du sujet, de son niveau intellectuel, de son niveau de développement psychomoteur général et d'un enseignement approprié à l'âge. Cela peut se traduire par une écriture lente, illisible, comportant des ratures et des formes de lettres irrégulières et variables, un geste manquant de fluidité et de régularité. 2. La perturbation décrite dans le critère [1] interfère de façon significative avec la réussite scolaire ou les activités de la vie courante faisant appel à l'écriture. 3. La perturbation n'est pas due à une affection médicale générale [...], ni à un trouble de l'acquisition de la coordination. » (Albaret, Kaiser & Soppelsa, 2013, p.157). Toute définition confondue, l'ensemble des études sur l'épidémiologie de la dysgraphie estime le nombre d'enfants dysgraphiques entre 5% et 33% d'élèves de primaire (pour une revue : Chartrel & Vinter, 2004). Plusieurs études mettent en avant que les garçons seraient plus touchés par la dysgraphie à raison de trois garçons pour une fille (Hamstra-Bletz & Blöte, 1993 ; Karlsdottir & Stefansson, 2002 ; Ziviani, 1984). A l'aide d'une évaluation de l'écriture par le test BHK, Smits-Engelsman, Niemeijer et van Galen (2001) se sont intéressés au niveau d'écriture chez 125 enfants allemands de *grade 4* (CM1) et *grade 5* (CM2). Les résultats révèlent que 67% des enfants sont classés parmi les bons scripteurs, 27% comme faibles scripteurs (1 écart-type en-dessous de la moyenne) et 6% sont dysgraphiques (2 écart-types). Le manque de consensus quant à la définition de la dysgraphie expliquerait la grande disparité entre les différentes données épidémiologiques. Au cours de la scolarisation, la proportion d'élèves dysgraphiques tend à diminuer (pour une revue : Albaret, Kaiser & Soppelsa, 2013). En particulier, les élèves faibles scripteurs passant dans le groupe des bons scripteurs sont ceux présentant de bonnes capacités dans le domaine de la motricité fine, l'intégration visuomotrice, la perception, l'attention visuelle et la lecture (Kaiser, 2009). Certains enfants éprouvent donc des difficultés à écrire, ce qui peut engendrer des conséquences néfastes sur leur scolarité. Ils doivent consacrer l'essentiel de leurs capacités attentionnelles à contrôler leur production de séquences de lettres, laissant ainsi peu de

ressources disponibles pour traiter les autres dimensions de la production écrite (Berninger et al., 1997; Fayol & Miret, 2005 ; Graham, Harris & Fink, 2000).

Des études se sont intéressées au contrôle moteur pouvant induire des difficultés d'écriture. Des erreurs de type spatial (forme, taille des lettres) sont plus nombreuses chez l'enfant dysgraphique, signe d'un déficit au niveau du contrôle spatial (Smits-Engelsman, Van Galen & Portier, 1994). Les études de Zesiger, Deonna et Mayor (2000) et Zesiger (2003) auprès d'enfants dysgraphiques suggèrent que l'origine des déficits peut se situer au niveau de la programmation motrice et/ou de l'exécution des patterns graphiques. L'évaluation numérique de l'écriture permet d'apporter des précisions quant à cette hypothèse. Dans l'étude de Rosenblum, Parush et Weiss (2003b), une tâche d'écriture de phrases a mis en évidence chez des enfants dysgraphiques des mouvements de stylo en l'air de plus grande durée et parcourant des trajets plus longs, ainsi que des temps plus courts en contact avec la surface d'écriture. Les auteurs concluent à un défaut d'élaboration du programme moteur qui engendrerait alors une utilisation excessive des informations visuelles pour produire les mouvements distaux. Le trouble dysgraphique pourrait également être lié à une difficulté à inhiber le bruit neuromoteur inhérent au fonctionnement biomécanique du système (Danna, Paz-Villagràn & Velay, 2013 ; van Galen, Portier, Smits-Engelmans & Schomake, 1993). Ces enfants auraient une mauvaise régulation des forces de contrainte spatiale du geste (Smits-Engelsman, van Galen & Portier, 1994). On peut ainsi observer chez les mauvais scripteurs une variabilité à la fois spatiale (irrégularité de la taille), temporelle (inconstance des temps d'exécution de chaque trait) et cinématique (variabilité de la vitesse en fonction du temps).

L'étude des troubles de l'écriture révèle chez les enfants dysgraphiques des déficits dans le contrôle moteur. Récemment, les déficits de l'écriture ont été étudiés également dans la population atypique, et ce, au travers de différents troubles neuro-développementaux. Après une présentation des principaux travaux révélant la présence d'une altération de l'écriture au sein de ces populations, nous nous attarderons sur les difficultés graphomotrices rencontrées dans la population T21.

4.1. L'écriture chez les enfants avec troubles neuro-développementaux

Il existe un lien entre les troubles de l'écriture et les troubles neuro-développementaux. Dans leur étude, van Hoorn, Maathuis, Peters et Hadders-Algra (2010) se sont intéressés aux performances d'écriture au sein de diverses populations présentant des troubles neurologiques dont l'évaluation dépendait de la présence d'un ou de plusieurs ensembles de signes neurologiques (posture et tonus musculaire, réflexes, mouvements involontaires, coordination et équilibre, manipulation fine, mouvements associés, systèmes sensoriels, fonction des nerfs craniens). Chez 200 enfants âgés entre 8 et 13 ans, les scores obtenus au BHK dépendraient de la présence et de la sévérité (simple ou complexe) des troubles neurologiques. La qualité d'écriture est meilleure chez les enfants sans trouble neurologique par rapport aux enfants avec un trouble neurologique mineur.

Parmi les troubles spécifiques associés à la dysgraphie, des travaux ont porté sur les troubles spécifiques d'apprentissage et les troubles du développement (pour une revue : Albaret, Kaiser & Soppelsa, 2013). Dans leur étude, Mogasale, Patil, Patil et Mogasale (2012) se sont intéressés au lien entre écriture et troubles des apprentissages chez 1101 enfants âgés entre 8 à 11 ans vivant en Inde. Parmi les 165 enfants présentant des troubles des apprentissages, 135 ont une dysgraphie, 121 une dyslexie et 114 une dyscalculie. Avec 76 enfants présentant les trois troubles, cette étude révèle une comorbidité entre troubles de l'écriture et troubles des apprentissages. Plus précisément, l'étude de Lam, Au, Leung et Li-Tsang (2011) réalisée auprès d'enfants dyslexiques scolarisés en Chine a permis de recenser des difficultés d'écriture caractérisée par une faible vitesse, des caractères plus grands et des erreurs importantes sur le nombre de traits. Chez l'enfant avec trouble de l'acquisition de la coordination (TAC) de 7 à 10 ans (n=22), l'écriture présente une lenteur d'exécution et une écriture moins lisible avec principalement un nombre élevé de lettres corrigées (Rosenblum & Livneh-Zirinski, 2008). De plus, dans l'étude de Chang et Yu (2010), 33 enfants dysgraphiques et TAC âgés de 6 à 8 ans présentent un grand nombre de changements de direction du tracé lors de l'apprentissage d'un nouveau caractère. Dans une récente étude, Huau, Velay et Jover (2015) se sont intéressés aux capacités graphomotrices chez 10 enfants avec TAC âgés de 8 à 10 ans. Dans une tâche de copie de texte, la qualité d'écriture des enfants avec TAC est inférieure à celle des enfants sans trouble. Lors d'une tâche d'écriture avec contrainte spatiale ou temporelle, les enfants avec TAC écrivent plus gros et avec une pression sur le stylo plus élevée que les enfants sans trouble. Les résultats

soulignent une grande variabilité intraindividuelle lors de l'écriture de lettre et de mot chez le groupe d'enfants avec TAC. Les auteurs suggèrent alors la présence d'un déficit dans la stabilisation du programme moteur avec un bruit neuromoteur atypique. Les résultats d'une autre étude récente (Rosenblum, 2015) permettent de souligner l'impact des capacités motrices sur les performances d'écriture chez 42 enfants avec TAC. Évalué par le M-ABC, les scores d'aptitude motrice prédisent entre 31 et 37% des mesures cinématiques de tracé lors d'une tâche de copie de texte sur tablette. L'écriture est une des habiletés scolaires pour laquelle les enfants ayant un trouble déficit de l'attention avec/sans hyperactivité (TDA/H) présentent également des difficultés (Racine, Majnemer, Shevell & Snider, 2008). Une tâche d'écriture chez l'enfant TDA/H révèle de nombreuses erreurs orthographiques, une lisibilité faible, une disproportion des lettres, une pression élevée et un plus grand nombre de corrections de lettres (Adi-Japha et al., 2007). Ces difficultés d'écriture seraient dues à une altération de la paramétrisation du programme moteur. Selon les auteurs, la vitesse d'écriture chez l'enfant avec TDA/H est élevée ou faible, correspondant à une difficulté d'adaptation aux exigences de la tâche (Re, Pedron & Cornoldi, 2007). Enfin, la prise de méthylphénidate permettant d'augmenter les capacités d'attention chez l'enfant TDA/H engendre une amélioration de la qualité d'écriture au détriment de la fluidité du mouvement caractéristique d'un contrôle rétroactif (Lange et al., 2007).

4.2. Les conduites graphomotrices dans la trisomie 21

Un état de la littérature relatif aux conduites graphomotrices des personnes T21 a fait l'objet d'un chapitre (Moy & Tsao, 2012) et d'un article (Tsao, Moy & Tardif, 2014).

Les activités graphomotrices telles que le dessin sont fondamentales dans la mesure où elles permettent à l'enfant de mettre en place diverses habiletés, tant sur le plan perceptivo-moteur que sur celui de la manipulation de symboles et de signes, sur lesquelles viendra se greffer l'apprentissage de l'écriture (Oken-Wright, 1998 ; Mackenzie, 2011). L'étude des habiletés graphomotrices révèle un retard au niveau des âges réels d'acquisition chez les enfants T21. La question est de savoir si ces décalages temporels reflètent un simple retard de développement ou s'ils sont accompagnés d'originalités procédurales en matière de programmation et d'exécution des tracés. L'analyse de dessins géométriques et/ou figuratifs (Barrett & Eames, 1996 ; Detable & Vinter, 2003 ; Tsao & Mellier, 2005) révèle des performances graphiques chez l'enfant et l'adolescent T21 comparables à celles d'enfants

au DT de même âge de développement confortant ainsi l'hypothèse d'une séquence et d'une structure similaires (Zigler et al., 1969 ; 1982 ; 1998). Concernant les habiletés graphiques, il semblerait que l'acquisition des premiers tracés (trait, rond, point...) soit obtenue avec une relative aisance. Les autres formes supposant l'utilisation et le contrôle des références externes (bord de la feuille) ainsi qu'une stratégie séquentielle et planifiée demandent un apprentissage plus complexe et plus long (Noack, 1997). L'étude de Barrett et Eames (1996) montre que l'évolution du dessin du bonhomme chez des enfants T21 repose sur une séquence développementale similaire à celle observée chez des enfants au développement typique. Les premiers dessins représentent un bonhomme additif composé de parties juxtaposées puis évoluent vers des dessins dans lesquels chaque partie est intégrée dans le contour de la silhouette. Néanmoins, l'analyse des productions dans diverses tâches de copie (figure géométrique fermée, figure géométrique ouverte, dessin du bonhomme segmenté et dessin du bonhomme sans contour) met en avant chez l'enfant avec T21 des productions de meilleure qualité pour les figures non représentatives. Ainsi, les performances au niveau de la maîtrise des unités graphiques sont préservées alors que des difficultés apparaissent au niveau de la coordination interfigurale nécessaire à la production de dessins plus élaborés. Toutefois, ces résultats ne sont pas corroborés par l'étude de Dykens, Rosner et Ly (2001) qui rapportent des performances comparables entre des dessins figuratifs (dessin du bonhomme) et géométriques. Concernant l'analyse des procédures graphiques dans des tâches de production de figures géométriques, certains travaux plaident là encore en faveur d'un développement similaire. La réalisation d'une figure géométrique est régie par l'application de règles syntaxiques (Goodnow & Levine, 1973 ; van Sommers, 1984) se référant aux règles de départ et de progression des tracés. L'application de cette grammaire d'action jouerait un rôle central dans le développement des actions graphomotrices en facilitant la fluidité du mouvement et la précision des tracés. Plusieurs travaux ont, en effet, montré que le non-respect de ces règles détériorait la production (Baldy, 2002 ; Meulenbroek, Vinter & Mounoud, 1993). Il s'avère que les enfants avec DI, dont la trisomie 21, appliquent ces règles de grammaire d'action et que leur évolution au cours du développement est similaire à celle observée en cas de développement typique (Detable & Vinter, 2003 ; Tsao & Mellier, 2005). Pour d'autres auteurs, l'absence de corrélation entre les habiletés graphiques et l'âge de développement chez l'enfant T21 est avancée comme un argument en faveur de l'hypothèse différentielle (Clements & Barrett, 1994 ; Cox & Maynard, 1998 ; Laws & Laurence, 2001). Néanmoins, il semble légitime de se demander si l'absence

de corrélation ne relève pas davantage d'une variabilité des domaines de compétence, c'est-à-dire d'une hétérochronie développementale, plutôt que d'une organisation spécifique des actions graphiques.

Quelques recherches attestent bien du fait que les personnes T21 sont capables d'écrire, et ce, même chez de jeunes enfants. Entre l'âge de 5 et 9 ans, certains enfants T21 sont capables de copier et/ou d'écrire des lettres ou mots familiers, tels que leur nom et prénom (Trenholm & Mirenda, 2006 ; Turner & Alborz, 2003). L'étude de Vaginay (1995), ayant porté sur 94 enfants T21 de 6 à 14 ans, montre qu'à partir de 10-11 ans, la majorité de ces enfants parviennent à écrire quelques mots familiers sans modèle (prénom de l'enfant, *maman*, *papa*). Leurs productions sont majoritairement écrites en majuscules et la majorité d'entre elles est définie comme correcte et lisible. Pour des énoncés plus longs et complexes (groupe nominal et phrase), le taux de réussite diminue sensiblement. Chez l'adulte, l'enquête de Trenholm et Mirenda (2006) montre que la grande majorité des adultes T21 âgés de 19 à 41 ans sont capables d'écrire. Cela va de l'écriture d'un mot ou du prénom jusqu'à l'écriture d'un courrier ou de réponses simples à des questions. L'étude de cas rapporté par Rondal (1995) apporte aussi quelques éléments. L'auteur y étudie les capacités d'expression écrite sous diverses conditions d'une adulte T21 dont le QI global est de 64. Il s'avère qu'elle peut composer et transcrire un message. L'analyse de ses productions spontanées révèle cependant certaines difficultés au niveau de la ponctuation et des aspects morpho-syntaxiques. En condition de dictée, les erreurs grammaticales (accord sujet-verbe non respecté) et les omissions ou additions de traits ou de lettres (*temp* à la place de *temps*, *solleil* à la place de *soleil*, *fêtes* à la place de *fêtes*...) sont fréquentes. Pour l'auteur, ces erreurs sont liées à des difficultés orthographiques et non à des perturbations du système allographique. En effet, celles-ci ne se retrouvent pas de façon systématique lors de dictée de phrases simples (« *les jolies roses sont dans le vase* »). Au niveau de l'exécution, les productions sont lisibles même si certaines lettres sont mal formées ou retouchées. Pour Rondal (1995), les composants périphériques de l'écriture chez l'adulte T21 sont préservés, l'analyse des productions n'ayant pas montré de dysfonctionnement au niveau des différents niveaux de traitement de l'écriture. Malheureusement, l'ensemble des recherches citées n'a pas fait l'objet d'analyse des tracés.

Plus récemment, les travaux de Tsao, Fartouk et Barbier (2011) se sont penchés sur l'analyse de la qualité des tracés. Les résultats obtenus au BHK (Charles et al., 2004) auprès

d'une population d'adultes T21 âgés de 18 à 35 ans indiquent des productions relativement similaires à celles d'enfants au DT de même âge de développement sur le plan de la qualité des lettres produites et de la vitesse de production. Les lettres produites sont lisibles et correctement formées. La rareté des substitutions de lettre confirme l'existence de capacités préservées au niveau de l'accès aux représentations allographiques. D'après les auteurs, ces données plaident en faveur d'un retard développemental, plutôt qu'un déficit spécifique à l'écriture. Les comparaisons basées sur l'âge chronologique des participants indiquent toutefois des différences significatives entre les deux populations. L'écriture d'adultes T21 est de moins bonne qualité. Elle est davantage marquée par la production de lettres cabossées, irrégulières et de grande taille. La gestion de l'espace graphique (ligne plane, marge à droite) est aussi plus difficile. Concernant la vitesse de copie, la rapidité d'exécution est plus réduite chez les adultes en situation de handicap. La récente étude de Varuzza, De Rose, Vicari et Menghini (2015) s'est intéressée à la production écrite mais également aux capacités de transcription écrite chez les personnes T21, les personnes présentant un syndrome de Williams (SW), comparativement à des enfants au DT de même âge de développement. Parmi les tâches proposées, la copie de texte évalue les habiletés graphomotrices. Les trois groupes ne diffèrent pas sur le nombre d'erreurs, l'orientation de la lettre, la pression et la taille de la lettre. Ces résultats rejoignent alors ceux présentés précédemment (Tsao et al., 2011) en faveur d'un retard de développement. Pour la tâche de dictée de mots et de pseudo-mots, le groupe T21 réalise plus d'erreurs que le groupe SW et le groupe au DT. Cependant, les erreurs sont de même nature phonologique et orthographique pour les trois groupes.

L'analyse temporelle des tracés réalisée par Tsao, Velay, Barbier et Gombert (2012) ne met pas en avant de différence significative entre des adultes T21 et des enfants au DT de même âge de développement sur le nombre et la durée des segments et des pauses ainsi que sur la durée totale des mouvements dans la production de lettres isolées et de mots familiers (*papa*). Ces données confirment la relative stabilité du geste graphomoteur impliqué dans la formation de séquences de lettres, même dans le cas où plusieurs lettres doivent être alignées. Les comparaisons basées sur l'âge chronologique des participants témoignent à nouveau de difficultés chez le groupe d'adultes T21 où la copie de lettres et de mots est marquée par une réelle lenteur comparativement aux adultes au DT. L'augmentation du nombre de pauses observée en situation de copie de lettres et de mots

chez des adultes T21 indique que les lettres sont générées par la juxtaposition de petits segments qui, accolés les uns aux autres, forment les différents traits constitutifs de la lettre. Ce type de procédure plaide en faveur de la prévalence d'un contrôle en cours d'exécution, ou rétroactif, des mouvements chez les adultes T21, mode de contrôle caractéristique chez l'enfant tout-venant en début d'apprentissage (Zesiger, 1995 ; Zesiger, Deonna & Mayor, 2000 ; Vinter & Zesiger, 2007). Cette organisation pas à pas observée dans les conduites graphiques est conforme aux recherches menées sur l'analyse des mouvements d'atteinte et de saisie suggérant ainsi une programmation du mouvement transversal à un ensemble de tâches visuo-motrices (Charlton, Ihsen & Oxley, 1996 ; Elliott, Welsh, Lyons, Hansen & Wu, 2006 ; Kearney & Gentile, 2003 ; Mellier & Elloy, 1998). En définitive, les travaux sur l'écriture chez des adultes T21 ne mettent pas en avant de déficit spécifique sur le plan de l'organisation spatiale et du contrôle du déroulement de la production écrite, mais pointent un délai important dans les étapes d'acquisition de l'écriture. Ces données viennent ainsi conforter l'hypothèse d'une séquence et d'une structure similaires, préalablement observées dans des tâches de dessin (Barrett & Eames, 1996 ; Detable & Vinter, 2003 ; Tsao & Mellier, 2005).

Ce second chapitre s'est intéressé à l'écriture en tant que capacité graphomotrice. Malgré l'essor des nouvelles technologies, l'écriture manuscrite demeure une activité quotidienne dans le cadre scolaire, et son apprentissage par l'enfant est une activité longue et complexe dont l'automatisation s'actualise au travers du passage d'un contrôle rétractif à un contrôle proactif. En outre, l'acquisition de l'écriture dépend d'un ensemble de facteurs individuels tels que l'âge, le genre, la tenue du stylo ou le traitement perceptivo-moteur, et de facteurs contextuels liés notamment aux pratiques d'enseignement. Par exemple, les performances d'écriture peuvent être améliorées chez l'enfant par une présentation visuelle du tracé de la lettre ou par des instructions verbales ou encore par l'exploration visuo-haptique de lettres en relief. Or, à ce jour, aucune étude n'a été réalisée chez les personnes T21 sur le rôle des facteurs individuels et/ou contextuels pouvant influencer les performances d'écriture. Nos études visent ainsi à analyser les facteurs prédicteurs du niveau d'écriture, le contrôle sous-jacent à la dynamique du tracé et les modalités de présentation de la lettre chez une population d'enfants et d'adultes T21. Le chapitre suivant présente la problématique de la recherche, ainsi que la population et le design expérimental.

Chapitre 3 - Présentation générale de la recherche

1. Problématique

L'écriture est un domaine d'étude ayant fait l'objet d'un certain nombre de recherches chez l'enfant et l'adulte normoscripteur. Bien que son apprentissage soit complexe, peu de travaux se sont attachés à étudier cette habileté graphomotrice dans le champ de la déficience intellectuelle et, en particulier, de la trisomie 21. Quelques recherches soulignent le fait que les personnes T21 sont capables d'écrire (Rondal, 1995 ; Trenholm & Mirenda, 2006 ; Turner & Alborz, 2003 ; Vaginay, 1995). Chez l'adulte T21, deux études ont porté sur l'analyse des tracés. L'étude de Tsao, Fartoukh et Barbier (2011) s'est intéressée aux habiletés d'écriture dans une tâche de copie de texte à partir d'un test standardisé (test BHK ; Charles, Soppelsa & Albaret, 2003). Les adultes T21 (18-35 ans) présentent un score global de qualité et une vitesse de transcription similaires aux enfants typiques (6 ans) de même âge de développement. La comparaison avec des adultes typiques de même âge chronologique révèle chez les adultes T21 une écriture penchée avec des mots serrés entre eux, de grandes lettres disproportionnées et retouchées ainsi qu'un tracé tremblant et lent. L'étude de Varuzza, De Rose, Vicari et Menghini (2015) a comparé l'écriture de personnes T21 (7-31 ans) à celle d'enfants typiques (6-7 ans) de même âge de développement au travers de différentes tâches. Concernant la copie de texte, une similitude des performances d'écriture entre les deux groupes est présente pour l'ensemble des critères que sont le nombre d'erreurs, l'orientation des lettres, la pression exercée sur la feuille et la taille des lettres. Au-delà de l'étude de la trace écrite, cette similarité entre les personnes T21 et celles d'enfants typiques a également été mise en évidence par l'analyse numérique de l'écriture. Une étude s'est intéressée aux caractéristiques dynamiques du tracé de lettres chez l'adulte T21 à l'aide d'une tablette graphique (Tsao, Velay, Barbier & Gombert, 2012). Par comparaison à des enfants typiques (6 ans) de même âge de développement, les performances d'adultes T21 (24 ans) sont similaires en termes de nombre de traits composant une lettre, de la durée du tracé, des pauses et de la durée totale des mouvements dans la production de lettres isolées et de mots familiers (*papa*). L'ensemble de ces études met en avant une similarité de conduites d'écriture entre des

personnes T21 et des enfants typiques de même âge de développement, à la fois au niveau des comportements observés et des processus cognitifs sous-jacents. Ces résultats rejoignent l'hypothèse d'une séquence et d'une structure similaires avancée par Zigler et collaborateurs (1969 ; 1982 ; 1998). Le niveau d'écriture dans la population T21 serait lié au retard développemental plutôt qu'à un déficit spécifique. A ce jour, aucune étude ne s'est intéressée à l'évolution de la trace écrite de l'enfant à l'adulte T21. Au regard de cet état de l'art, nous avons souhaité dans ce travail approfondir plus spécifiquement l'évolution des habiletés d'écriture au cours du développement dans la population T21. Les comparaisons basées sur l'âge chronologique ont mis en évidence des différences significatives entre les adultes T21 et tout-venants. Les productions écrites des adultes T21 sont de plus grande taille, décomposée en plus de traits, avec des pauses et levers de crayon plus fréquents et plus longs, une vitesse moins élevée avec une pression exercée sur le stylo plus importante (Tsao et al., 2012). Les résultats sur la dynamique du tracé graphomoteur plaident en faveur d'un contrôle rétroactif réalisé en cours d'exécution chez l'adulte T21. D'après le modèle proposé par Zesiger (2003) chez l'enfant typique, l'écriture peut être soumise à un contrôle rétroactif ou proactif. Au cours de l'apprentissage de l'écriture, le contrôle rétroactif prédomine et se réalise en cours d'exécution d'après les informations visuelles et tactilo-kinesthésiques (Mayor, Deonna & Zesiger, 2000). Le contrôle rétroactif entraîne alors un geste graphomoteur lent avec des couples d'accélération et de décélération, des pauses et une pression élevée. Puis, lors de l'automatisation de l'écriture vers 10 ans, le contrôle proactif se met en place induisant un mouvement rapide, fluide, sans pause, avec peu de pression. Tout comme pour l'analyse de la trace écrite, aucune étude n'a porté sur la dynamique de l'écriture chez l'enfant ou l'adolescent T21. Or, ceci permettrait de mieux appréhender la mise en place du geste graphomoteur dans la population T21. Par ailleurs, un certain nombre de travaux s'est interrogé sur le rôle de facteurs sur l'acquisition de l'écriture chez l'enfant. En effet, de nombreux facteurs propres à l'individu ont pu être mis en évidence chez l'enfant ou l'adulte typiques tels que l'âge chronologique (Berwick & Winickoff, 1996 ; Sage, 2010), le genre (Sage, 2010 ; Schneider et al., 2006), la prise du stylo (Braswell, Rosengren & Pierroutsakos, 2007 ; Stevens, 2008), la coordination de la motricité fine, l'intégration visuo-motrice, la perception visuelle et l'attention visuelle (pour une revue : Kaiser, Carrasco, Soppelsa & Albaret, 2013). Cet ensemble de facteurs dans la population typique souligne bien le caractère multidimensionnel de l'écriture manuscrite. Dans la population T21, aucune étude à ce jour n'a étudié l'impact d'un ou de ces facteurs

sur le niveau d'écriture chez l'enfant ou l'adulte T21. Or, déterminer quelles caractéristiques individuelles prédisent le niveau d'écriture permettrait une meilleure compréhension des mécanismes sous-jacents à l'écriture mais également, selon les facteurs, de proposer des pistes de remédiation auprès de la population T21.

Nous savons que les différents types d'enseignement influencent les habiletés d'écriture chez l'enfant normoscripteur (pour une revue : Bara & Gentaz, 2010). Parmi les pratiques classiquement utilisées dans le domaine scolaire, on dénombre une variété d'activités dont certaines diffèrent sur la façon dont le modèle d'une lettre peut être présenté auprès de l'apprenant. Ainsi, de nombreux travaux de recherche chez l'enfant typique ont étudié l'effet sur l'écriture de la présentation visuelle du tracé, des instructions verbales et, plus récemment, sur la perception tactilo-kinesthésique. La perception du tracé et de la forme de la lettre améliorent la qualité de l'écriture et une meilleure automatisation du geste graphomoteur chez l'enfant néoscripteur (Berninger et al., 1997 ; Jolly, Palluel-Germain & Gentaz, 2013). De plus, la modalité visuo-dynamique, consistant en la visualisation de la trajectoire du tracé et informant sur le point de départ, induit de meilleurs tracés en termes de fluidité du tracé et de mémorisation des lettres de l'alphabet chez l'enfant et l'adolescent typiques (Berninger, Nagy, Tanimoto, Thompson & Abbott, 2015 ; Jolly & Gentaz, 2013). Les auteurs suggèrent que la perception visuelle induirait une meilleure automatisation du geste graphomoteur grâce à l'implication concomitante de la mémorisation et de l'entraînement visuel. Les études sur l'impact d'instructions verbales corroborent l'hypothèse d'un effet de la présentation de la lettre sur l'écriture. L'étude de Karlsdottir (1996) s'est intéressée à l'effet d'instructions verbales sur l'écriture chez l'enfant de 6 à 9 ans. L'évaluation portait pour chaque lettre sur la forme, la taille, l'espace et l'alignement des lettres les unes par rapport aux autres. Les résultats révèlent une amélioration de la qualité d'écriture après l'introduction de consignes verbales. La modalité visuo-verbale a été étudiée par Hayes (1982) en présentant des instructions à la fois visuelles et verbales auprès d'enfants de 5 à 6 ans. Les résultats mettent en évidence une meilleure reproduction de la forme d'une pseudo-lettre lors de la présentation visuo-verbale par rapport aux instructions soit visuelles soit verbales. L'apport de la présentation de la lettre a également été approfondi dans l'étude de la modalité tactilo-kinesthésique. L'exploration visuo-haptique, caractérisée par la manipulation et l'exploration d'une lettre en relief, impacte également sur l'écriture chez l'enfant néoscripteur. Dans l'étude de Bara

et Gentaz (2011), l'entraînement haptique engendre une amélioration de la qualité globale de l'écriture dans une tâche de copie de lettres chez l'enfant de 5 à 6 ans (Bara & Gentaz, 2011). D'après l'ensemble de ces résultats, une perception (visuelle, verbale ou haptique) du tracé permettrait la mise en place d'une représentation mentale de la lettre chez l'enfant typique. Ces recherches appellent alors à un enseignement varié de l'écriture des lettres. Dans le domaine de la trisomie 21, les modalités de présentation et leurs effets sur l'écriture n'ont à ce jour pas été explorés. L'étude du phénotype dans la trisomie 21 souligne cependant un traitement visuospatial relativement préservé comparativement aux capacités langagières et motrices (Comblain & Thibaut, 2009 ; Vicari, 2006). Ceci amène à se questionner sur l'effet des différents types de présentation sur l'écriture chez les personnes T21. La modalité visuo-dynamique pourrait être bénéfique au geste graphomoteur par rapport à la modalité verbale ou haptique.

2. Objectifs généraux et hypothèses

Ce travail de recherche porte sur l'écriture manuscrite chez les personnes T21 en vue de caractériser la trace écrite chez l'enfant, l'adolescent et l'adulte T21, d'appréhender les processus en jeu impliqués dans le geste graphomoteur et d'étudier l'effet du contexte sur la dynamique du tracé. Trois objectifs principaux sont ainsi visés dans cette étude :

1. évaluer la qualité et la vitesse de transcription dans une tâche de copie de texte sur support papier/crayon et identifier les facteurs individuels prédictifs de ces habiletés d'écriture,
2. caractériser la dynamique du geste graphomoteur à l'aide du tracé de lettres sur une tablette graphique,
3. étudier l'effet des modalités de présentation visuelle, verbale et haptique de la lettre sur son tracé.

Afin d'étudier l'écriture, et son évolution au cours du développement, dans la population T21, il est nécessaire d'avoir recours à une comparaison avec la population typique. L'appariement de la population T21 à la population typique selon l'âge de développement permet de comparer les performances psychologiques d'un domaine particulier sur la base d'un niveau développemental équivalent entre les deux populations. Une comparaison selon l'âge chronologique vise à révéler les capacités et les incapacités dans la population atypique. Dans notre travail de recherche, ces deux comparaisons entre

population T21 et population typique permettront de savoir si l'écriture des personnes T21 se caractérise par un simple retard de développement ou par des déficits spécifiques qui peuvent être qualitativement spécifiés. D'après l'hypothèse d'une structure et d'une séquence similaires (Zigler et al., 1969 ; 1982 ; 1998), la population avec une déficience intellectuelle présenterait un développement lent mais reposant sur les mêmes étapes et structures que celles observées chez les enfants au développement typique. En effet, dans les travaux sur la trace écrite et la dynamique d'écriture (Tsao et al., 2011 ; 2012 ; Varuzza et al., 2015), les jeunes adultes T21 présentent des performances similaires à celles d'enfants typiques de même âge de développement. Dans nos trois études, une similarité des performances est ainsi attendue entre les participants T21 et les enfants typiques de même âge de développement. L'intérêt de ce travail de recherche est de s'intéresser aussi à l'évolution de l'écriture au cours du développement dans la population T21. Pour ce faire, les différentes études porteront sur l'écriture chez l'adulte T21 mais également chez l'enfant et l'adolescent T21. On s'attend ainsi à ce que les similarités avec la population typique soient présentes à tout âge dans la population T21. De plus, une amélioration des caractéristiques de l'écriture serait notable de l'enfant à l'adulte T21.

Pour chacune des trois études, les objectifs, les hypothèses, la méthode expérimentale et les résultats seront exposés dans le chapitre suivant.

3. Population de la recherche

Un groupe T21 et deux groupes au développement typique ont été recrutés. Dans un premier temps, l'échantillonnage s'est concentré sur la population T21 afin de pouvoir ensuite procéder au recrutement de la population contrôle. Le groupe AD comprend des enfants typiques de même âge de développement que le groupe T21 et le groupe AC se constitue d'enfants, d'adolescents et d'adultes typiques de même âge chronologique.

3.1. Caractéristiques du groupe T21

En vue d'étudier le développement de l'écriture avec l'âge auprès d'une population T21, nous avons recruté un échantillon composé d'enfants, d'adolescents et d'adultes dont voici les critères d'inclusion :

- Avoir reçu un diagnostic de la trisomie 21,

-
- Être âgé de moins de 40 ans dans le but d'exclure tout biais lié au vieillissement précoce de la population T21,
 - Être accueilli dans un service d'éducation ou d'accompagnement impliquant une prise en charge par une équipe pluridisciplinaire,
 - Avoir débuté l'apprentissage de l'écriture avec le tracé des premières lettres.

Le recrutement s'est fait par l'intermédiaire d'associations départementales (Alpes Maritimes, Var, Bouches-du-Rhône, Vaucluse et Hérault) affiliées à la fédération française *Trisomie 21* qui favorise la scolarisation en milieu classique, l'autonomie et l'insertion sociale et professionnelle. Jusqu'à l'âge de 20 ans, les participants sont pris en charge par un SESSAD (Service d'Education Spéciale et de Soins à Domicile), puis à l'âge adulte par un SAMSAH (Service d'Accompagnement Médico-Social pour Adultes Handicapés) ou un SAVS (Service d'Accompagnement à la Vie Sociale). Plusieurs semaines d'observation dans ces services auront permis de rencontrer les équipes de professionnels en vue d'anticiper la logistique des passations sur place et d'adapter au mieux le protocole expérimental. Des appels de participation ont été émis par l'ensemble de ces structures auprès de leurs membres et de leurs parents. Cependant, parmi les 28 individus recrutés, quatre ont été exclus de l'étude compte tenu de leur incapacité à réaliser les tâches requises dans cette étude ou à des troubles du comportement entravant la compréhension de l'exercice. La recherche porte alors sur une cohorte de 24 individus T21 âgés de 10 ans à 40 ans 10 mois (âge moyen = 20 ans 1 mois ; SD = 7 ans 11 mois). Pour évaluer l'effet du genre, une mixité a été privilégiée en recrutant un groupe composé de 13 personnes de genre masculin et 11 personnes de genre féminin.

En amont de ce travail de recherche, une enquête a été réalisée de façon à appréhender le goût pour l'écriture chez les participants T21, la perception qu'ils ont de leur propre écriture et les phénomènes gênants pouvant y être associés. Le questionnaire est inspiré du questionnaire de Santamaria et Albaret (1996) sur les troubles graphomoteurs chez des enfants d'intelligence supérieure et se compose de trois parties. L'intégralité du questionnaire ainsi que l'ensemble des résultats sont présentés en annexe A. La première partie porte sur l'intérêt dans le domaine de l'écrit ainsi que sur une autoévaluation de leur niveau d'écriture. Les réponses aux sept items se font selon une échelle en cinq points (de « jamais » à « tout le temps »). Afin d'adapter ce questionnaire à des personnes présentant une déficience intellectuelle, des smileys ont été ajoutés pour chaque niveau pour faciliter

la compréhension de la consigne. La seconde partie porte sur les différentes contraintes pouvant entraver l'écriture (six items à cocher) et la troisième partie permet d'évaluer l'intérêt et le rôle de l'écriture pour chaque participant (cinq items à cocher). D'après cette enquête, l'écriture est, chez la grande majorité des participants T21, un outil important à acquérir. Pour la plupart, les participants aiment écrire et sont motivés à améliorer leurs performances. Bien qu'ils évaluent leur écriture comme relativement bonne en termes de qualité et de vitesse, les répondants déclarent également des difficultés à accélérer, la présence de tremblements ou la nécessité de faire des pauses. Les résultats de cette enquête exploratoire nous ont permis de tenir compte des difficultés et besoins des participants T21 afin d'adapter au mieux le protocole expérimental.

Pour pouvoir évaluer l'âge de développement de personnes présentant une déficience intellectuelle de niveau modéré, telles que les personnes T21, le choix de l'échelle psychométrique est délicat (Sermier Dessemontet & Morin, 2012). En effet, la population T21 présente un déficit langagier, en particulier dans le langage expressif (Chapman, Seung, Schwartz & Bird, 1998). Il nous a paru plus judicieux de recourir à un test non verbal pour mesurer les compétences cognitives des personnes T21. L'évaluation des capacités cognitives a alors été réalisée à partir des matrices de Raven (Raven, Raven & Court, 1998) reposant sur la capacité d'observation immédiate et la clarté de raisonnement. Ce test non verbal implique l'aptitude « éductive » à s'adapter aux situations nouvelles et à élaborer des systèmes de pensée dans le maniement de problèmes complexes. Il existe différentes versions des matrices de Raven dont la version des Matrices Progressives Colorées (CPM ou PM47) qui est adaptée aux jeunes enfants typiques et aux personnes présentant une déficience intellectuelle. Cette version présente un matériel ludique par ses figures colorées et nécessite un temps de passation compris entre 15 et 30 minutes. La version CPM propose trois séries de douze items dont chaque item correspond à un pattern abstrait coloré et incomplet. Le participant doit alors le compléter en indiquant avec le doigt la figure qui convient parmi les six présentées. Les séries sont de difficulté croissante et porte successivement sur 1) l'identité et les différences dans les patterns continus, 2) le traitement de figures discontinues organisées spatialement, 3) la manipulation des modifications analogues dans des figures organisées spatialement et logiquement. Pour la cotation, un score de 1 est attribué pour chaque figure correctement pointée, le score maximal étant de 36. L'étalonnage français de la version CPM des matrices de Raven a porté sur 1 064 enfants

âgés de 3 ans 9 mois à 11 ans 8 mois. A l'aide des données normatives de cette population typique (tableau CPM 9.1, p.58 du manuel des matrices CPM de Raven, 1998), il est alors possible d'établir une estimation de l'âge de développement du participant par rapport à son score global et le score obtenu au 50^{ème} percentile de la population d'étalonnage. Pour quatre participants T21, le score est compris entre le 25^{ème} et le 50^{ème} percentile de la tranche d'âge « 4 ans » (3 ans 9 mois – 4 ans 2 mois) ; un âge de développement de 3 ans 9 mois est alors attribué. A partir de ces mesures, les 24 participants de la cohorte T21 présentent un âge de développement compris entre 3 ans 9 mois et 9 ans 6 mois, d'une moyenne de 5 ans 10 mois (ET = 1 an 8 mois). Afin de visualiser en détail l'étendue des âges chronologiques et des âges de développement du groupe T21, la figure 10 présente chaque participant en fonction de son âge chronologique, de son âge de développement et de son genre.

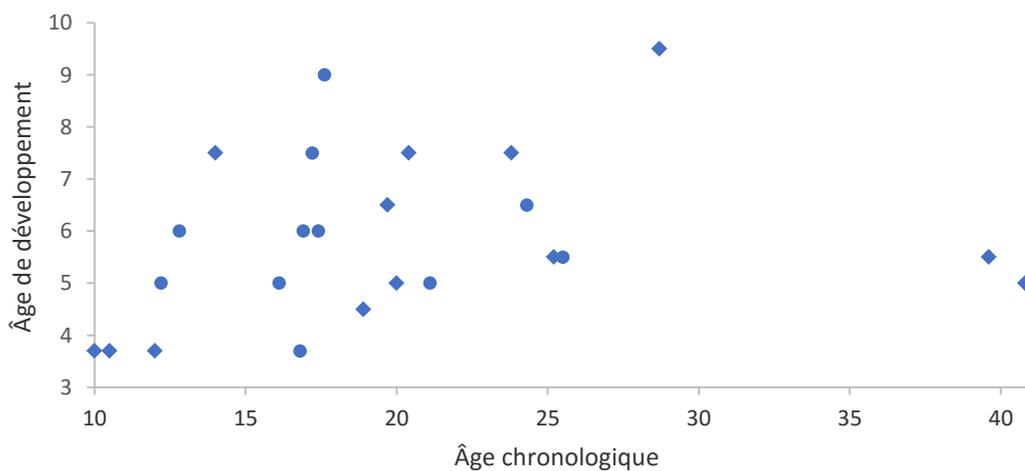


Figure 10. Dispersion de l'âge chronologique et de l'âge de développement des 24 participants du groupe T21 de genre masculin (◆) et féminin (●).

Les caractéristiques individuelles du groupe T21 sont présentées ultérieurement dans les tableaux 5 et 6 (cf. 3.2) avec celles des deux groupes au développement typique.

3.2. Caractéristiques du groupe AD et du groupe AC

Apparier les participants T21 à un groupe contrôle à partir d'un âge moyen risquerait de baisser les comparaisons compte tenu de la disparité observée au sein de notre groupe de participants T21 (figure 10). Afin de tenir compte de cette variabilité interindividuelle, nous avons fait le choix d'un appariement individuel. Deux groupes contrôles au développement typique ont alors été constitués. Pour le groupe apparié selon l'âge de développement, un participant au développement typique est recruté sur la base du genre

et de l'âge de développement de chacun des 24 participants du groupe T21. De même, pour le groupe apparié selon l'âge chronologique, chaque participant typique est recruté en fonction du genre et de l'âge chronologique de chacun des membres du groupe T21. Ainsi, comme explicité dans le tableau 5, chaque participant T21 sera apparié individuellement à un participant typique de même âge de développement et à un participant typique de même âge chronologique.

Tableau 5. Genre, âge de développement et âge chronologique des 24 participants T21, et âge chronologique des participants du groupe AD et du groupe AC.

N° participant	Genre	Groupe T21		Groupe AD	Groupe AC
		Âge de dév.	Âge chrono.		
1	M	3,7	10,0	3,5	9,9
2	M	3,7	10,5	3,5	11,3
3	M	3,7	12,0	3,5	11,6
4	F	5,0	12,2	4,8	12,2
5	F	6,0	12,8	6,1	12,2
6	M	7,5	14,0	7,5	14,0
7	F	5,0	16,1	5,0	16,7
8	F	3,7	16,8	3,3	17,4
9	F	6,0	16,9	6,3	17,6
10	F	7,5	17,2	7,0	17,7
11	F	6,0	17,4	6,6	17,9
12	F	9,0	17,6	8,8	18,9
13	M	4,5	18,9	4,8	19,0
14	M	6,5	19,7	6,8	19,3
15	M	5,0	20,0	4,5	19,9
16	M	7,5	20,4	7,6	20,3
17	F	5,0	21,1	5,2	23,8
18	M	7,5	23,8	7,8	24,5
19	F	6,5	24,3	7,1	27,0
20	M	5,5	25,2	5,2	24,6
21	F	5,5	25,5	5,5	25,9
22	M	9,5	28,7	9,2	27,9
23	M	5,5	39,6	5,3	38,4
24	M	5,0	40,8	4,9	38,6

Note. Groupe T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; Groupe AD : groupe au développement typique de même âge de développement ; Groupe AC : groupe au développement typique de même chronologique ; M : genre masculin ; F : genre féminin.

Les caractéristiques générales du groupe T21 et des deux groupes typiques sont présentées dans le tableau 6. Le groupe typique de même âge de développement (n=24) est âgé en moyenne de 5 ans 10 mois (ET = 1 an 8 mois). Le groupe typique de même âge chronologique (n=24) présente un âge moyen de 20 ans 4 mois (ET = 7 ans 7 mois).

Tableau 6. Caractéristiques du groupe T21 et des 2 groupes typiques AD et AC.

	Groupe		
	T21	AD	AC
Effectif	n = 24	n = 24	n = 24
Genre	13M / 11F	13M / 11F	13M / 11F
Âge moyen ± écart-type	Âge de développement 5,8 ans ± 1,6	5,8 ans ± 1,6	-
	Âge chronologique 20,1 ans ± 7,9	-	20,3 ans ± 7,6

Note. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AD : groupe au développement typique de même âge de développement ; AC : groupe au développement typique de même chronologique.

Pour tous les participants scolarisés en maternelle, primaire, collège ou lycée, le recrutement s'est fait par l'intermédiaire d'établissements scolaires de l'académie d'Aix-Marseille. Le groupe d'adultes (à partir de 20 ans) se compose de salariés exerçant dans divers secteurs professionnels. Nous avons veillé à ne pas recruter d'individus dont l'activité professionnelle reposait sur un recours quotidien à l'écriture manuscrite.

3.3. Procédure de consentement

Une lettre d'information présentant les objectifs et le protocole de recherche a été distribuée à chaque participant ou à son représentant légal. Par la suite, un formulaire de consentement a été présenté, reprenant les normes des *Ethical Principles of Psychologists and Code of Conduct* (APA, 2010). Ce formulaire précise qu'il est possible d'interrompre à tout moment la participation, que les données recueillies sont strictement confidentielles et que la publication des résultats sera anonyme. Ce formulaire a été signé par l'ensemble des participants ou leurs représentants légaux. Les modèles de la lettre d'information et du formulaire de consentement sont répertoriés en annexe B. Pour les participants majeurs du groupe T21, la lettre d'information et le formulaire de consentement ont été écrits de façon plus succincte pour permettre aux participants potentiels de mieux comprendre les objectifs et modalités de l'étude.

4. Design expérimental

Le dispositif de recherche comprend trois études auxquelles les trois groupes T21, AD et AC ont participé :

- **L'étude 1** porte sur le niveau d'écriture et ses facteurs prédicteurs. Elle se compose d'une tâche d'évaluation du niveau d'écriture (test BHK ; Charles, Soppelsa & Albaret, 2003) réalisée au cours de la première séance. Les facteurs prédicteurs étudiés sont l'âge de développement, l'âge chronologique, le genre, la préhension du stylo et le traitement perceptivo-moteur. L'évaluation du traitement perceptivo-moteur est réalisée à l'aide de quatre subtests de la NEPSY I (Korkman, Kirk & Kemp, 2003) portant respectivement sur la coordination de la motricité fine, l'intégration perceptivo-motrice, le contrôle visuo-moteur, l'attention visuelle. L'ordre de passation de ces évaluations est réparti de façon aléatoire au cours de 4 séances.
- **L'étude 2** consiste en l'analyse dynamique de l'écriture à l'aide d'une tâche de tracé spontané, c'est-à-dire sans modèle, de 6 lettres cursives dont 3 sont faciles et 3 difficiles d'après leur complexité motrice et leur fréquence dans la langue française. L'ordre de présentation des 6 lettres est contrebalancé entre chaque participant.
- **L'étude 3** examine l'impact des modalités de présentation de la lettre sur la dynamique du tracé. La tâche comprend la présentation du modèle de la lettre selon quatre modalités (dynamique, verbo-statique, verbo-dynamique, haptique) puis le tracé de la lettre sur une tablette graphique. Les quatre modalités sont comparées à une modalité contrôle ne donnant aucune information sur le point de départ ni la trajectoire (modalité statique). L'ensemble des modalités de présentation sont distribuées aléatoirement.

Chaque participant a été rencontré individuellement au cours de 5 ou 6 séances selon le groupe, chacune étant espacée d'au moins une semaine. Le protocole expérimental a été élaboré de façon telle que chaque séance dure 30 minutes au maximum pour ne pas solliciter en excès le participant, en particulier les personnes T21 et les jeunes enfants du groupe typique. Pour le groupe T21, une séance supplémentaire a été ajoutée afin d'évaluer le niveau cognitif du participant T21 à l'aide de la version CPM des matrices de Raven (voir 3.1.). Le recrutement et les passations ont été réalisés auprès des trois groupes dans l'ensemble de la région PACA et de janvier 2013 à avril 2015.

Chapitre 4 - Etudes expérimentales

Etude 1 : évaluation du niveau d'écriture et de ses facteurs prédictifs

Cette étude a fait l'objet d'un article sur les facteurs prédictifs du niveau d'écriture chez les personnes T21 (Moy, Tardif & Tsao, 2016).

1. Objectifs et hypothèses

Le premier objectif de cette étude porte sur l'évaluation du niveau d'écriture chez les personnes T21 comparativement à la population typique. Dans la littérature, quelques études ont évalué les conduites d'écriture chez le jeune adulte T21 (Tsao et al., 2011 ; 2012 ; Varuzza et al., 2015). Bien que les résultats aient porté sur différentes mesures (qualité et vitesse de transcription, nombre d'erreurs, orientation de la lettre, indices dynamiques sur tablette graphique), ceux-ci ont révélé des performances d'écriture similaires aux enfants typiques de même âge de développement et inférieures à celles de même âge chronologique. Ces données suggèrent un retard de développement dans la population T21. A ce jour, aucune étude ne s'est attachée à l'évolution du niveau d'écriture de l'enfant à l'adulte T21. La question est de savoir si les caractéristiques du geste graphomoteur observées chez l'adulte T21 se retrouvent selon des patterns équivalents chez l'enfant et l'adolescent T21. D'après l'hypothèse d'une séquence et d'une structure similaires avancée par Zigler et collaborateurs (1969 ; 1982 ; 1998), la population avec déficience intellectuelle présenterait un développement lent mais similaire à celui de la population typique de même niveau de développement cognitif. Au regard de ces travaux, nous nous attendons à ce que le score de qualité ainsi que la vitesse de transcription évalués à partir d'un test standardisé (test BHK ; Charles, Soppelsa & Albaret, 2003) des participants T21 soient semblables à ceux des participants typiques de même âge de développement et inférieurs à ceux du groupe de même âge chronologique.

Le second objectif est de mieux comprendre la contribution de facteurs individuels dans la qualité et la vitesse d'écriture dans la population T21. De nombreux facteurs propres à l'individu et pouvant influencer ses capacités d'écriture ont été mis en évidence dans la population typique : l'âge chronologique, le genre, la position de la main, la tenue du stylo, le niveau de coordination de la motricité fine, d'intégration visuo-motrice, de perception visuelle ou d'attention visuelle. A notre connaissance, aucune étude ne s'est intéressée à l'influence de ces facteurs sur les habiletés d'écriture chez les enfants ou adultes T21. Notre second objectif vise alors à identifier les facteurs prédictifs de la qualité et de la vitesse d'écriture parmi l'âge chronologique, l'âge de développement, le genre, la tenue du stylo, les performances de coordination de la motricité fine, d'intégration visuo-motrice et d'attention visuelle. L'étude du phénotype de la population T21 a mis en évidence des difficultés dans le développement moteur, en particulier dans les tâches de motricité fine (Charlton, Ihsen & Lavelle, 2000 ; Kearney & Gentile, 2003). Les résultats de l'étude 1 sur les facteurs prédictifs devraient mettre en avant l'importance des habiletés motrices dans l'écriture, tout particulièrement pour la coordination de la motricité fine et l'intégration visuo-motrice.

2. Méthode

2.1. Population

Les caractéristiques de la population recrutée dans ce travail de recherche sont présentées dans le chapitre 3 de la méthode générale (cf. 3.1 et 3.2). Pour la tâche d'évaluation de la qualité et de la vitesse d'écriture, seule une partie du groupe AD (n=11) a pu réaliser la tâche. En effet, un certain nombre de participants du groupe AD n'ont pas réussi à copier le texte du test BHK, en raison notamment de leur jeune âge (moins de 5,5 ans). Pour l'évaluation du traitement perceptivo-moteur, la totalité des trois groupes a pu participer.

2.2. Dispositif expérimental

Comparativement à une analyse globale de l'écriture, l'analyse analytique permet une évaluation plus objective et moins coûteuse en termes de temps. Parmi les évaluations analytiques de l'écriture, le test BHK est l'un des tests couramment utilisés dans la littérature, tant auprès de la population typique que d'échantillons présentant des difficultés

importantes sur le plan de l'écriture. Ce test conçu pour l'évaluation de l'écriture chez l'enfant de 6 à 12 ans est choisi compte tenu de l'âge de développement de notre population T21 et des difficultés d'écriture précédemment rapportées chez l'adulte T21. Il consiste en la copie d'un texte à difficulté croissante sur une feuille A4 blanche avec un stylo bille. La copie est réalisée durant un temps chronométré de 5 minutes - ou au-delà si le participant n'a pas écrit au minimum les cinq premières lignes du texte. Le test BHK a été administré individuellement à chaque participant et permet d'évaluer la qualité et la vitesse d'écriture.

Au total, treize critères composent le **score total de qualité**. Plus le score est bas, plus l'écriture est de meilleure qualité. Les critères 1 et 2 s'évaluent sur l'ensemble du texte copié ; les autres critères sont déterminés au niveau des 5 premières lignes. Voici le détail de chaque critère tel que présenté dans le BHK (version française ; Charles, Soppelsa & Albaret, 2003) :

- 1) Écriture grande. Il faut déterminer sur tout le texte copié la taille moyenne des lettres troncs (*a, c, e, i, m, n, o, r, s, u, v, w, x*) puis l'associer au niveau scolaire du participant (du CP au CM2). Un score compris entre 0 et 5 est alors obtenu.
- 2) Inclinaison de la marge vers la droite. Ce critère détermine l'inclinaison du texte en utilisant la position de la première lettre du premier paragraphe et de celle du dernier paragraphe. Le score varie entre 0 si la marge est peu inclinée et 5 si elle est fortement inclinée.
- 3) Lignes non planes. Une droite est tracée entre la première et la dernière lettre de chaque ligne. La présence (1 point) ou l'absence (0 point) de lettres « dansantes » sans base rectiligne par rapport à la ligne sont alors notées.
- 4) Mots serrés. Ce critère concerne l'espacement entre deux mots. S'il est trop petit, une note de 1 point est attribuée pour la ligne. S'il y a au moins une largeur de lettre pour tous les espaces, la ligne est notée 0.
- 5) Écriture chaotique. L'écriture est chaotique lorsque la trace n'est pas fluide, avec de longs liens, des angles aigus ou des changements de direction. Pour chaque ligne, la note est de 1 si l'écriture est chaotique et de 0 si elle ne l'est pas.
- 6) Liens interrompus entre les lettres. Un lien interrompu est caractérisé par un changement de direction, un grossissement d'un point de la trace, un espace ou une absence de lien. Une note de 1 est attribuée en cas de lien interrompu dans la ligne, sinon on note 0.

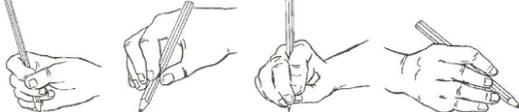
- 7) Télescopages. Il y a télescopage lorsque l'espace entre deux lettres est si petit qu'elles se superposent. Une note de 1 est alors attribuée à la ligne s'il y a télescopage, sinon on note 0.
- 8) Variations dans la hauteur des lettres troncs. Sur une ligne, la hauteur de la plus petite lettre tronc et celle de la plus grande sont déterminées. Si la hauteur de la plus grande est anormalement élevée (d'après le tableau de correspondance), une note de 1 est attribuée. Sinon, on note 0 pour la ligne.
- 9) Hauteur relative incorrecte des différentes sortes de lettres. Si les lettres troncs sont la même taille que les lettres non-troncs (*b, d, f, g, h, j, k, l, p, q, t, y, z*), une note de 1 est attribuée à la ligne. Sinon, on note 0.
- 10) Distorsion des lettres. Il y a distorsion lorsqu'une lettre a une forme qui ne fait pas partie des formes standards de l'alphabet, tels que des changements de directions inhabituels ou des tracés supplémentaires. En cas de distorsion, une note de 1 est attribuée, sinon on note 0 pour la ligne.
- 11) Formes de lettres ambiguës. Une lettre est ambiguë si les ressemblances ou différences avec d'autres lettres ne sont pas respectées (ex. *m* et *n*). En cas de lettre ambiguë, une note de 1 est attribuée à la ligne, sinon on note 0.
- 12) Lettres retouchées. Lorsqu'une lettre est retouchée, le tracé est réécrit pour améliorer la forme de la lettre, une note de 1 est alors attribuée. Sinon, on note 0 pour la ligne.
- 13) Mauvaise trace écrite, hésitations et tremblements. Des irrégularités de la trace écrite avec principalement un tracé tremblant seront notées 1 pour la ligne. Sinon, on note 0.

La **vitesse d'écriture** est mesurée en comptabilisant le nombre de caractères écrits (mots, ponctuation, apostrophes) au cours des 5 premières minutes de copie du texte.

Afin d'évaluer le rôle de différents facteurs sur la qualité et la vitesse d'écriture, une série de variables a été choisie : l'âge de développement, l'âge chronologique, le genre, la préférence manuelle, le niveau de maturité de préhension du stylo, la coordination de la motricité fine, l'intégration visuo-motrice et l'attention visuelle. L'**âge de développement** des participants T21 est évalué à l'aide de la version CPM des matrices de Raven (cf. 3.1 du chapitre 3), l'**âge chronologique** est calculé à partir de la date de naissance du participant renseignée dans le formulaire de consentement. Lors de la passation du test BHK, l'examineur note la **préférence manuelle** (droitier ou gaucher) ainsi que le **type de tenue du stylo** selon 3 niveaux de maturité illustrés par des exemples dans le tableau 7.

Lors d'une prise immature, le stylo peut être maintenu par la main dans le prolongement du poignet raide ou être appuyé sur la paume, le geste étant essentiellement lié au mouvement du bras. Pour une position intermédiaire, les doigts tendus serrent fort le stylo qui peut être placé entre l'index et l'auriculaire, ou avec le pouce par-dessus les autres doigts, ou encore entre le pouce, l'index et le majeur (trépied) mais de façon statique. Le mouvement est ici lié au mouvement de l'avant-bras. Une prise mature permet un maintien du stylo par la pointe des doigts et par le pouce : c'est le trépied dynamique. Tout le mouvement réside à ce niveau dans celui des doigts plutôt que celui de la main, de l'avant-bras ou du bras.

Tableau 7. Exemples de tenue du crayon en position immature, intermédiaire et mature. Issu du subtest « précision visuo-motrice » (NEPSY I, 2003).

Tenue	Exemples illustrés
Immature	
Intermédiaire	
Mature	

Quatre subtests de la NEPSY I (Korkman, Kirk & Kemp, 2003) ont permis d'évaluer les capacités dans le traitement perceptivo-moteur :

- La **coordination de la motricité fine** est évaluée par le subtest « imitation de la position des mains ». Il porte sur l'aptitude à imiter des positions de mains ou de doigts à partir d'un modèle. Douze positions différentes (exemples en figure 11) pour la main dominante et pour la main non-dominante sont proposées au participant. Un score de 1 est attribué lorsque la position est correctement réalisée selon l'examineur. On obtient alors un score total pouvant atteindre au maximum 24.

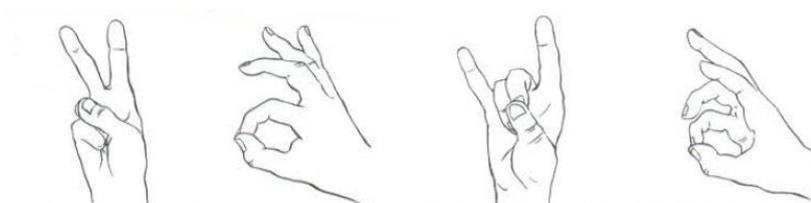


Figure 11. Exemples de position de la main à reproduire avec la main dominante et la main non dominante. Issu du subtest « imitation de la position des mains » (NEPSY I ; Korkman, Kirk & Kemp, 2003).

- Le niveau d'**intégration perceptivo-motrice** est estimé par le subtest « copie de figures ». Cette tâche permet de mesurer les capacités graphomotrices en reproduisant une série de figures abstraites (exemples en figure 12). Pour chacune des 18 figures, quatre critères variant d'une figure à l'autre permettent d'attribuer un point lorsqu'un critère est correctement atteint, soit quatre points au maximum.

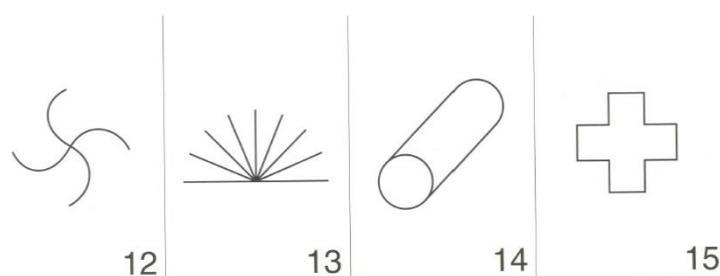


Figure 12. Exemples de figures géométriques bi-dimensionnelles à recopier. Issu du subtest « copie de figures » (NEPSY I ; Korkman, Kirk & Kemp, 2003).

- Le **contrôle visuo-moteur** est évalué par le subtest « précision visuo-motrice ». Cette tâche permet d'évaluer la vitesse de motricité fine et la précision de coordination oculomotrice en suivant le plus rapidement possible un parcours à l'aide d'un stylo. Deux planches (exemple en figure 13) ont été évaluées en notant pour chacune le temps de réalisation en secondes ainsi que le nombre d'erreurs, c'est-à-dire lorsqu'il y a un tracé non continu ou hors d'un segment du parcours. En additionnant les valeurs des deux planches, deux scores de durée et d'erreurs sont établis, qui, en les faisant correspondre dans la table A3 du manuel de la NEPSY I (Korkman, Kirk & Kemp, 2003) permettent de fixer le score général au subtest.

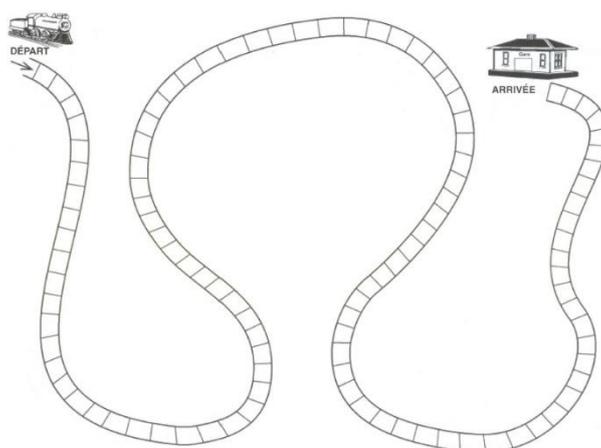


Figure 13. Exemple de chemin à tracer à l'aide d'un stylo. Issu du subtest « précision visuo-motrice » (NEPSY I ; Korkman, Kirk & Kemp, 2003).

- L'**attention visuelle** est évaluée grâce au subtest « attention sélective ». Cette tâche permet d'évaluer la vitesse et la précision permettant le maintien de l'attention à l'aide

de stimuli visuels à retrouver dans une planche de dessins. A partir de planches de dessins (exemple en figure 14), on note la durée totale de l'exercice ainsi que le nombre d'items trouvés soustraits au nombre de fausses alarmes. A l'aide de la table A2 du manuel de la NEPSY I (2003), un score global est attribué à chaque participant.

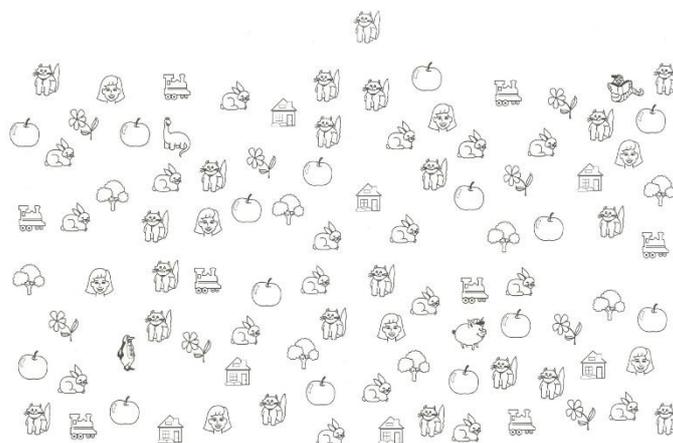


Figure 14. Exemple de planche à parcourir afin de localiser un élément cible (l'image du chat). Issu du subtest « attention visuelle » (NEPSY I ; Korkman, Kirk & Kemp, 2003).

2.3. Recueil et traitement des données

Parmi les outils de mesures choisis dans cette étude, le test BHK et les différents subtests de la NEPSY sont des tests étalonnés. La cotation permet alors d'obtenir pour chaque participant une note brute pour les variables suivantes : qualité d'écriture, vitesse d'écriture, coordination de la motricité fine, intégration perceptivo-motrice, contrôle visuo-moteur, attention visuelle. Les autres variables sont des variables qualitatives, telles que le genre (masculin/féminin), la latéralité (main dominante gauche/droite) et le niveau de maturité de la tenue du stylo (immature/intermédiaire/mature). L'ensemble des indices évalués dans cette étude est résumé dans le tableau 8.

Tableau 8. Indices mesurés dans l'étude 1 afin d'évaluer la qualité, la vitesse d'écriture et les facteurs prédictifs portant sur les caractéristiques individuelles, sur la tenue du stylo et sur le traitement perceptivo-moteur.

Domaine d'évaluation	Indices mesurés
Niveau d'écriture	
Qualité	Score total de qualité (13 critères)
Vitesse	Nombre de caractères écrits en 5min
Caractéristiques individuelles	Âge chronologique Âge de développement Genre
Tenue du stylo	Préférence manuelle Préhension du stylo
Traitement perceptivo-moteur	
Coordination de la motricité fine	Score d'imitation de positions de mains
Intégration perceptivo-motrice	Score de copie de figures
Contrôle visuo-moteur	Score de précision visuomotrice
Attention visuelle	Score d'attention visuelle

2.4. Analyses statistiques

Dans un premier temps, nous allons effectuer une comparaison du niveau d'écriture entre le groupe T21 et les groupes au développement typique (groupe AD et groupe AC). Pour ce faire, un test de normalité de Shapiro-Wilk pour chaque groupe ainsi qu'un test d'homogénéité des variances de Levene entre les trois groupes sont appliqués sur l'ensemble des indices. La normalité des données et l'homogénéité des variances ont été évaluées pour chaque indice et reportées dans le tableau C1 (annexe C). L'absence de normalité et d'homogénéité induit une comparaison de moyennes selon des tests non paramétriques. Le test de Kruskal-Wallis permet de tester l'effet du groupe puis les tests de Mann-Whitney permettent de réaliser des comparaisons deux à deux (T21 vs. AD ; T21 vs. AC).

Dans un second temps, nous nous intéresserons aux facteurs prédictifs de la qualité et de la vitesse d'écriture parmi les caractéristiques individuelles (âge de développement, âge chronologique, genre), la tenue du stylo et le traitement perceptivo-moteur. Afin d'évaluer l'effet individuel de chaque facteur sur la qualité et la vitesse d'écriture, des modèles linéaires généralisés (GLM) sont introduits pour contourner l'absence de normalité. Ces modèles vont permettre la transformation des variables quantitatives discrètes selon la loi de Poisson, telles que le score de qualité et la vitesse (nombre de caractères écrits). Les régressions simples sont alors réalisées selon le test de Wald et permettent d'établir individuellement un lien entre la qualité ou la vitesse et les facteurs prédictifs. Un modèle linéaire (LM) multiple est ensuite introduit afin d'évaluer l'effet

conjoint des facteurs (données centrées et réduites) sur le score de qualité et la vitesse. Chaque facteur est alors retiré un à un du modèle jusqu'à obtenir le modèle le mieux adapté à la variance de la qualité ou de la vitesse d'après l'AIC (Akaike Information Criterion ; Akaike, 1973).

Les différences significatives sont établies selon un seuil alpha de $p < 0,05$. L'ensemble des statistiques a été réalisé à l'aide du logiciel R (version 3.2.3), la plateforme R-Commander (Fox, 2005) et la fonction *glm2* du package « glm2 » (Marschner, 2014).

3. Résultats

Les résultats de l'étude 1 portant, d'une part, sur l'évaluation de la qualité et de la vitesse d'écriture et, d'autre part, sur les facteurs prédictifs des habiletés d'écriture dans le groupe T21 et les deux groupes typiques vont désormais être détaillés. L'ensemble des résultats sera ensuite synthétisé à la fin de l'étude.

3.1. Evaluation de la qualité et de la vitesse d'écriture

Des exemples de copies de texte du test BHK, présentés en figure 15, illustrent les productions de deux participants du groupe T21 et de leurs pairs respectifs du groupe AD et du groupe AC.

La figure 16 présente la moyenne du **score total de qualité** de l'écriture pour les trois groupes. Rappelons que plus le score total est bas, meilleure est la qualité de l'écriture. Le test de Kruskal-Wallis indique un effet du groupe sur le score de qualité ($\chi^2 = 33,22$; $p < 0,001$). Les analyses mettent en évidence un score global du groupe T21 non significativement différent de celui du groupe AD ($U = 85$; $p = 0,09$) et de moins bonne qualité que le groupe AC ($U = 27$; $p < 0,001$).

<p>il fait très beau je suis bien je vois de l'eau mais je ne sais pas où elle va l'eau venait sur les côtés, avec une grande</p>	<p>il fait très beau je suis bien je vois de l'eau mais je ne sais pas où elle va l'eau venait sur les côtés</p>
<p>il fait très beau je suis bien je vois de l'eau</p>	<p>il fait très beau je suis bien je vois de l'eau mais je ne sais pas où elle va l'eau venait sur les côtés avec une grande force. Des enfants étaient près de moi le plus</p>
<p>Il fait très beau Je suis bien Je vois l'eau mais je ne sais pas où elle va</p>	
<p>L'eau venait sur les côtés, avec une grande force. Des enfants étaient près de moi. Le plus petit, donnait ses affaires à une femme. Cette femme, qui était grande et belle, devait être une amie. Elle lui avait pris la main, et je la voyais aller vers une place : la plus belle de notre ville ! Un des enfants donnait des choses à un autre ; mais, je ne savais pas ce que c'était. Je n'étais trop loin ; alors, je me dirigeais doucement vers eux, pour mieux voir. Un des enfants me regardait. Il me fit signe de venir, avec lui.</p>	<p>Il fait très beau Je suis bien Je vois de l'eau mais je ne sais pas où elle va L'eau venait sur les côtés, avec une grande force. Des enfants étaient près de moi. Le plus petit, donnait ses affaires à une femme. Cette femme, qui était grande et belle, devait être une amie. Elle lui avait pris la main, et je la voyais aller vers une place : la plus belle de notre ville ! Un des enfants, donnait des choses à un autre ; mais, je ne savais pas ce que c'était. J'étais trop loin ; alors, je me dirigeais doucement vers eux, pour mieux voir. Un des enfants me regardait. Il me fit signe de venir, avec lui, dans le groupe. J'entendais des rires et des paroles joyeuses.</p>

Figure 15. Exemples de copies de texte dans le test BHK. La première ligne correspond aux productions chez une fille du groupe T21 (âge dev. = 6 ans ; âge chrono. = 12 ans 10 mois ; à gauche) et un homme du groupe T21 (âge dev. = 7 ans 6 mois ; âge chrono. = 23 ans 10 mois ; à droite). La deuxième ligne correspond aux copies de texte de leurs pairs du groupe AD (âgés de 6 ans 1 mois et 7 ans 10 mois). La dernière ligne comporte les productions de leurs pairs du groupe AC (âgés de 12 ans 2 mois et 23 ans 10 mois).

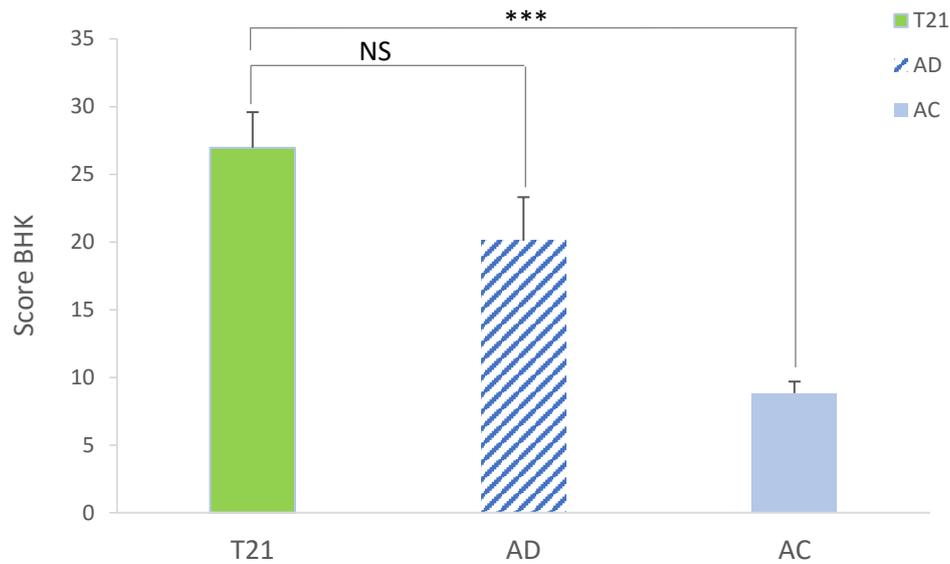


Figure 16. Score global moyen de qualité d'écriture évalué par le test BHK dans les trois groupes. Plus le score global est bas, meilleure est la qualité d'écriture. Les barres d'erreur verticales représentent l'écart-type. T21 : groupe T21 ; AD : groupe au développement typique de même âge de développement ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique. *** : $p < 0,001$; NS : non significatif.

Des analyses ont ensuite porté sur chacun des 13 critères du BHK dont les moyennes et les écart-types sont détaillés dans le tableau 9. Le test de Kruskal-Wallis révèle un effet global du groupe sur les critères suivants : écriture grande ($\chi^2 = 22,48$; $p < 0,001$), inclinaison de la marge ($\chi^2 = 6,44$; $p < 0,05$), lignes non planes ($\chi^2 = 31,47$; $p < 0,001$), mots serrés ($\chi^2 = 12,95$; $p < 0,01$), variations de la hauteur ($\chi^2 = 10,30$; $p < 0,01$), hauteur relative ($\chi^2 = 17,29$; $p < 0,001$), distorsion des lettres ($\chi^2 = 8,04$; $p < 0,05$), lettres retouchées ($\chi^2 = 7,12$; $p < 0,05$) et mauvaise trace ($\chi^2 = 28,47$; $p < 0,001$). Pour ces critères, des comparaisons deux à deux mettent en évidence des différences entre le groupe T21 et les deux groupes typiques. Le groupe T21 trace des lettres significativement plus grandes par rapport au groupe AD ($U = 70$; $p < 0,05$) et au groupe AC ($U = 75$; $p < 0,001$). L'inclinaison de la marge du groupe T21 est comparable au groupe AD ($U = 160$; $p = 0,16$) et au groupe AC ($U = 263$; $p = 0,28$). Les lignes non planes dans le groupe T21 sont autant présentes que dans le groupe AD ($U = 152$; $p = 0,46$) et plus nombreuses par rapport au groupe AC ($U = 53$; $p < 0,001$). Les mots dans le groupe T21 sont serrés comme dans le groupe AD ($U = 89$; $p = 0,10$) et diffèrent du groupe AC ($U = 144$; $p < 0,001$). La variation de la hauteur dans le groupe T21 est équivalente au groupe AD ($U = 135$; $p = 0,92$) et supérieure au groupe AC ($U = 185$; $p < 0,01$). La hauteur relative dans le groupe T21 est équivalente au groupe AD ($U = 85$; $p = 0,080$) et elle est plus stable dans le groupe AC ($U = 108$; $p < 0,001$). Les lettres sont autant distordues dans les groupes T21 et AD ($U = 88$; $p = 0,086$) et le groupe AC présente une distorsion inférieure au groupe T21 ($U = 177$; $p < 0,01$). La

fréquence de lettres retouchées dans le groupe T21 est similaire au groupe AD ($U = 143$; $p = 0,70$) et supérieure au groupe AC ($U = 197$; $p < 0,05$). Concernant la mauvaise trace, le groupe T21 est analogue au groupe AD ($U = 100$; $p = 0,24$) et diffère du groupe AC ($U = 67$; $p < 0,001$). Aucun effet du groupe n'est mis en évidence pour les critères suivants : écriture chaotique ($\chi^2 = 5,73$; $p = 0,057$), liens interrompus ($\chi^2 = 2,95$; $p = 0,23$), télescopages ($\chi^2 = 0,17$; $p = 0,92$) et formes ambiguës ($\chi^2 = 1,42$; $p = 0,49$).

Tableau 9. Scores obtenus aux 13 critères du test BHK dans les trois groupes.

Critères	Groupe		
	T21	AD	AC
1) Ecriture grande	2,17 ± 1,71	0,91 ± 1,38	0,29 ± 0,75
2) Inclinaison de la marge	0,50 ± 1,38	1,09 ± 1,58	0,08 ± 0,41
3) Lignes non planes	3,50 ± 1,50	3,91 ± 1,45	0,71 ± 1,20
4) Mots serrés	2,17 ± 2,12	0,82 ± 1,54	0,25 ± 0,85
5) Ecriture chaotique	2,25 ± 2,23	1,73 ± 1,85	0,71 ± 1,20
6) Liens interrompus	4,00 ± 1,38	3,55 ± 1,13	3,54 ± 1,35
7) Télescopages	0,38 ± 1,17	0,36 ± 0,92	0,29 ± 0,86
8) Variations de la hauteur	1,42 ± 2,04	1,09 ± 1,22	0,08 ± 0,28
9) Hauteur relative	2,13 ± 1,92	1,09 ± 2,02	0,21 ± 0,59
10) Distorsion des lettres	1,63 ± 2,04	0,36 ± 0,67	0,33 ± 0,87
11) Formes ambiguës	1,42 ± 1,89	1,27 ± 1,35	1,75 ± 1,54
12) Lettres retouchées	0,83 ± 1,13	1,00 ± 1,26	0,21 ± 0,51
13) Mauvaise trace	3,46 ± 1,96	2,91 ± 1,64	0,38 ± 0,97

Note. Les valeurs reportées correspondent à la moyenne du score ± l'écart-type. Plus le score obtenu à un critère est bas, meilleure est la qualité d'écriture. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AD : groupe au développement typique de même âge de développement ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique.

Pour chaque groupe, la moyenne et l'écart-type de la **vitesse d'écriture** sont illustrés en figure 17. L'analyse de la vitesse révèle un effet du groupe ($\chi^2 = 40,62$; $p < 0,001$). Plus précisément, le groupe T21 écrit autant de caractères que le groupe AD ($U = 130$; $p = 0,96$) et moins que le groupe AC ($U = 570$; $p < 0,001$).

Le lien entre le score total de qualité et la vitesse est étudié à l'aide d'un modèle GLM selon la loi de Poisson. La vitesse décroît avec le score total dans le groupe T21 ($\beta_1 = -0,028$; $p < 0,001$), le groupe AD ($\beta_1 = -0,37$; $p < 0,001$) et le groupe AC ($\beta_1 = -0,021$; $p < 0,001$). Le score total de qualité évoluant inversement au niveau de qualité, la vitesse augmente dans les trois groupes avec la qualité.

Le détail des comparaisons entre le groupe AD et le groupe AC est reporté dans le tableau C2 (annexe C).

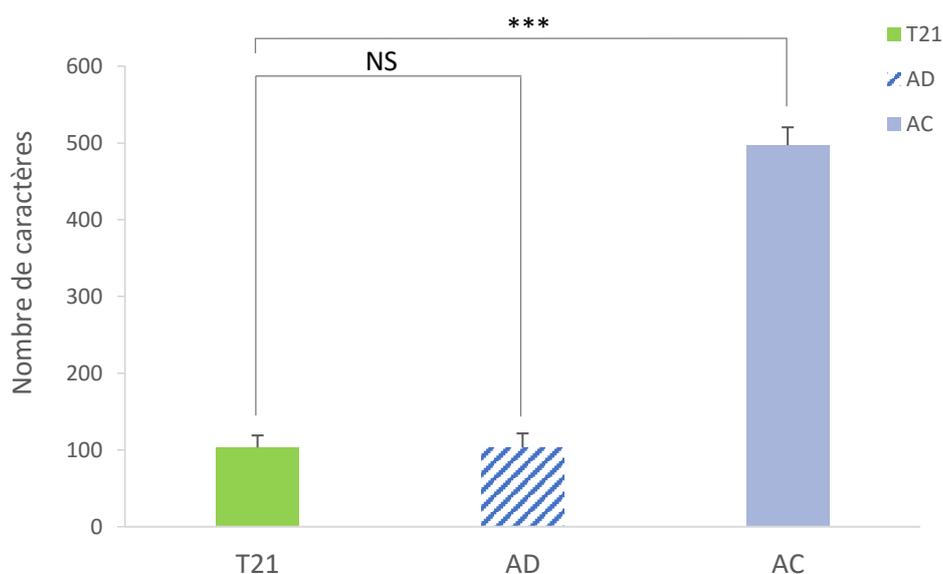


Figure 17. Vitesse moyenne d'écriture évaluée par le test BHK dans les trois groupes. Les barres d'erreurs verticales représentent l'écart-type. T21 : groupe T21 ; AD : groupe au développement typique de même âge de développement ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique. *** : $p < 0,001$; NS : non significatif.

3.2. Les facteurs prédictifs du niveau d'écriture

Parmi les facteurs pouvant influencer le score total de qualité et la vitesse d'écriture, trois variables catégorielles sont observées au cours de la passation. Le détail des effectifs par catégorie se trouve dans le tableau 10. Dans les trois groupes, il y a 13 participants de genre masculin et 11 de genre féminin. La grande majorité (T21 : $n=21$; AD : $n=17$; AC : $n=20$) présente une préférence manuelle pour la main droite lors d'une activité avec un stylo (test BHK ou subtests de la NEPSY I : intégration perceptivo-motrice, contrôle visuo-moteur, attention visuelle). C'est pourquoi, dans la suite de cette étude, nous ne pourrions pas évaluer la latéralité dû au trop faible effectif de gauchers. Les groupes T21 et AC tiennent majoritairement le stylo selon une préhension mature ($n=16$ et $n=17$ respectivement), alors que pour le groupe AD, la tenue est intermédiaire chez 21 participants.

Tableau 10. Effectifs des participants des trois groupes selon la catégorie du genre, de la préférence manuelle et de la tenue du stylo.

Catégorie	Groupe		
	T21	AD	AC
Genre			
Masculin	13	13	13
Féminin	11	11	11
Préférence manuelle			
Droitier	21	17	20
Gaucher	3	7	4
Tenue du stylo			
Immature	0	0	0
Intermédiaire	8	21	7
Mature	16	3	17

Note. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AD : groupe au développement typique de même âge de développement ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique.

Le traitement perceptivo-moteur est évalué à partir de quatre subtests de la NEPSY I portant sur : la coordination de la motricité fine (CMF), l'intégration perceptivo-motrice (IPM), le contrôle visuo-moteur (CVM) et l'attention visuelle (AV). Les moyennes et écart-types des scores obtenus à chaque subtest par les trois groupes sont détaillés dans le tableau 11. Pour les quatre scores, un effet du groupe est mis en évidence (CMF : $\chi^2 = 47,73$; $p < 0,001$; IPM : $\chi^2 = 19,42$; $p < 0,001$; CVM : $\chi^2 = 45,08$; $p < 0,001$; AV : $\chi^2 = 49,10$; $p < 0,001$). Pour la coordination de la motricité fine, le groupe T21 ne varie pas significativement du groupe AD ($U = 338$; $p = 0,30$) et réalise un score significativement inférieur à celui du groupe AC ($U = 575$; $p < 0,001$). Le niveau d'intégration perceptivo-motrice du groupe T21 est supérieur à celui du groupe AD ($U = 172$; $p < 0,05$) et inférieur à celui du groupe AC ($U = 404$; $p < 0,05$). Dans le groupe T21, le score de contrôle visuo-moteur ne diffère pas de celui du groupe AD ($U = 282$; $p = 0,90$) et il est d'un niveau inférieur à celle du groupe AC ($U = 568$; $p < 0,001$). Le groupe T21 présente des performances d'attention visuelle inférieures à celles du groupe AD ($U = 412$; $p < 0,05$) et du groupe AC ($U = 572$; $p < 0,001$).

Tableau 11. Niveau du traitement perceptivo-moteur selon quatre domaines d'évaluation dans les trois groupes.

Domaine	Groupe		
	T21	AD	AC
Coordination de la motricité fine	15,33 ± 4,04	15,79 ± 6,04	23,58 ± 0,83
Intégration perceptivo-motrice	42,92 ± 10,79	39,67 ± 17,66	61,67 ± 2,76
Contrôle visuo-moteur	17,38 ± 9,96	10,42 ± 6,56	25,13 ± 11,67
Attention visuelle	8,75 ± 5,10	12,63 ± 5,36	27,21 ± 4,09

Note. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AD : groupe au développement typique de même âge de développement ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique.

En amont des régressions linéaires, une corrélation entre le **score total de qualité** et chaque variable quantitative a été réalisée dans les trois groupes ; le détail des résultats se trouve dans les tableaux C3, C4 et C5 (annexe C). La régression linéaire simple du score

de qualité en fonction de l'âge de développement met en évidence un effet significatif dans le groupe T21 ($\beta_1 = -0,20$; $p < 0,001$) et dans le groupe AD ($\beta_1 = -0,29$; $p < 0,001$), indiquant que le score de qualité diminue avec l'âge de développement. Concernant l'âge chronologique, l'analyse révèle un effet significatif dans le groupe T21 ($\beta_1 = -0,03$; $p < 0,001$) mais pas dans le groupe AC ($p = 0,057$). Pour la variable genre, les analyses de régression indiquent que le score de qualité des filles est inférieur à celui des garçons dans le groupe T21 ($\beta_1 = 0,19$; $p < 0,05$) et le groupe AC ($\beta_1 = 0,39$; $p < 0,01$). Dans le groupe AD, le score ne varie pas selon le genre ($p = 0,068$). Pour le type de tenue du stylo, on note un effet de ce facteur sur le score de qualité dans le groupe T21 ($\beta_1 = -0,22$; $p < 0,01$) et le groupe AC ($\beta_1 = -0,47$; $p < 0,001$) indiquant un score supérieur pour la position intermédiaire par rapport à la position mature. L'analyse dans le groupe AD ne révèle pas d'effet de la tenue du stylo ($p = 0,73$). Concernant les facteurs perceptivo-moteurs, les analyses montrent que le score de qualité dans le groupe T21 diminue avec celui de la coordination de la motricité fine ($\beta_1 = -0,09$; $p < 0,001$), mais pas dans le groupe AD ($p = 0,52$), ni dans le groupe AC ($p = 0,22$). Dans les trois groupes, le score de qualité diminue avec le niveau d'intégration perceptivo-motrice (T21 : $\beta_1 = -0,03$; $p < 0,001$; AD : $\beta_1 = -0,05$; $p < 0,05$; AC : $\beta_1 = -0,06$; $p < 0,05$). Le contrôle visuo-moteur influence le score de qualité dans le groupe T21 ($\beta_1 = -0,03$; $p < 0,001$) et le groupe AD ($\beta_1 = -0,03$; $p < 0,01$) avec une diminution du score lorsque le niveau de contrôle visuo-moteur augmente. Dans le groupe AC, le score de qualité ne dépend pas du contrôle visuo-moteur ($p = 0,64$). Pour le facteur d'attention visuelle, le score total décroît significativement dans le groupe T21 ($\beta_1 = -0,06$; $p < 0,001$) et dans le groupe AC ($\beta_1 = -0,05$; $p < 0,001$), mais croît dans le groupe AD ($\beta_1 = 0,13$; $p < 0,001$).

Concernant la régression linéaire multiple, le détail des différentes étapes est reporté dans les tableaux C6, C7 et C8 (annexe C) pour les trois groupes. Dans le groupe T21, le facteur prédictif du score de qualité est la coordination de la motricité fine, expliquant 70% de la variance ($F_{(1,22)} = 55,11$; $p < 0,001$). Dans le groupe AD, le modèle prédictif de la qualité se compose de l'âge, le genre, la préhension, la coordination de la motricité fine, le contrôle visuo-moteur et l'attention visuelle, expliquant 87% de la variance ($F_{(6,4)} = 11,72$; $p < 0,05$). Dans le groupe AC, les facteurs prédictifs sont le genre et la préhension, expliquant 28% de la variance ($F_{(2,21)} = 5,40$; $p < 0,05$).

Pour la **vitesse d'écriture**, les corrélations avec chaque facteur sont détaillées dans les tableaux C3, C4 et C5 (annexe C). Concernant les résultats des régressions linéaires simples, l'âge de développement influence significativement la vitesse d'écriture dans le groupe T21 ($\beta_1 = 0,13$; $p < 0,001$) et dans le groupe AD ($\beta_1 = 0,45$; $p < 0,001$), la vitesse augmentant selon l'âge de développement. Concernant l'âge chronologique, l'analyse révèle un effet significatif dans le groupe T21 ($\beta_1 = 0,01$; $p < 0,001$) et dans le groupe AC ($\beta_1 = 0,01$; $p < 0,001$), indiquant une augmentation de la vitesse avec l'âge chronologique. Le genre influence la vitesse dans le groupe T21 ($\beta_2 = -0,22$; $p < 0,001$) et le groupe AC ($\beta_2 = -0,18$; $p < 0,001$) précisant que la vitesse est significativement plus élevée chez les filles que chez les garçons. Dans le groupe AD, la vitesse ne dépend pas du genre ($p = 0,53$). Un effet de la tenue du stylo sur la vitesse est mis en évidence dans le groupe T21 ($\beta_2 = 0,40$; $p < 0,001$) et dans le groupe AC ($\beta_2 = 0,16$; $p < 0,001$), la vitesse étant plus élevée chez les participants présentant une tenue mature par rapport à une tenue intermédiaire. Dans le groupe AD, la vitesse ne varie pas significativement en fonction de la tenue du stylo ($p = 0,65$). Pour les facteurs perceptivo-moteurs, les régressions simples mettent en avant une vitesse qui croît significativement avec le score de coordination de la motricité fine dans les groupes T21 et AD (T21 : $\beta_1 = -0,03$; $p < 0,001$; AD : $\beta_1 = -0,05$; $p < 0,05$), mais pas dans le groupe AC ($p = 0,19$). Pour l'intégration visuo-motrice, la vitesse augmente dans les trois groupes (T21 : $\beta_1 = 0,02$; $p < 0,001$; AD : $\beta_1 = 0,08$; $p < 0,001$; AC : $\beta_1 = 0,03$; $p < 0,001$). Pour le contrôle visuo-moteur, la vitesse augmente dans le groupe T21 ($\beta_1 = 0,02$; $p < 0,001$) et le groupe AC ($\beta_1 = 0,03$; $p < 0,001$). Dans le groupe AD, la vitesse ne dépend pas du contrôle visuo-moteur ($p = 0,91$). Concernant l'attention visuelle, la vitesse croît dans le groupe T21 ($\beta_1 = 0,04$; $p < 0,001$) et le groupe AC ($\beta_1 = 0,03$; $p < 0,001$), mais décroît dans le groupe AD ($\beta_1 = -0,03$; $p < 0,001$).

Pour la régression linéaire multiple, le détail des différentes étapes est reporté dans les tableaux C6, C7 et C8 (annexe C) pour les trois groupes. Dans le groupe T21, les facteurs prédictifs de la vitesse sont l'âge de développement, la coordination de la motricité fine et le contrôle visuo-moteur, expliquant 35% de la variance ($F_{(3, 19)} = 4,95$; $p < 0,05$). Dans le groupe AD, le modèle le mieux ajusté se compose de l'âge, le genre, la préhension et la coordination de la motricité fine, expliquant 90% de la variance ($F_{(4, 19)} = 23,31$; $p < 0,001$). Dans le groupe AC, les facteurs prédictifs sont l'âge, le genre, la préhension et l'attention visuelle, expliquant 53% de la variance ($F_{(4, 19)} = 7,47$; $p < 0,001$).

4. Synthèse des résultats de l'étude 1

L'ensemble des résultats concernant la comparaison des groupes sur la qualité et la vitesse d'écriture est résumé dans le tableau 12. D'après les analyses, le score global de la qualité des productions écrites est similaire à celle du groupe typique de même âge de développement. Plus précisément, des scores relativement similaires s'observent sur les critères suivants : inclinaison de la marge, lignes non planes, mots serrés, écriture chaotique, liens interrompus, télescopages, variations de la hauteur, hauteur relative, distorsion des lettres, formes ambiguës, lettres retouchées et mauvaise trace. Seule la taille de l'écriture diffère, les productions des participants T21 se caractérisant par une taille des lettres plus hautes par rapport au groupe typique de même âge de développement. Concernant la vitesse d'écriture, les performances du groupe T21 sont comparables à celles du groupe typique de même âge de développement. L'étude de l'effet de l'âge de développement permet de mettre en avant une augmentation de la qualité et de la vitesse d'écriture dans le groupe T21 et aussi dans le groupe d'enfants typiques de même âge de développement. Comparativement aux personnes typiques de même âge chronologique, les personnes T21 ont un score global de qualité d'écriture inférieur au groupe typique. Plus précisément, le groupe T21 présente une écriture plus grande, de lignes moins planes, de mots plus serrés, d'une hauteur variant d'une lettre à l'autre, d'une disproportion entre la hauteur des lettres troncs et non-troncs, d'une distorsion des lettres, de retouches et de tremblements plus fréquents par rapport au groupe typique de même âge chronologique. La qualité d'écriture ne diffère pas entre le groupe T21 et le groupe typique en termes d'écriture chaotique, de liens interrompus, de télescopages et de formes ambiguës. De plus, le groupe T21 écrit plus lentement que le groupe typique de même âge chronologique. L'étude de l'âge chronologique souligne une amélioration de la qualité et de la vitesse des tracés en fonction de l'âge chronologique chez les personnes T21. Cette évolution au fil des âges se retrouve également pour la vitesse d'écriture dans le groupe composé de personnes typiques de même âge chronologique, mais aucun effet de l'âge n'est mis en évidence sur la qualité.

Tableau 12. Récapitulatif des résultats sur la qualité et la vitesse d'écriture de l'étude 1.

Indice	Effet du groupe	
Score global de qualité	T21 = AD	T21 > AC
1) Ecriture grande	T21 > AD	T21 > AC
2) Inclinaison de la marge	T21 = AD	T21 = AC
3) Lignes non planes	T21 = AD	T21 > AC
4) Mots serrés	T21 = AD	T21 > AC
5) Ecriture chaotique	T21 = AD	T21 = AC
6) Liens interrompus	T21 = AD	T21 = AC
7) Télescopages	T21 = AD	T21 = AC
8) Variations de la hauteur	T21 = AD	T21 > AC
9) Hauteur relative	T21 = AD	T21 > AC
10) Distorsion des lettres	T21 = AD	T21 > AC
11) Formes ambiguës	T21 = AD	T21 = AC
12) Lettres retouchées	T21 = AD	T21 > AC
13) Mauvaise trace	T21 = AD	T21 > AC
Vitesse	T21 = AD	T21 < AC

Note. Plus le score global et le score obtenu à un critère sont bas, meilleure est la qualité d'écriture. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AD : groupe au développement typique de même âge de développement ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique.

Le second objectif de l'étude visait à déterminer l'impact d'un certain nombre de facteurs sur les habiletés d'écriture chez les personnes T21 et de les comparer à ceux de la population typique. D'après les régressions linéaires simples, l'étude met en évidence un effet du genre dans la population T21 et la population typique, la qualité des tracés ainsi que la vitesse de transcription des filles étant supérieures à celles des garçons, et ce pour l'ensemble des trois groupes. Concernant la préhension du stylo, la majorité du groupe T21 (67%) et du groupe typique de même âge chronologique (71%) tiennent leur stylo selon une position mature en trépied dynamique alors que le groupe typique de même âge de développement présente en grande majorité (87% du groupe) une position intermédiaire. A l'aide des régressions simples, notre étude révèle qu'une position mature induit une écriture de meilleure qualité et plus rapide qu'une position intermédiaire aussi bien dans la population T21 que dans la population typique. Les régressions multiples permettent de regrouper l'ensemble des facteurs répertoriés afin de déterminer quels sont ceux influençant le plus la qualité ou la vitesse d'écriture. Les résultats dans les trois groupes sont rappelés dans le tableau 13. D'après les régressions multiples, le genre et le type de

préhension du stylo ne sont pas prédicteurs du niveau d'écriture dans le groupe T21 alors qu'ils font partie des principaux facteurs prédicteurs de la qualité et de la vitesse d'écriture dans les deux groupes typiques. Notre étude s'est également intéressée à l'influence du traitement perceptivo-moteur sur l'écriture. Concernant la coordination de la motricité fine, le groupe T21 présente un niveau similaire aux enfants typiques de même âge de développement mais inférieure au groupe de personnes typiques de même âge chronologique. D'après les régressions linéaires simples, la qualité et la vitesse d'écriture augmenteraient avec les performances de coordination de la motricité fine dans la population T21 et dans la population typique de même âge de développement. L'intégration visuo-motrice a été étudiée par le biais d'une tâche de copie de figures géométriques et d'une tâche de tracé entre deux lignes. Des difficultés pour la coordination entre l'information visuelle et la réponse motrice sont mises en évidence dans le groupe T21 par rapport aux performances du groupe typique de même âge chronologique. De plus, le niveau d'intégration visuo-motrice chez les personnes T21 est supérieur à celui des enfants typiques de même âge de développement pour la tâche d'intégration perceptivo-motrice et il est similaire entre les deux groupes pour la tâche de contrôle visuo-moteur. Dans les trois groupes, la qualité et la vitesse d'écriture augmente avec les performances d'intégration visuo-motrice. Pour l'attention visuelle, le groupe T21 présente des scores inférieurs par rapport aux deux groupes typiques. A l'aide des régressions linéaires simples, il a été mis en évidence que la qualité et la vitesse d'écriture augmentaient avec le niveau d'attention visuelle dans le groupe T21 et le groupe de personnes typiques de même âge chronologique. Parmi l'ensemble des facteurs, le niveau de coordination de la motricité fine dans le groupe T21 explique à 70% la variance de la qualité d'écriture et explique en partie, avec le contrôle visuo-moteur et l'âge de développement, 35% de la vitesse d'écriture. L'effet de la coordination de la motricité fine sur la qualité et la vitesse d'écriture est également mis en évidence par les régressions linéaires multiples dans le groupe d'enfants typiques de même âge de développement. Le contrôle visuo-moteur est mis en avant comme l'un des facteurs prédicteurs de la qualité d'écriture dans le groupe de même âge de développement, mais pas pour la vitesse d'écriture. Les régressions linéaires multiples indiquent également que l'attention visuelle ne fait pas partie des principaux facteurs prédicteurs du niveau d'écriture dans le groupe T21. Dans les groupes typiques, la capacité perceptivo-motrice fait partie des facteurs prédicteurs de la qualité dans le groupe AD alors qu'elle est révélée comme facteur prédicteur de la vitesse dans le groupe AC.

Tableau 13. Récapitulatif des résultats sur les facteurs prédictifs de la qualité et de la vitesse d'écriture de l'étude 1.

	Groupe		
	T21	AD	AC
Qualité	-	Âge chronologique	-
	-	Genre	Genre
	-	Préhension du stylo	Préhension du stylo
	Contrôle de la motricité fine	Contrôle de la motricité fine	-
	-	Contrôle visuo-moteur	-
	-	Attention visuelle	-
	70%	87%	28%
Vitesse	Âge de développement	Âge chronologique	Âge chronologique
	-	Genre	Genre
	-	Préhension du stylo	Préhension du stylo
	Contrôle de la motricité fine	Contrôle de la motricité fine	-
	Contrôle visuo-moteur	-	-
	-	-	Attention visuelle
	35%	90%	53%

Note. Les pourcentages correspondent à la proportion de variance de la qualité ou de la vitesse expliquée par le modèle. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AD : groupe au développement typique de même âge de développement ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique.

Les résultats de cette étude seront discutés avec ceux des études suivantes dans le chapitre 5. En vue de mieux analyser les conduites d'écriture dans la population T21, nous nous sommes intéressés à la dynamique de la trace écrite dans une seconde étude à l'aide d'une tablette graphique.

Etude 2 : analyse de la dynamique du tracé de lettres

Cette étude a fait l'objet d'un article sur l'analyse de la dynamique du tracé de lettres chez les personnes T21 (Tsao, Moy, Velay, Carvalho & Tardif, en révision).

1. Objectifs et hypothèses

Afin de compléter notre première étude sur l'analyse de la trace écrite, une seconde étude a porté sur les aspects dynamiques du tracé graphomoteur dans la population T21 comparativement à la population typique. En effet, l'analyse numérique du tracé présente l'originalité d'évaluer temporellement et spatialement l'écriture en cours d'exécution. En combinant l'analyse de la trace écrite à l'analyse de la dynamique, l'étude des caractéristiques de l'écriture permet d'apporter une meilleure connaissance des mécanismes sous-jacents au geste graphomoteur (Rosenblum, Weiss & Parush, 2004). Dans le domaine de la trisomie 21, différentes études ont révélé des difficultés dans le domaine moteur. Concernant les aptitudes motrices de bases telles que la posture ou la marche, un retard de développement est mis en évidence chez les enfants T21 (Lambert & Rondal, 1997 ; Palisano et al., 2001 ; Tudella, Pereira, Basso & Savelsbergh, 2011). De façon générale, le mouvement est lent avec un manque de précision et de coordination (Charlton, Ihsen & Lavelle, 2000). De plus, les enfants et les adultes T21 présentent un temps de réaction plus long et plus variable que dans la population typique. Dans une tâche de préhension d'objet, des enfants T21 de 3 ans ont été comparés à des enfants typiques de même âge chronologique et de même âge moteur (Kearney & Gentile, 2003). L'analyse temporelle et cinématique des mouvements révèle chez l'enfant T21 un nombre de saisies anticipées inférieur aux groupes typiques, un défaut de décélération lors de l'atteinte de l'objet et des mouvements de portée d'objet plus lents. Les études dans des tâches de motricité révèlent des difficultés dans la population T21 s'apparentant à un contrôle moteur réalisé en cours d'exécution. Cette altération de la motricité fine pourrait influencer les habiletés d'écriture chez les personnes T21. L'objectif de notre étude est alors de déterminer le type de contrôle sous-jacent au geste graphomoteur à partir de la mesure de différents indices dynamiques dans une tâche de tracé de lettres sur tablette graphique. Les travaux sur l'écriture ont eu recours à l'analyse du mouvement afin de préciser l'évolution du contrôle graphomoteur au

cours de l'acquisition de l'écriture chez l'enfant typique. A partir notamment de données recueillies sur tablette graphique, Zesiger (2003) a proposé un modèle selon lequel l'acquisition de l'écriture se caractériserait par un passage d'un contrôle de type rétroactif se réalisant en cours d'exécution à un contrôle de type proactif basé sur la représentation interne des mouvements. Le contrôle de type rétroactif entraîne un tracé lent, avec de nombreuses pauses et couples d'accélération et de décélération ainsi qu'une pression élevée (Mayor, Deonna & Zesiger, 2000). Le contrôle proactif apparaît de façon progressive vers l'âge de 10 ans et s'actualise au travers d'une écriture plus rapide, fluide et régulière, le nombre de pauses diminuant avec la pression exercée sur le stylet. L'étude de Tsao et collaborateurs (2012) est la seule étude, à notre connaissance, ayant porté sur l'analyse dynamique du tracé dans la population T21. Les résultats révèlent une similarité entre des adultes T21 et des enfants typiques de même âge de développement sur le nombre et la durée des traits composant une lettre ainsi que le nombre et la durée des pauses du stylo, en faveur d'un contrôle moteur réalisé en cours d'exécution. Toujours au regard de l'hypothèse générale de séquence et de structure similaires (Zigler, 1969 ; 1982 ; 1998) et des données de Tsao et collaborateurs (2012), on s'attend à ce que les participants T21 produisent des tracés similaires aux enfants typiques de même âge de développement selon les indices temporels, spatiaux et cinématiques évalués lors du tracé de lettre.

La majorité des travaux dans la déficience intellectuelle porte sur l'analyse de tendances moyennes. Or, l'étude de la variabilité intraindividuelle, en particulier dans la déficience intellectuelle, permet une meilleure compréhension des mécanismes sous-jacents aux capacités motrices. Chez l'enfant avec trouble déficit de l'attention avec/sans hyperactivité et l'enfant dyslexique, la variabilité intraindividuelle a été évaluée dans une tâche d'écriture de séquences de lettres (Borella, Chicherio, Re, Sensini et Cornoldi, 2011). Chez l'enfant avec TDA/H ou dyslexie, la variation intraindividuelle du nombre de séquences écrites est supérieure à celle chez l'enfant typique. L'étude de Danna, Paz-Villagràn et Velay (2013) a porté sur la dynamique de l'écriture de mot chez l'enfant dysgraphique. Les analyses révèlent une variation atypique de la vitesse du tracé par rapport à l'enfant et à l'adulte normoscripteurs. L'ensemble de ces études mettent en évidence une variation intraindividuelle élevée du geste graphomoteur en tant que marqueur caractéristique dans des populations à troubles. Dans le but de compléter notre étude, les analyses porteront alors sur la variabilité intraindividuelle de l'écriture. Pour s'assurer de la stabilité du

contrôle du geste, la tâche présentera deux niveaux de complexité à l'aide de lettres faciles et difficiles choisies selon leur complexité motrice et leur fréquence dans la langue française. Chez les personnes T21 et les enfants typiques de même âge de développement, la dynamique du tracé des lettres faciles pourrait être meilleure que celle des lettres difficiles pour les indices spatiaux, temporels et cinématiques, en particulier. Par ailleurs, le tracé de plusieurs essais pour chaque lettre permettrait de révéler une variabilité intraindividuelle chez les personnes T21 significativement supérieure à celle des enfants typiques. Au-delà d'un contrôle moteur en cours d'exécution, l'écriture chez les personnes T21 s'expliquerait alors par une variabilité élevée du geste graphomoteur chez l'individu T21.

2. Méthode

2.1. Population

Les caractéristiques de la population recrutée dans ce travail de recherche sont présentées dans le chapitre 3 de la méthode générale (cf. 3.1 et 3.2). Un enfant du groupe AD n'a pas réussi à réaliser la tâche d'écriture de lettres dû à son jeune âge (4 ans 10 mois). Il a alors été exclu de cette étude.

2.2. Dispositif expérimental

Différentes lettres de l'alphabet ont été choisies pour l'étude 2 et l'étude 3. Au niveau de la production d'écriture, les lettres peuvent se différencier selon la difficulté motrice (Meulenbroek & van Galen, 1990) et la fréquence dans la langue française (Søvik, Arntzen, Samuelstuen & Heggberget, 1994). Dans une étude de Jolly, Huron et Gentaz (2014), des enfants âgés de 5 à 8 ans ont écrit toutes les lettres de l'alphabet. L'analyse cinématique a permis de mesurer pour chaque lettre le nombre moyen de pics de vélocité, indice choisi par les auteurs pour évaluer la fluidité motrice. Un classement a alors pu être établi sur la facilité motrice selon les pics de vélocité décroissants de la lettre la plus « facile » à la lettre la plus « difficile ». De plus, la base de données Lexique 2 permet de classer les lettres selon leur fréquence dans la langue française (New, Pallier, Ferrand & Matos, 2001). Les deux classifications ont alors permis de hiérarchiser les lettres sur la base de la facilité motrice et la fréquence graphonémique (tableau 14). Afin d'étudier la cinématique du mouvement d'écriture (fluide et sans lever de stylo), seules les lettres cursives écrites en un seul tracé

ont été choisies. Sur ces critères, les lettres faciles (en terme de facilité motricité et fréquentes) sont *a, e, s* et les lettres « difficiles » (peu fluides et peu fréquentes) sont *b, f, g*.

Tableau 14. Choix des lettres faciles et difficiles selon leur rang de facilité motrice chez l'enfant de 5 à 8 ans (Jolly, Huron & Gentaz, 2014) et de fréquence française (New, Pallier, Ferrand & Matos, 2001).

Classement	Complexité					
	Facile			Difficile		
	a	e	s	b	f	g
Facilité motrice chez l'enfant	5 ^{ème}	2 ^{nde}	4 ^{ème}	17 ^{ème}	20 ^{ème}	15 ^{ème}
Fréquence française	3 ^{ème}	1 ^{ère}	4 ^{ème}	19 ^{ème}	18 ^{ème}	17 ^{ème}

L'étude de Vinter et Chartrel (2010) portant sur l'impact de différents types d'apprentissage sur le mouvement d'écriture de lettres cursives présentait différentes lettres cursives sans boucle. En nous inspirant de ces tracés, la forme des modèles des 6 lettres a été simplifiée avec un tracé arrondi et en absence de boucles (figure 18). Les lettres sont présentées dans un carré blanc de 12,5cm de côté. La ligne d'écriture, base des lettres, se situe au centre de l'écran. Les lettres faciles (*a, e, s*) ont une hauteur à l'écran de 2,5 cm, les lettres difficiles une hauteur de 6,5 cm (*b, g*) et de 10,5 cm (*f*).

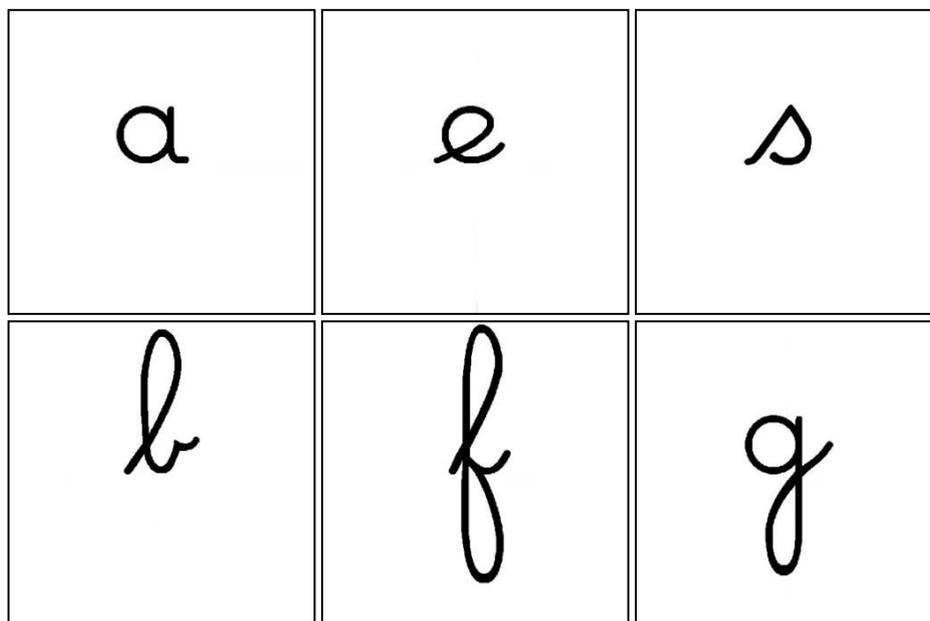


Figure 18. Modèles des lettres faciles (*a, e, s*) et difficiles (*b, f, g*) en écriture cursive.

Au cours de la passation, le participant est installé dans une pièce calme à une table, avec l'expérimentateur généralement à sa gauche pour faciliter le changement de feuille située sur la tablette graphique. Comme présenté dans la figure 19, devant le participant se trouvent l'ordinateur servant à la présentation du modèle et la tablette graphique sur

laquelle il peut réaliser ses tracés. Les modèles de lettres sont affichés en noir sur un fond blanc à l'écran d'un ordinateur portable d'une résolution de 10,1" et d'une définition de 1366 x 768 pixels. L'écran se trouve face au participant à une distance d'environ 50 cm, la tablette étant posée devant.

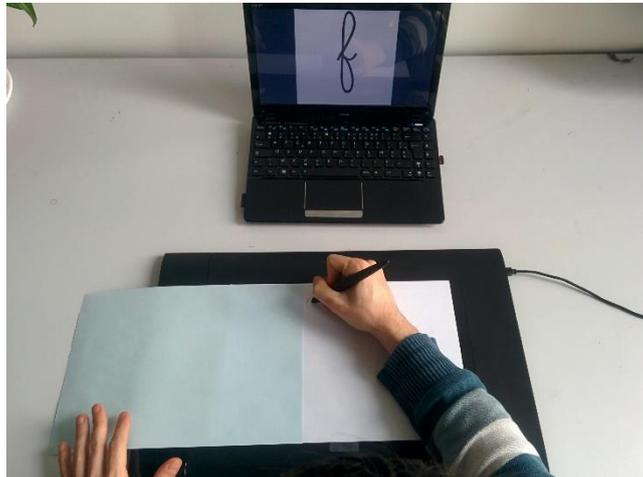


Figure 19. Dispositif expérimental du point de vue du participant. Le modèle est présenté à l'écran de l'ordinateur, puis le participant trace la lettre à l'aide du stylet sur une feuille vierge fixée sur la tablette graphique.

Au premier essai, pour s'assurer que la lettre ne soit pas confondue avec une autre, la production se réalise en présence du modèle de la lettre sans la nommer. Après ce premier essai, les 5 essais suivants se font en situation d'écriture spontanée sans modèle. A chaque tracé, la production est occultée à l'aide d'un cache pour éviter toute copie lors de l'écriture suivante. Afin de contrôler un éventuel effet d'ordre sur les productions, l'ordre de présentation des lettres est contrebalancé entre les participants. La consigne verbale est inspirée de celle du test du BHK (Charles, Soppelsa & Albaret, 2003) invitant à écrire sans contrainte en termes de qualité ou de vitesse et sans nommer la lettre : « *Voici la lettre que tu vas écrire plusieurs fois. Je te la montre une fois, puis je vais la cacher. Ecris comme tu as l'habitude d'écrire.* »

2.3. Recueil et traitement des données

L'enregistrement des tracés se fait à l'aide d'une tablette graphique Wacom Intuos 4 (format Large de 47,4 cm sur 32 cm, avec une épaisseur de 1,4 cm et un poids de 1,8 kg). Cet outil fonctionne sur le principe de l'électromagnétisme entre la tablette et le stylet. Il est alors possible d'enregistrer les tracés sur la zone active de 32,5 cm sur 20,3 cm, une feuille de format A4 pouvant être fixée dessus à l'aide de ruban adhésif. Le taux de transfert de l'enregistrement est estimé à 197 pps (points par seconde) et la résolution du stylet est de

l'ordre de 5080 lpi (*lines per inch*). Les tracés sont réalisés à l'aide d'un même stylet encreur à 2048 niveaux de pression pour conserver le même étalonnage de pression. La lecture du tracé se fait au contact du stylet avec la tablette mais elle peut également être maintenue lorsque le stylet est en l'air à une hauteur maximale de 10 mm.

Pour l'analyse des enregistrements réalisés par la tablette, le logiciel *Ecriture Suite* (Gilhodes & Velay, 2012) est utilisé. Son interface présentée en figure 20 permet une transcription visuelle des tracés. A l'aide d'un code couleur, il est possible de différencier les tracés au contact de la tablette (couleur) et les mouvements du stylet en l'air (gris). Différents paramètres dynamiques sont alors récoltés et analysés. Pour les indices de spatialité, la tablette mesure le nombre de tracés et la longueur totale de ces tracés (en millimètres). Les indices de temporalité regroupent la durée totale des tracés (en secondes) et la durée totale des levers, c'est-à-dire lorsque le stylet est en l'air et à moins de 10 mm de la tablette. La temporalité et la spatialité sont des composantes statiques du tracé. Afin d'évaluer le geste graphomoteur tout au long du mouvement, la tablette graphique permet d'accéder également à des données enregistrées du début à la fin du tracé. Concernant la cinématique du tracé, l'analyse par le logiciel informe sur la vitesse de tracé (en mm/s), le nombre de pauses, c'est-à-dire lorsque la vitesse de tracé est nulle, et sur la durée de ces pauses. La force graphique est évaluée par la pression moyenne (unité arbitraire) exercée sur la feuille par le biais du stylet. L'ensemble de ces indices est regroupé dans un tableau individuel pour chaque tracé.

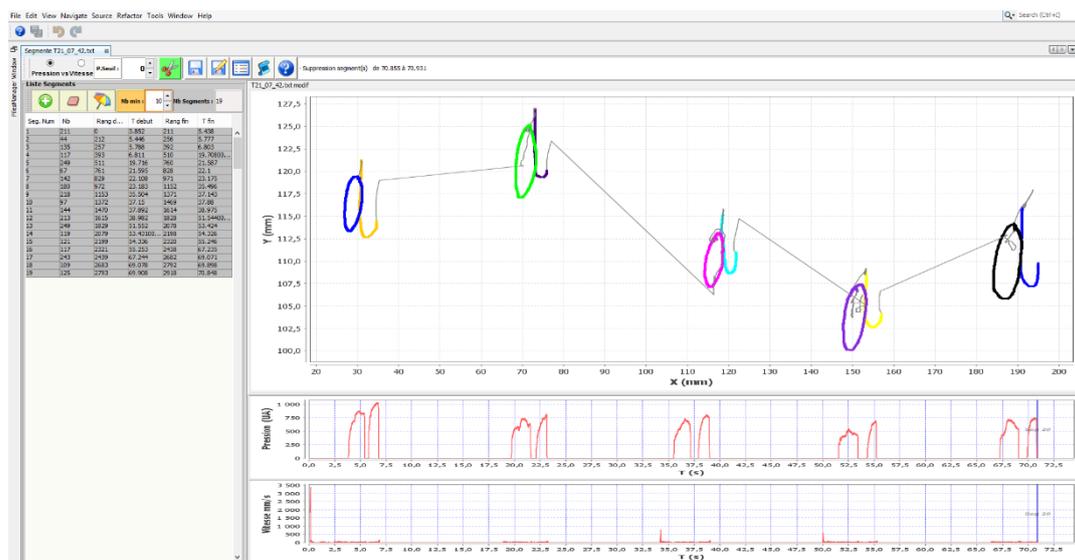


Figure 20. Présentation du logiciel *Ecriture Suite* (Gilhodes & Velay, 2012) d'acquisition et de traitement de l'écriture enregistrée à l'aide d'une tablette graphique. Dans le tableau de gauche, chaque ligne correspond à un tracé ou un lever. L'image de droite indique grâce à un code visuel les différents tracés de lettres (en couleur) et les levers entre chaque tracé (en gris). Les deux graphes en-dessous présentent l'évolution temporelle de la pression et de la vitesse (mm/s).

Les indices évalués dans l'étude 2 sont résumés dans le tableau 15 et sont regroupés en quatre domaines :

- La spatialité est évaluée par le nombre moyen de tracés composant une lettre et la longueur moyenne de la lettre,
- La temporalité est représentée par la durée moyenne du tracé de la lettre et des levers,
- La cinématique regroupe la vitesse moyenne de tracé, le nombre de pauses dans une lettre, et la durée totale de ces pauses,
- La force graphique équivaut à la pression moyenne au cours du tracé d'une lettre.

Tableau 15. Indices mesurées dans l'étude 2 afin d'évaluer la spatialité, la temporalité, la cinématique et la force graphique du tracé de lettres.

Domaine d'évaluation	Indices mesurés
Spatialité	Nombre moyen de tracés Longueur moyenne d'une lettre (mm)
Temporalité	Durée moyenne du tracé d'une lettre (s) Durée moyenne des levers (s)
Cinématique	Vitesse moyenne de tracé (mm/s) Nombre moyen de pauses Durée moyenne des pauses (s)
Force graphique	Pression moyenne sur le stylet (UA)

Pour chaque indice, une variabilité intraindividuelle est évaluée à l'aide du coefficient individuel de variation (ICV, *Individual Coefficient of Variation*). L'ICV est calculé à partir de l'écart-type pour une lettre tracée par un participant divisé par la moyenne individuelle entre les différents essais. Ce coefficient prend en compte l'écart-type individuel afin d'évaluer les différences individuelles par rapport aux performances moyennes. D'après Borella et collaborateurs (2011), l'ICV est considéré comme une variable fiable permettant de quantifier la variabilité intraindividuelle. Plus l'ICV est élevé, plus la variabilité intraindividuelle l'est aussi.

Pour chaque lettre écrite par un participant, un tableur individuel est créé, regroupant tous les indices présentés et leurs ICV respectifs. Afin de regrouper dans un seul tableur les données des 2130 lettres récoltées, un logiciel de macro (Macro Recorder Lite) est utilisé. Ce logiciel d'automatisation enregistre et reproduit les mouvements de souris et les touches de clavier, permettant de réduire considérablement le temps d'exécution d'une tâche répétitive tel que le remplissage d'un tableur de taille conséquente.

2.4. Analyses statistiques

Nos analyses vont se dérouler en trois étapes. Dans un premier temps, nous allons effectuer une comparaison des caractéristiques du tracé entre le groupe T21 et les groupes au développement typique (groupe AD et groupe AC). Dans un second temps, nous nous intéresserons à l'impact de la complexité des lettres dans les 3 groupes. Enfin, nous étudierons l'effet de l'âge de développement et de l'âge chronologique sur les performances entre les groupes T21 vs. AD et T21 vs. AC respectivement.

Pour les comparaisons inter-groupes, un test de normalité de Shapiro-Wilk pour chaque groupe ainsi que le test d'homogénéité des variances de Levene entre les trois groupes sont appliqués sur l'ensemble des indices. La normalité des données et l'homogénéité des variances ont été évaluées pour chaque indice et chaque ICV et reportées dans le tableau D1 (annexe D). Les analyses statistiques portent sur les effets principaux des groupes et de la complexité de la lettre, ainsi que leur interaction (Groupe x Complexité). Aucun des indices ou des ICV ne suit à la fois la loi normale et l'homogénéité des variances entre les groupes. Les données sont donc transformées en rang puis une ANOVA à mesures répétées est réalisée. Ceci permet de contourner l'absence de normalité tout en conservant une plus grande puissance statistique par rapport aux tests de randomisation des rangs tels que le test de Friedman (Baguley, 2012 ; Zimmerman & Zumbo, 1993). Pour le test post-hoc, les comparaisons multiples sont réalisées selon l'ajustement de Tukey. En vue d'étudier l'influence de l'âge de développement sur les indices et leurs ICV, deux ANCOVA à mesures répétées sur les rangs sont introduites. La première porte sur l'effet de l'âge de développement dans le groupe T21 et le groupe AD, et sur l'effet d'interaction avec le facteur groupe (Groupe x Âge de développement). Afin de connaître le sens d'évolution de la variable en fonction de l'âge, un test t permet de préciser le signe du coefficient β_1 . La deuxième ANCOVA portant sur l'âge chronologique suit la même démarche.

Pour l'ensemble de ces analyses à mesures répétées, un modèle linéaire à effets mixtes (LMM) est utilisé. Il permet ainsi d'étudier les effets fixes (groupe, complexité, âge de développement, âge chronologique) tout en introduisant les effets aléatoires. Selon le protocole de l'étude, un effet aléatoire peut exister entre les différents sujets de chaque groupe (1|Groupe:Sujet) et entre les différentes lettres (1|Lettre). Pour chaque indice et ICV, le tableau 16 présente les modèles ainsi que leurs caractéristiques D'après Wood (2006), le

modèle le mieux ajusté aux données est celui présentant le plus petit AIC (*Akaike Information Criterion* ; Akaike, 1973). Cependant, une alternative consiste à s'appuyer plutôt sur la variance expliquée à l'aide du R^2 . Dans le cas de modèles linéaires à effets mixtes, Nakagawa et Schielzeth (2013) préconisent l'utilisation du R^2 marginal correspondant à la variance expliquée par les effets fixes et du R^2 conditionnel rapportant la variance expliquée par les effets fixes et les effets aléatoires.

Tableau 16. Coefficients de détermination des modèles linéaires à effets mixtes pour chaque indice et chaque variabilité intraindividuelle.

Modèle	Groupe x Complexité		.. Âge de dév.		.. Âge chrono.	
Population		T21, AD, AC		T21, AD		T21, AC	
Indices		R^2_m	R^2_c	R^2_m	R^2_c	R^2_m	R^2_c
<i>Spatialité</i>							
Nombre de tracés		0,08	0,36	0,08	0,33	0,08	0,32
ICV		0,13	0,34	0,06	0,27	0,11	0,23
Longueur totale		0,32	0,82	0,23	0,75	0,17	0,84
ICV		0,24	0,43	0,13	0,36	0,23	0,36
<i>Temporalité</i>							
Durée des tracés		0,63	0,87	0,16	0,68	0,62	0,91
ICV		0,30	0,44	0,12	0,31	0,25	0,36
Durée des levers		0,09	0,35	0,07	0,32	0,08	0,32
ICV		0,13	0,34	0,03	0,24	0,12	0,28
<i>Cinématique</i>							
Vitesse de tracé		0,24	0,79	0,07	0,73	0,24	0,82
ICV		0,24	0,43	0,14	0,35	0,18	0,36
Nombre de pauses		0,25	0,50	0,06	0,44	0,20	0,45
ICV		0,01	0,10	0,02	0,17	0,03	0,09
Durée totale des pauses		0,28	0,52	0,05	0,43	0,24	0,49
ICV		0,01	0,10	0,02	0,14	0,03	0,10
<i>Force graphique</i>							
Pression		0,05	0,70	0,03	0,66	0,01	0,77
ICV		0,13	0,44	0,06	0,38	0,14	0,46

Note. ICV : coefficient individuel de variation ; R^2_m : coefficient marginal de détermination ; R^2_c : coefficient conditionnel de détermination.

Les différences significatives sont établies selon un seuil alpha de $p < 0,05$. L'ensemble des statistiques de l'étude 2 a été réalisé à l'aide du logiciel R (version 3.2.3) et des fonctions suivantes : *lmer* du package « lme4 » (Bates, Maechler, Bolker & Walker, 2015), *lsmeans* du package « lsmeans » (Lenth, 2015), *sem.model.fits* du package « piecewiseSEM » (Lefcheck, 2015).

3. Résultats

Pour chaque groupe, une matrice de corrélations avec ajustement de Holm est réalisée entre tous les indices (tableaux D2, D3, D4 ; annexe D), une autre matrice entre les ICV de chaque indice (tableaux D5, D6, D7) et une troisième entre les indices et leurs ICV (tableaux D8, D9, D10). L'ensemble des résultats sera ensuite résumé dans deux tableaux récapitulatifs puis synthétisé à la fin de l'étude.

3.1. Spatialité du tracé de lettres

La spatialité du tracé de lettres a été étudiée au travers du nombre de tracés nécessaires pour former une lettre et de la longueur totale du tracé. Les statistiques descriptives concernant ces deux indices sont présentées pour chaque groupe dans le tableau 17.

Tableau 17. Moyenne et écart-type des indices de spatialité et de leur variabilité intraindividuelle dans les trois groupes selon la complexité de la lettre.

	Groupe					
	T21		AD		AC	
	Indice	ICV	Indice	ICV	Indice	ICV
Nombre moy. de tracés	1,35 ± 0,63	0,110 ± 0,183	1,48 ± 0,83	0,18 ± 0,229	1,09 ± 0,29	0,022 ± 0,087
Facile	1,38 ± 0,62	0,129 ± 0,188	1,41 ± 0,72	0,164 ± 0,218	1,07 ± 0,27	0,019 ± 0,079
Difficile	1,32 ± 0,65	0,092 ± 0,178	1,56 ± 0,94	0,198 ± 0,240	1,11 ± 0,32	0,026 ± 0,094
Longueur moy. (mm)	69,76 ± 62,69	0,175 ± 0,161	90,33 ± 94,99	0,23 ± 0,214	36,15 ± 26,03	0,08 ± 0,042
Facile	45,61 ± 35,81	0,172 ± 0,175	73,95 ± 89,67	0,224 ± 0,228	25,95 ± 17,17	0,087 ± 0,046
Difficile	93,92 ± 73,61	0,178 ± 0,147	108,58 ± 97,55	0,236 ± 0,199	46,35 ± 29,22	0,074 ± 0,038

Note. Les valeurs reportées correspondent à la moyenne ± l'écart-type. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AD : groupe au développement typique de même âge de développement ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique ; ICV : coefficient individuel de variation.

L'ANOVA portant sur le **nombre moyen de tracés** pour une lettre a révélé un effet du groupe [$F_{(2,68)} = 12,17$; $p < 0,001$]. Les comparaisons multiples ont indiqué un nombre de tracés dans le groupe T21 non significativement différent de celui du groupe AD ($p = 0,28$) et significativement supérieur au groupe AC ($p < 0,01$). L'analyse de variance n'a pas mis en évidence d'effet significatif de la complexité [$F_{(1,28)} = 0,36$; $p = 0,55$] mais un effet significatif de l'interaction Groupe x Complexité est montré [$F_{(2,2069)} = 12,67$; $p < 0,001$]. Dans les trois groupes, les lettres faciles sont réalisées avec le même nombre de tracés que les lettres difficiles (T21 : $p = 0,71$; AD : $p = 0,22$; AC : $p = 0,98$). Comme représenté dans la figure 21, pour les lettres faciles, le groupe T21 trace le même nombre de tracés que le groupe AD ($p = 1,00$) et un nombre significativement supérieur au groupe AC ($p < 0,01$).

Pour les lettres difficiles, le groupe T21 produit significativement moins de traits que le groupe AD ($p < 0,05$) et un nombre similaire au groupe AC ($p = 0,21$). L'ANCOVA concernant l'âge de développement a montré un effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,44)} = 19,82$; $p < 0,001$] indiquant que le nombre de tracé diminue avec l'âge de développement ($\beta_1 = -0,18$), et ce, indépendamment du groupe [$F_{(1,44)} = 0,48$; $p = 0,49$]. L'ANCOVA portant sur l'âge chronologique n'a pas indiqué d'effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,44)} = 0,48$; $p = 0,49$], ni de l'interaction Groupe x Âge chronologique [$F_{(1,44)} = 0,48$; $p = 0,49$].

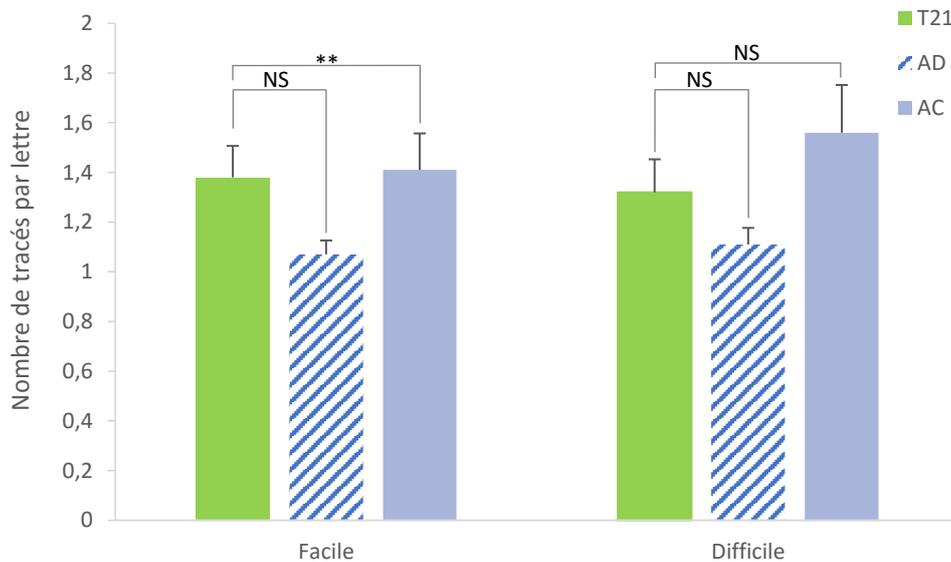


Figure 21. Nombre moyen de tracés pour les lettres faciles et difficiles dans les trois groupes. Les barres d'erreur verticales représentent l'erreur standard. T21 : groupe T21 ; AD : groupe au développement typique de même âge de développement ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique. * : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$; NS : non significatif.

L'ANOVA évaluant la variabilité intraindividuelle du nombre de tracés a mis en évidence un effet significatif du groupe [$F_{(2,68)} = 15,43$; $p < 0,001$]. Le groupe T21 présente un ICV ne variant pas significativement de celui du groupe AD ($p = 0,088$) et supérieur à celui du groupe AC ($p < 0,01$). Il n'y a cependant pas d'effet significatif de la complexité [$F_{(1,4)} = 0,018$; $p = 0,90$], ni de l'interaction Groupe x Complexité [$F_{(2,423)} = 2,23$; $p = 0,11$]. L'ANCOVA portant sur l'âge de développement a rapporté un effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,44)} = 6,19$; $p < 0,05$] indiquant que la variabilité du nombre de tracés diminue avec l'âge de développement ($\beta_1 = -0,14$), et ce, indépendamment du groupe [$F_{(1,44)} = 0,30$; $p = 0,59$]. Pour l'âge chronologique, l'ANCOVA n'a pas révélé d'effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,44)} = 3,90$; $p = 0,055$], ni de l'interaction Groupe x Âge chronologique [$F_{(1,44)} = 0,30$; $p = 0,59$].

Concernant la **longueur moyenne d'une lettre**, l'ANCOVA a montré un effet significatif du groupe [$F_{(2,68)} = 11,63$; $p < 0,001$] indiquant que le groupe T21 réalise des lettres de longueur similaire à ceux du groupe AD ($p = 0,57$) et supérieure à ceux du groupe AC ($p < 0,01$). L'ANCOVA a également révélé un effet significatif de la complexité de la lettre [$F_{(1,28)} = 242,42$; $p < 0,001$] et de l'interaction Groupe x Complexité [$F_{(2,2069)} = 13,84$; $p < 0,001$]. Cependant, les tracés de lettres faciles ou de lettres difficiles dans le groupe T21 sont similaires à ceux du groupe AD (facile : $p = 0,70$; difficile : $p = 0,99$) et sont de longueur supérieure à ceux du groupe AC (facile : $p < 0,05$; difficile : $p < 0,01$). L'ANCOVA portant sur l'âge de développement a montré un effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,44)} = 19,00$; $p < 0,001$] et de l'interaction Groupe x Âge de développement [$F_{(1,44)} = 15,88$; $p < 0,001$]. La longueur d'une lettre ne dépend pas de l'âge de développement dans le groupe T21 ($p = 0,87$) et elle diminue avec l'âge de développement dans le groupe AD ($\beta_1 = -0,62$; $p < 0,001$). L'ANCOVA concernant l'âge chronologique n'a pas révélé d'effet significatif de la co-variable [$F_{(1,44)} = 2,65$; $p = 0,11$], et ce, quel que soit le groupe [$F_{(1,44)} = 0,0035$; $p = 0,95$].

Pour la variabilité intraindividuelle de la longueur des tracés, l'ANOVA a mis en évidence un effet significatif du groupe [$F_{(2,68)} = 27,71$; $p < 0,001$] indiquant un ICV du groupe T21 similaire à celui du groupe AD ($p = 0,15$) et supérieur à celui du groupe AC ($p < 0,001$). L'analyse de variance n'a pas montré d'effet significatif de la complexité de la lettre [$F_{(1,4)} = 1,16$; $p = 0,28$], ni de l'interaction Groupe x Complexité [$F_{(2,423)} = 1,13$; $p = 0,32$]. L'ANCOVA portant sur l'âge de développement a montré un effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,44)} = 13,84$; $p < 0,001$] mais pas de l'interaction Groupe x Âge de développement [$F_{(1,44)} = 0,64$; $p = 0,43$]. La variabilité intraindividuelle de la longueur des tracés diminue avec l'âge de développement ($\beta_1 = -0,24$). Des résultats similaires sont observés concernant l'effet de l'âge chronologique [$F_{(1,44)} = 8,43$; $p = 0,43$] ($\beta_1 = -0,28$), et ce, indépendamment du groupe de participants [$F_{(1,44)} = 1,14$; $p = 0,29$].

3.2. Temporalité du tracé de lettres et des levers

La temporalité a été évaluée par la durée totale du tracé et la durée totale du lever de stylet. Les statistiques descriptives concernant ces deux indices sont présentées pour chaque groupe dans le tableau 18.

Tableau 18. Moyenne et écart-type des indices de temporalité et de leur variabilité intraindividuelle dans les trois groupes selon la complexité de la lettre.

	Groupe					
	T21		AD		AC	
	Indice	ICV	Indice	ICV	Indice	ICV
Durée moy. des tracés (s)	2,54 ± 1,86	0,193 ± 0,149	3,01 ± 2,68	0,291 ± 0,222	0,65 ± 0,36	0,098 ± 0,079
Facile	1,90 ± 1,11	0,199 ± 0,150	2,32 ± 1,82	0,267 ± 0,173	0,54 ± 0,21	0,096 ± 0,065
Difficile	3,17 ± 2,21	0,187 ± 0,149	3,79 ± 3,23	0,317 ± 0,265	0,76 ± 0,44	0,1 ± 0,091
Durée moy. des levers (s)	0,19 ± 0,48	1,064 ± 0,784	0,52 ± 2,97	1,208 ± 0,697	0,03 ± 0,14	0,829 ± 0,884
Facile	0,20 ± 0,49	1,075 ± 0,824	0,25 ± 0,49	1,171 ± 0,752	0,02 ± 0,08	0,799 ± 0,870
Difficile	0,19 ± 0,48	1,049 ± 0,742	0,82 ± 4,28	1,245 ± 0,648	0,04 ± 0,19	0,85 ± 0,944

Note. Les valeurs reportées correspondent à la moyenne ± l'écart-type. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AD : groupe au développement typique de même âge de développement ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique ; ICV : coefficient individuel de variation.

L'ANOVA portant sur la **durée moyenne des tracés** a montré un effet significatif du groupe [$F_{(2,68)} = 87,97$; $p < 0,001$]. Les tests post-hoc indiquent une durée du groupe T21 non significativement différente de celle du groupe AD ($p = 0,34$) et significativement supérieure à celle du groupe AC ($p < 0,001$). L'analyse de variance a également mis en évidence un effet significatif de la complexité de la lettre [$F_{(1,28)} = 115,17$; $p < 0,001$] et de l'interaction Groupe x Complexité [$F_{(2,2069)} = 31,28$; $p < 0,001$]. Les tracés du groupe T21 durent aussi longtemps que ceux du groupe AD et sont de durée supérieure à ceux du groupe AC, aussi bien pour les lettres faciles (T21 vs. AD : $p = 0,81$; T21 vs. AC : $p < 0,001$) que difficiles (T21 vs. AD : $p = 0,64$; T21 vs. AC : $p < 0,001$). Un effet significatif de l'âge de développement est rapporté par l'ANCOVA [$F_{(1,44)} = 14,69$; $p < 0,001$] ainsi qu'un effet significatif de l'interaction Groupe x Âge de développement [$F_{(1,44)} = 6,00$; $p < 0,05$]. La durée des tracés dans le groupe T21 ne dépend pas de l'âge de développement ($p = 0,46$) alors que dans le groupe AD la durée diminue avec l'âge de développement ($\beta_1 = -0,51$; $p < 0,001$). L'ANCOVA portant sur l'âge chronologique n'a pas révélé d'effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,44)} = 2,85$; $p = 0,10$], ni de l'interaction Groupe x Âge chronologique [$F_{(1,44)} = 0,0021$; $p = 0,96$].

L'ANOVA évaluant la variabilité intraindividuelle de la durée des tracés a mis en évidence un effet significatif du groupe [$F_{(1,44)} = 6,00$; $p < 0,05$] révélant un ICV du groupe T21 inférieur à celui du groupe AD ($p < 0,01$) et supérieur à celui du groupe AC ($p < 0,001$). L'analyse de variance n'a pas indiqué d'effet significatif de la complexité de la lettre [$F_{(1,4)} = 0,98$; $p = 0,32$], ni de l'interaction Groupe x Complexité [$F_{(2,423)} = 0,33$; $p = 0,72$]. L'ANCOVA portant sur l'âge de développement a montré un effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,44)} = 7,31$; $p < 0,01$]. L'ICV de la durée des tracés diminue avec l'âge de

développement ($\beta_1 = -0,23$), et ce, indépendamment du groupe [$F_{(1,44)} = 0,014$; $p = 0,91$]. L'ANCOVA pour l'âge chronologique n'a pas révélé d'effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,44)} = 3,02$; $p = 0,089$] mais un effet significatif de l'interaction Groupe x Âge chronologique a été mis en évidence [$F_{(1,44)} = 4,70$; $p < 0,05$]. La variabilité intraindividuelle de la durée des tracés diminue avec l'âge chronologique dans le groupe T21 ($\beta_1 = -0,33$; $p < 0,01$) contrairement au groupe AC dont l'ICV ne dépend pas de l'âge chronologique ($p = 0,77$).

Concernant la **durée moyenne des levers**, l'ANOVA a révélé un effet significatif du groupe [$F_{(2,68)} = 12,27$; $p < 0,001$], indiquant une durée dans le groupe T21 similaire à celle du groupe AD ($p = 0,30$) et significativement supérieure à celle du groupe AC ($p < 0,01$). L'analyse de variance n'a pas rapporté d'effet significatif de la complexité [$F_{(1,28)} = 0,48$; $p = 0,49$] mais un effet significatif de l'interaction Groupe x Complexité a été mis en évidence [$F_{(2,2069)} = 13,90$; $p < 0,001$]. Comme présenté dans la figure 22, pour les lettres faciles, le groupe T21 présente une durée de levers ne variant pas significativement de celle du groupe AD ($p = 1,00$) mais significativement supérieure à celle du groupe AC ($p < 0,01$). Pour les lettres difficiles, la durée des levers du groupe T21 est significativement inférieure au groupe AD ($p < 0,05$) et similaire au groupe AC ($p = 0,17$). Un effet significatif de l'âge de développement a été montré par l'ANCOVA [$F_{(1,44)} = 14,75$; $p < 0,001$], indiquant une durée de levers diminuant avec l'âge de développement ($\beta_1 = -0,17$), et ce, quel que soit le groupe [$F_{(1,44)} = 0,14$; $p = 0,71$]. L'ANCOVA portant sur l'âge chronologique n'a pas révélé d'effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,44)} = 0,23$; $p = 0,63$], ni de l'interaction Groupe x Âge chronologique [$F_{(1,44)} = 3,03$; $p = 0,09$].

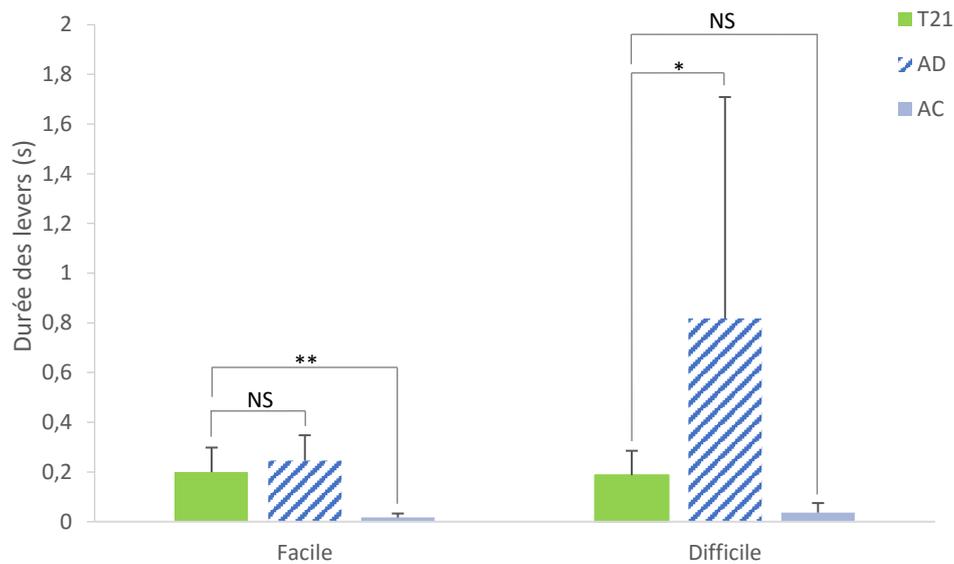


Figure 22. Durée moyenne des levers pour les lettres faciles et difficiles dans les trois groupes. Les barres d'erreur verticales représentent l'erreur standard. T21 : groupe T21 ; AD : groupe au développement typique de même âge de développement ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique. * : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$; NS : non significatif.

L'ANOVA sur la variabilité intraindividuelle de la durée des levers a mis en évidence un effet significatif du groupe [$F_{(2,68)} = 18,03$; $p < 0,001$], indiquant un ICV du groupe T21 similaire à celui du groupe AD ($p = 0,27$) et supérieur à celui du groupe AC ($p < 0,001$). L'analyse de variance n'a pas rapporté d'effet significatif de la complexité [$F_{(1,4)} = 0,014$; $p = 0,91$], ni de l'interaction Groupe x Complexité [$F_{(2,423)} = 2,35$; $p = 0,097$]. L'ANCOVA portant sur l'âge de développement a révélé un effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,44)} = 4,07$; $p < 0,05$]. Plus précisément, l'ICV de la durée des levers diminue avec l'âge de développement ($\beta_1 = -0,16$), et ce, indépendamment du groupe [$F_{(1,44)} = 0,15$; $p = 0,70$]. L'ANCOVA concernant l'âge chronologique n'a pas révélé d'effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,44)} = 1,01$; $p = 0,32$], ni de l'interaction Groupe x Âge chronologique [$F_{(1,44)} = 1,03$; $p = 0,31$].

3.3. Cinématique du tracé de lettres

La cinématique du tracé calligraphique a été étudiée au travers de trois indices : la vitesse du stylet sur la feuille, le nombre et la durée des pauses. Les statistiques descriptives concernant les trois indices et leur variabilité intraindividuelle respective (coefficient ICV) sont présentées pour chaque groupe dans le tableau 19. L'effet du groupe, de la complexité de la lettre ainsi que les effets de l'âge de développement et de l'âge chronologique sont analysés pour chaque indice.

Tableau 19. Moyenne et écart-type des indices cinématiques et de leur variabilité intraindividuelle dans les trois groupes selon la complexité de la lettre.

	Groupe					
	T21		AD		AC	
	Indice	ICV	Indice	ICV	Indice	ICV
Vitesse de tracé (mm/s)	33,97 ± 30,6	0,161 ± 0,108	33,54 ± 28,44	0,232 ± 0,144	55,01 ± 25,03	0,101 ± 0,061
Facile	29,32 ± 27,20	0,167 ± 0,121	32,57 ± 27,73	0,23 ± 0,147	47,23 ± 20,24	0,103 ± 0,063
Difficile	38,63 ± 33,04	0,156 ± 0,094	34,62 ± 29,22	0,234 ± 0,141	62,79 ± 26,90	0,098 ± 0,060
Nombre moy. de pauses	2,51 ± 4,24	0,826 ± 0,489	4,63 ± 9,72	0,859 ± 0,457	0,49 ± 0,79	1,324 ± 0,658
Facile	1,87 ± 2,60	0,913 ± 0,553	3,34 ± 8,07	0,839 ± 0,473	0,47 ± 0,71	1,334 ± 0,702
Difficile	3,15 ± 5,34	0,747 ± 0,409	6,09 ± 11,13	0,880 ± 0,443	0,52 ± 0,87	1,313 ± 0,618
Durée moy. des pauses (s)	0,13 ± 0,55	0,984 ± 0,497	0,25 ± 0,62	1,02 ± 0,508	0,01 ± 0,08	1,455 ± 0,589
Facile	0,07 ± 0,13	1,077 ± 0,544	0,16 ± 0,38	1,004 ± 0,510	0,01 ± 0,03	1,441 ± 0,613
Difficile	0,20 ± 0,77	0,898 ± 0,437	0,34 ± 0,79	1,037 ± 0,509	0,01 ± 0,10	1,469 ± 0,569

Note. Les valeurs reportées correspondent à la moyenne ± l'écart-type. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AD : groupe au développement typique de même âge de développement ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique ; ICV : coefficient individuel de variation.

L'ANOVA portant sur la **vitesse moyenne de tracé** a montré un effet significatif du groupe [$F_{(1,44)} = 4,07$; $p < 0,05$], indiquant une vitesse dans le groupe T21 similaire à celle du groupe AD ($p = 0,96$) et significativement inférieure à celle du groupe AC ($p < 0,001$). Un effet significatif de la complexité [$F_{(1,28)} = 47,89$; $p < 0,001$] ainsi que de l'interaction Groupe x Complexité [$F_{(2,2069)} = 11,82$; $p < 0,001$] ont été révélés par l'analyse de variance. La vitesse de tracé dans le groupe T21 est comparable à celle du groupe AD et significativement inférieure à celle du groupe AC, aussi bien pour les lettres faciles (T21 vs. AD : $p = 0,99$; T21 vs. AC : $p < 0,001$) que difficiles (T21 vs. AD : $p = 1,00$; T21 vs. AC : $p < 0,001$). Concernant l'âge de développement, l'ANCOVA n'a pas révélé d'effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,44)} = 1,99$; $p = 0,17$], ni de l'interaction Groupe x Âge de développement [$F_{(1,44)} = 3,33$; $p = 0,07$]. L'ANCOVA portant sur l'âge chronologique n'a pas révélé d'effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,44)} = 0,10$; $p = 0,75$], et ce, indépendamment du groupe [$F_{(1,44)} = 0,0032$; $p = 0,96$].

L'ANOVA évaluant la variabilité intraindividuelle de la vitesse a mis en évidence un effet significatif du groupe [$F_{(2,68)} = 28,69$; $p < 0,001$], indiquant un ICV du groupe T21 inférieur à celui du groupe AD ($p < 0,01$) et supérieur à celui du groupe AC ($p < 0,001$). L'analyse de variance n'a pas révélé d'effet significatif de la complexité [$F_{(1,4)} = 0,66$; $p = 0,42$], ni de l'interaction Groupe x Complexité [$F_{(2,423)} = 0,15$; $p = 0,86$]. L'ANCOVA portant sur l'âge de développement a rapporté un effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,44)} = 8,98$; $p < 0,01$], révélant une variabilité intraindividuelle qui diminue avec l'âge de

développement ($\beta_1 = -0,20$), et ce, indépendamment du groupe [$F_{(1,44)} = 0,24$; $p = 0,63$]. Concernant l'âge chronologique, l'ANCOVA n'a pas mis en évidence d'effet de cette co-variable [$F_{(1,44)} = 4,01$; $p = 0,051$] mais un effet significatif de l'interaction Groupe x Âge chronologique est montré [$F_{(1,44)} = 6,63$; $p < 0,05$]. Le coefficient individuel de variation diminue avec l'âge chronologique dans le groupe T21 ($\beta_1 = -0,43$; $p < 0,001$) et il est indépendant de l'âge chronologique dans le groupe AC ($p = 0,46$).

Pour le **nombre moyen de pauses**, l'ANOVA a rapporté un effet significatif du groupe [$F_{(2,68)} = 32,75$; $p < 0,001$], indiquant que le groupe T21 réalise dans son tracé autant de pauses que le groupe AD ($p = 0,11$) et significativement plus de pauses que le groupe AC ($p < 0,001$). L'analyse de variance a également mis en évidence un effet significatif de la complexité de la lettre [$F_{(1,28)} = 13,30$; $p < 0,01$] et de l'interaction Groupe x Complexité [$F_{(2,2069)} = 9,74$; $p < 0,001$]. Cependant, le nombre de pauses dans le groupe T21 est comparable à celui du groupe AD et significativement supérieur à celui du groupe AC, aussi bien pour les lettres faciles (T21 vs. AD : $p = 0,30$; T21 vs. AC : $p < 0,001$) que difficiles (T21 vs. AD : $p = 0,41$; T21 vs. AC : $p < 0,001$). Le nombre de pauses est indépendant de la complexité de la lettre dans le groupe AC ($p = 1,00$). Concernant l'effet de l'âge de développement et de l'âge chronologique, les ANCOVA n'indiquent pas d'effet significatif de ces deux co-variables (effet âge de développement : [$F_{(1,44)} = 3,28$; $p = 0,08$] ; effet âge chronologique : [$F_{(1,44)} = 0,19$; $p = 0,66$]), ni de l'interaction Groupe x Âge de développement [$F_{(1,44)} = 2,18$; $p = 0,15$] ou encore Groupe x Âge chronologique [$F_{(1,44)} = 0,31$; $p = 0,58$].

L'ANOVA portant sur la variabilité intraindividuelle du nombre de pauses n'a pas révélé d'effet significatif du groupe [$F_{(2,68)} = 0,64$; $p = 0,53$], De plus, l'analyse n'a pas mis en évidence d'effet significatif de la complexité de la lettre [$F_{(1,4)} = 0,047$; $p = 0,83$], et ce, quel que soit le groupe [$F_{(2,423)} = 0,41$; $p = 0,67$]. L'ANCOVA concernant l'âge de développement n'a pas montré d'effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,44)} = 2,20$; $p = 0,15$], ni de l'interaction Groupe x Âge de développement [$F_{(1,44)} = 1,16$; $p = 0,29$]. Pour l'âge chronologique, l'ANCOVA n'a pas révélé d'effet de cette co-variable [$F_{(1,44)} = 0,27$; $p = 0,61$] mais un effet significatif de l'interaction Groupe x Âge chronologique est mis en évidence [$F_{(1,44)} = 5,92$; $p < 0,05$]. Le coefficient individuel de variation dans le groupe T21 est indépendant de l'âge chronologique ($p = 0,10$) et l'ICV augmente avec l'âge chronologique dans le groupe AC ($\beta_1 = 0,17$; $p < 0,05$).

Concernant la **durée moyenne des pauses**, l'ANOVA a indiqué un effet significatif du groupe [$F_{(2,68)} = 40,12 ; p < 0,001$]. Les tests post-hoc révèlent une durée des pauses dans le groupe T21 non significativement différente de celle du groupe AD ($p = 0,086$) et significativement supérieure à celle du groupe AC ($p < 0,001$). Un effet significatif de la complexité [$F_{(1,28)} = 12,11 ; p < 0,01$] ainsi qu'un effet significatif de l'interaction Groupe x Complexité [$F_{(2,2069)} = 12,75 ; p < 0,001$] ont été rapportés. La durée des pauses dans le groupe T21 est similaire à celle du groupe AD et significativement supérieure à celle du groupe AC, aussi bien pour les lettres faciles (T21 vs. AD : $p = 0,18$; T21 vs. AC : $p < 0,001$) que les lettres difficiles (T21 vs. AD : $p = 0,47$; T21 vs. AC : $p < 0,001$). Concernant l'effet de l'âge de développement et de l'âge chronologique, les ANCOVA n'indiquent pas d'effet significatif de ces deux co-variables (effet âge de développement : [$F_{(1,44)} = 1,57 ; p = 0,22$] ; effet âge chronologique : [$F_{(1,44)} = 0,39 ; p = 0,53$]), ni de l'interaction Groupe x Âge de développement [$F_{(1,44)} = 1,78 ; p = 0,19$] ou encore Groupe x Âge chronologique [$F_{(1,44)} = 0,29 ; p = 0,59$].

L'ANOVA portant sur la variabilité intraindividuelle de la durée des pauses n'a pas mis en évidence d'effet significatif du groupe [$F_{(2,68)} = 0,60 ; p = 0,55$], ni de la complexité de la lettre [$F_{(1,4)} = 0,0084 ; p = 0,93$] ou encore de l'interaction Groupe x Complexité [$F_{(2,423)} = 0,29 ; p = 0,75$]. L'ANCOVA portant sur l'âge de développement n'a pas montré d'effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,44)} = 2,92 ; p = 0,094$], ni de l'interaction Groupe x Âge de développement [$F_{(1,44)} = 0,98 ; p = 0,54$]. L'ANCOVA relative à l'âge chronologique n'a pas révélé d'effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,44)} = 0,097 ; p = 0,76$] mais un effet significatif de l'interaction Groupe x Âge chronologique a été noté [$F_{(1,44)} = 5,21 ; p < 0,05$]. Le coefficient individuel de variation ne dépend pas de l'âge chronologique dans le groupe T21 ($p = 0,096$), ni dans le groupe AC ($p = 0,47$).

3.4. Force graphique dans le tracé de lettres

La force graphique est évaluée à partir de la pression moyenne exercée sur la tablette par le biais du stylet. Les statistiques descriptives concernant cet indice et la variabilité intraindividuelle (coefficient ICV) sont présentées pour chaque groupe dans le tableau 20.

Tableau 20. Moyenne et écart-type de l'indice de force graphique et de la variabilité intraindividuelle dans les trois groupes selon la complexité de la lettre.

	Groupe					
	T21		AD		AC	
	Indice	ICV	Indice	ICV	Indice	ICV
Pression moy. (UA)	563,2 ± 201,7	0,135 ± 0,124	638,1 ± 192,0	0,15 ± 0,101	559,3 ± 171,4	0,077 ± 0,048
Facile	548,6 ± 206,3	0,147 ± 0,138	602,9 ± 200,1	0,158 ± 0,095	572,3 ± 175,9	1,469 ± 0,569
Difficile	577,9 ± 196,1	0,124 ± 0,108	677,3 ± 174,8	0,14 ± 0,107	546,3 ± 166,0	0,075 ± 0,047

Note. Les valeurs reportées correspondent à la moyenne ± l'écart-type. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AD : groupe au développement typique de même âge de développement ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique ; ICV : coefficient individuel de variation.

Pour la **pression moyenne** exercée sur la feuille, l'ANOVA n'a pas indiqué d'effet significatif du groupe [$F_{(2,68)} = 1,60$; $p = 0,21$]. L'analyse de variance a rapporté un effet significatif de la complexité de la lettre [$F_{(1,28)} = 26,03$; $p < 0,001$] et de l'interaction Groupe x Complexité [$F_{(2,2069)} = 40,05$; $p < 0,001$]. Cependant, la pression ne dépend pas du groupe, aussi bien pour les lettres faciles (T21 vs. AD : $p = 0,96$; T21 vs. AC : $p = 1,00$) que pour les lettres difficiles (T21 vs. AD : $p = 0,39$; T21 vs. AC : $p = 0,95$). Concernant l'effet de l'âge de développement et de l'âge chronologique, les ANCOVA n'indiquent pas d'effet significatif de ces deux co-variables (effet âge de développement : [$F_{(1,44)} = 0,26$; $p = 0,61$] ; effet âge chronologique : [$F_{(1,44)} = 0,45$; $p = 0,51$]), ni de l'interaction Groupe x Âge de développement [$F_{(1,44)} = 0,20$; $p = 0,65$] ou encore Groupe x Âge chronologique [$F_{(1,44)} = 0,0042$; $p = 0,95$].

L'ANOVA portant sur la variabilité intraindividuelle de la pression a révélé un effet significatif du groupe [$F_{(2,68)} = 10,72$; $p < 0,001$] indiquant un ICV du groupe T21 similaire à celui du groupe AD ($p = 0,23$) et supérieur à celui du groupe AC ($p < 0,05$). L'analyse de variance n'a pas révélé d'effet significatif de la complexité de la lettre [$F_{(1,4)} = 3,32$; $p = 0,14$], ni de l'interaction Groupe x Complexité [$F_{(2,423)} = 0,83$; $p = 0,44$]. L'ANCOVA concernant l'âge de développement n'a pas montré d'effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,44)} = 3,32$; $p = 0,075$], ni de l'interaction Groupe x Âge de développement [$F_{(1,44)} = 1,23$; $p = 0,27$]. L'ANCOVA a mis en évidence un effet significatif de l'âge chronologique [$F_{(1,44)} = 5,03$; $p < 0,05$], indiquant que le coefficient individuel de variation diminue avec l'âge chronologique, et ce, indépendamment du groupe [$F_{(1,44)} = 3,04$; $p = 0,088$].

Le lien entre les indices et leur variabilité intraindividuelle a été étudié pour l'ensemble des mesures dans les trois groupes (tableaux D8, D9 et D10 ; annexe D). Seule la corrélation entre la pression et l'ICV de la pression est significative dans les trois groupes (T21 : $r = -0,50$; $p < 0,001$; AD : $r = -0,44$; $p < 0,001$; AC : $r = -0,55$; $p < 0,001$). Pour

l'ensemble des autres corrélations, le p est inférieur à 0,05 ou le coefficient de corrélation est inférieur à 0,40, valeur fixée d'après la table du r pour un effectif de 23 ou 24 individus. Afin de connaître le sens de l'effet entre la pression et sa variation intraindividuelle, deux régressions ont été réalisées pour chaque groupe. La pression diminue lorsque l'ICV augmente dans les trois groupes (T21 : $\beta_1 = -261$; $p < 0,001$; AD : $\beta_1 = -476$; $p < 0,001$; AC : $\beta_1 = -546$; $p < 0,001$). De plus, l'ICV augmente si la pression diminue dans les trois groupes (T21 : $\beta_1 = -0,00023$; $p < 0,001$; AD : $\beta_1 = -0,00021$; $p < 0,001$; AC : $\beta_1 = -0,00013$; $p < 0,001$).

Le détail des comparaisons entre le groupe AD et le groupe AC est reporté dans le tableau D11 (annexe D) pour les indices et dans le tableau D12 pour les ICV.

4. Synthèse des résultats de l'étude 2

L'objectif de cette étude a été d'étudier la dynamique du tracé dans la population T21 par comparaison avec la population typique. La tâche a consisté à tracer différentes lettres sur une tablette graphique. L'ensemble des résultats concernant les effets sur chaque indice est résumé dans le tableau 21. Les analyses révèlent une similarité des performances entre le groupe T21 et le groupe AD sur l'ensemble des indices étudiés. Le tracé de lettres ne diffère pas entre les deux groupes d'après le nombre de tracés, la longueur d'une lettre, la durée des tracés et des levers, la vitesse de tracé, le nombre et la durée des pauses, et la pression. Comparativement au groupe typique de même âge chronologique, le groupe T21 réalise des lettres de longueur supérieure et composées d'un plus grand nombre de tracés. Pour la cinématique des tracés, le groupe T21 écrit les lettres à une vitesse inférieure avec des pauses plus nombreuses et plus longues par rapport au groupe typique de même âge chronologique. Pour la grande majorité des indices, ces effets du groupe sont présents aussi bien pour les lettres faciles que les lettres difficiles. Cependant, les analyses sur l'effet de la complexité de la lettre présentent une particularité pour le nombre de tracés et la durée des levers. Pour les lettres faciles, le groupe T21 produit un nombre de tracés et une durée des levers d'un niveau similaire au groupe typique de même âge de développement et inférieur à celui de même âge chronologique. A l'opposé, pour les lettres difficiles, le groupe T21 présente des performances supérieures au groupe typique de même âge de développement et comparables au groupe typique de même âge chronologique.

Pour chaque groupe, les effets de l'âge de développement et de l'âge chronologique sur le tracé de lettres ont été évalués. Le nombre de tracés composant une lettre évolue avec l'âge de développement dans le groupe T21 et le groupe typique de même âge de développement. Dans ces deux groupes, le nombre, la durée des pauses ainsi que de la pression ne varient pas selon l'âge de développement. La seule différence significative entre les deux groupes concerne le nombre de tracés et la durée des levers qui dépendent de l'âge de développement dans le groupe typique mais pas dans le groupe T21. Pour l'ensemble des indices, l'âge chronologique n'influence pas les performances du groupe T21 ni du groupe typique de même âge chronologique.

Les résultats concernant la variation intraindividuelle sont détaillés dans le tableau 22 pour chaque indice. Le groupe T21 présente une variabilité intraindividuelle similaire à celle du groupe typique de même âge de développement pour la longueur et le nombre de tracés composant une lettre, le nombre et la durée des pauses ainsi que la pression. La variabilité de la vitesse et de la durée de tracé dans le groupe T21 est inférieure à celle du groupe typique de même âge de développement. Comparativement au groupe typique de même âge chronologique, le groupe T21 présente une variabilité intraindividuelle plus importante pour l'ensemble des indices, sauf pour le nombre et la durée des pauses pour lesquels les trois groupes varient à un niveau comparable. D'après les régressions portant sur l'effet de l'ICV sur chaque indice, la pression exercée sur le stylet serait plus stable lorsqu'elle est élevée dans les trois groupes. Aucun effet significatif de la variation intraindividuelle sur les autres indices n'a été mis en évidence.

Tableau 21. Récapitulatif des résultats sur les indices du tracé de lettres de l'étude 2.

Indice	Effet				
	Groupe		Groupe x Complexité	Gr x Âge de dév.	Gr x Âge chrono.
<i>Spatialité</i>					
Nombre de tracés	T21 = AD	T21 > AC	fac. : T21=AD T21>AC diff. : T21<AD T21=AC	T21 et AD : ↘	NS
Longueur d'une lettre	T21 = AD	T21 > AC	fac. : T21=AD T21>AC diff. : T21=AD T21>AC	T21 : NS AD : ↘	NS
<i>Temporalité</i>					
Durée des tracés	T21 = AD	T21 > AC	fac. : T21=AD T21>AC diff. : T21=AD T21>AC	T21 : NS AD : ↘	NS
Durée des levers	T21 = AD	T21 > AC	fac. : T21=AD T21>AC diff. : T21<AD T21=AC	T21 et AD : ↘	NS
<i>Cinématique</i>					
Vitesse de tracé	T21 = AD	T21 < AC	fac. : T21=AD T21<AC diff. : T21=AD T21<AC	T21 : NS AD : ↘	NS
Nombre de pauses	T21 = AD	T21 > AC	fac. : T21=AD T21>AC diff. : T21=AD T21>AC	NS	NS
Durée des pauses	T21 = AD	T21 > AC	fac. : T21=AD T21>AC diff. : T21=AD T21>AC	NS	NS
<i>Force graphique</i>					
Pression	NS		fac. : T21=AD T21=AC diff. : T21=AD T21=AC	NS	NS

Note. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AD : groupe au développement typique de même âge de développement ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique ; fac. : lettre facile ; diff. : lettre difficile ; NS : effet non significatif ; ↗ : augmente selon la variable ; ↘ : diminue selon la variable.

Tableau 22. Récapitulatif des résultats sur la variation intraindividuelle des indices de l'étude 2.

Variation intraindividuelle	Effet				
	Groupe		Groupe x Complexité	Gr x Âge de dév.	Gr x Âge chrono.
<i>Spatialité</i>					
Nombre de tracés	T21 = AD	T21 > AC	NS	T21 et AD : ↘	NS
Longueur d'une lettre	T21 = AD	T21 > AC	NS	T21 et AD : ↘	T21 et AC : ↘
<i>Temporalité</i>					
Durée du tracé d'une lettre	T21 < AD	T21 > AC	NS	T21 et AD : ↘	T21 : ↘ AC : NS
Durée des levers	T21 = AD	T21 > AC	NS	T21 et AD : ↘	NS
<i>Cinématique</i>					
Vitesse de tracé	T21 < AD	T21 > AC	NS	T21 et AD : ↘	T21 : ↘ AC : NS
Nombre de pauses		NS	NS	NS	T21 : NS AC : ↗
Durée des pauses		NS	NS	NS	NS
<i>Force graphique</i>					
Pression	T21 = AD	T21 > AC	NS	NS	T21 et AC : ↘

Note. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AD : groupe au développement typique de même âge de développement ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique ; NS : effet non significatif ; ↗ : augmente selon la variable ; ↘ : diminue selon la variable.

A présent, nous allons nous intéresser à l'effet des modalités de présentation de la lettre sur la dynamique du tracé au travers d'une troisième étude.

Etude 3 : impact des modalités de présentation des lettres sur la dynamique du tracé

1. Objectifs et hypothèses

L'objectif de cette troisième étude est de déterminer quelles modalités de présentation du tracé seraient bénéfiques au tracé de lettres dans la population T21. Dans la population typique, différentes pratiques d'enseignement existent afin d'aider à l'acquisition de l'écriture chez l'enfant (Bara, Morin, Montésinos-Gelet & Lavoie, 2011 ; Jones et Christensen, 1999). Parmi les activités proposées, une tâche de tracé de lettres peut s'accompagner en amont d'une présentation du tracé de la lettre. De nombreuses études chez l'enfant typique ont porté sur l'effet de la présentation visuelle, verbale ou haptique du tracé de la lettre sur les habiletés d'écriture. Chez l'enfant apprenti scripteur de 5-6 ans, la perception visuelle du tracé et de la forme induisent une meilleure fluidité du geste graphomoteur par rapport à une présentation statique de la lettre (Berninger et al., 1997 ; 2015 ; Jolly et al., 2013 ; 2014). De même, l'ajout d'instructions verbales ou la présentation bimodale (visuelle et verbale) améliorent la qualité de l'écriture (Hayes, 1982 ; Karlsdottir, 1996). La manipulation haptique de la lettre engendre chez l'enfant typique de 5-6 ans une amélioration de la cinématique du mouvement et de la qualité de l'écriture (Bara & Gentaz, 2011 ; Vinter & Chartrel, 2010). L'ensemble de ces résultats souligne la diversité des processus impliqués dans l'écriture (Bara & Gentaz, 2010 ; Vinter & Zesiger, 2007). A ce jour, aucune étude ne s'est intéressée à l'impact de la modalité de présentation de la lettre sur l'écriture chez les personnes T21.

Compte tenu du déficit langagier et moteur des personnes T21 et des capacités relativement préservées dans le traitement visuo-spatial (Comblain & Thibaut, 2009 ; Vicari, 2006), il nous semblait intéressant de comparer l'effet de différentes présentations de la lettre sur l'écriture. La tâche de cette troisième étude consiste alors en la présentation des lettres de l'étude 2 selon la modalité visuelle, verbale et haptique puis au tracé de la lettre sur une tablette graphique. Ainsi, quatre modalités seront comparées à une modalité contrôle (modalité statique), c'est-à-dire sans information sur la dynamique du tracé, parmi

les modalités : dynamique (présentation visuelle du tracé informant sur le point de départ et la trajectoire), verbo-statique (présentation du modèle statique avec instructions verbales), verbo-dynamique (présentation visuelle du tracé avec instructions verbales) et haptique (suivi d'une lettre en mousse à l'aide du doigt). Nous nous attendons alors à un tracé plus segmenté, lent et irrégulier dans le groupe T21 pour les modalités verbales (verbo-statique et verbo-dynamique) et la modalité haptique comparativement aux tracés produits dans la modalité contrôle. A l'inverse, la capacité de traitement visuel étant relativement préservée dans la population T21, un tracé de meilleure qualité, plus rapide et plus fluide pourrait être mis en évidence pour la modalité dynamique par rapport à la modalité contrôle. Pour chaque modalité, les productions du groupe T21 seront comparées à celles des deux groupes typiques. L'objectif de ces comparaisons est de savoir si l'effet des modalités de présentation sur les productions de lettres des participants T21 est similaire à celui observé dans la population typique de même âge de développement. Des différences entre les deux groupes sont attendues dans la présentation verbale (modalités verbale et verbo-dynamique) compte tenu du déficit langagier rapportée dans la littérature (Comblain & Thibaut, 2009 ; Vicari, 2006). Une disparité entre les deux groupes pourrait être mise en évidence avec l'ajout d'instructions verbales. Suite aux études sur la modalité verbale chez l'enfant apprenti scripteur (Hayes, 1982 ; Karlsdottir, 1996) et au défaut langagier spécifique à la trisomie 21 (Comblain & Thibaut, 2009), les modalités verbales (verbo-statique et verbo-dynamique) ne devraient être bénéfiques au tracé de lettres que dans la population typique. Enfin, tout comme dans l'étude 2, les lettres sont regroupées selon deux niveaux de complexité d'après leur complexité motrice et leur fréquence dans la langue française. L'effet des modalités serait d'autant plus important pour les lettres difficiles, en particulier chez les personnes T21 et les enfants de même âge de développement. Compte tenu de l'âge du groupe typique de même âge chronologique, aucun effet de modalité de présentation des lettres n'est attendu. L'effet des modalités et de la complexité des lettres ne devraient alors pas impacter sur les caractéristiques du tracé dans ce groupe.

2. Méthode

2.1. Population

Les caractéristiques de la population recrutée sont présentées dans le chapitre 3 de la méthode générale (cf. 3.1 et 3.2). Tous les participants du groupe T21 (n=24) ont participé

à cette étude. Dans le groupe AD, seuls les participants les plus âgés (strictement plus de 5 ans 6 mois) ont pu réaliser l'ensemble des tâches présentées. Les comparaisons entre le groupe T21 et les groupes typiques porteront alors sur 11 participants appariés de chaque groupe. Les caractéristiques des participants pour cette partie de l'étude sont détaillées dans le tableau 23.

Tableau 23. Caractéristiques du groupe T21 et des 2 groupes typiques AD et AC comparés sur l'impact des modalités de présentation de l'étude 3.

	Groupe		
	T21	AD	AC
Effectif	n = 11	n = 11	n = 11
Genre	5M / 6F	5M / 6F	5M / 6F
Latéralité	10D / 1G	6D / 4G	10D / 1G
Âge moyen ± écart-type	Âge de développement 7,2 ans ± 1,2	7,3 ans ± 1,0	-
	Âge chronologique 19,3 ans ± 4,7	-	19,8 ans ± 5,0

Note. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AD : groupe au développement typique de même âge de développement ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique.

2.2. Dispositif expérimental

Dans cette étude, les mêmes lettres que l'étude 2 sont présentées sous différentes modalités. Chaque séance est consacrée à une modalité et elle est espacée des autres séances d'une à deux semaines. L'ordre de présentation des modalités a été contrebalancé. Après la présentation d'une lettre dans une modalité, le participant trace une fois la lettre sur la tablette graphique. Le protocole est ensuite répété successivement cinq fois pour chaque lettre. Afin de pouvoir comparer les différentes conditions d'écriture, le temps de présentation pour chacune des 6 lettres ne varie pas entre chaque modalité de présentation (visuelle, verbale, haptique). Donc indépendamment de la modalité, la présentation de la lettre *s* dure 6 secondes, les lettres *a* et *e* 8 secondes, la lettre *b* 11 secondes, la lettre *g* 15 secondes et la lettre *f* 18 secondes.

Modalité statique. Cette modalité contrôle ne donne qu'une information visuelle sur la forme globale de la lettre. Le point de départ et le sens de rotation n'y sont pas précisés.

La lettre est affichée sur l'écran d'ordinateur utilisé dans l'étude 2 (cf. 2.2). La consigne est la suivante : « *Regarde la lettre qui va apparaître à l'écran. Lorsqu'elle disparaîtra, tu l'écriras sur la feuille telle que tu l'as vue.* » Les lettres tracées dans la modalité statique sont alors comparées aux lettres réalisées dans :

- la modalité dynamique afin de tester l'effet d'une présentation visuelle,
- la modalité verbo-statique pour étudier l'effet d'une présentation verbale,
- la modalité verbo-dynamique afin de mesurer l'effet conjoint d'une présentation à la fois visuelle et verbale,
- la modalité haptique en vue d'évaluer l'effet d'une présentation proprioceptive.

Modalité dynamique. Le tracé de la lettre est présenté de façon dynamique à l'écran, tel qu'illustré dans la figure 23. Les vidéos ont été réalisées image par image puis assemblées à l'aide du logiciel Beneton Movie GIF (Rouleau, 2007). La vitesse de présentation est de 10 images par seconde. La consigne est la suivante : « *Regarde la lettre qui va apparaître à l'écran. Lorsqu'elle disparaîtra, tu l'écriras sur la feuille telle que tu l'as vue.* »

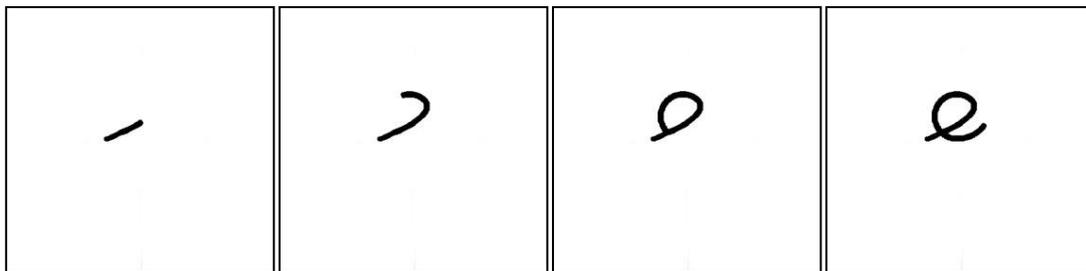


Figure 23. Exemple de 4 images composant le tracé graduel de la lettre e.

Modalité verbo-statique. Chaque lettre est présentée de façon statique à l'écran avec une consigne verbale explicitant la trajectoire du tracé. Les instructions ont été construites à partir des travaux sur les règles de la grammaire d'action (Goodnow & Levine, 1973) En effet, la production de segments est régie par différentes règles graphiques indiquant la zone de départ (haut/bas, gauche/droite) et la direction du tracé (de haut en bas, de gauche à droite, etc...). Pour chaque lettre, l'instruction orale précise alors le point de départ (« *Je commence en haut* », « *Je commence à gauche* ») et la direction à suivre (« *Je vais vers le haut* », « *Je descends* »). La consigne est la suivante : « *Regarde la lettre qui va apparaître à l'écran et écoute la voix. Lorsque la lettre disparaîtra, tu l'écriras sur la feuille d'après ce que tu as vu et entendu.* » Compte tenu du fait que les instructions incluent les termes « droite » et « gauche », la différenciation entre la droite et la gauche a été contrôlée en demandant

notamment au participant de montrer quelle est sa main gauche puis sa main droite (pour un droitier, et inversement pour un gaucher).

Modalité verbo-dynamique. L'instruction verbale est ici alors présentée de façon synchrone au tracé dynamique de la lettre qui apparaît à l'écran. La consigne est la suivante : « *Regarde la lettre qui va apparaître à l'écran et écoute la voix. Lorsque la lettre disparaîtra, tu l'écriras sur la feuille d'après ce que tu as vu et entendu.* »

Modalité haptique. Les stimuli utilisés ici ne sont pas présentés à l'écran mais manipulés par le participant. Chaque lettre, dont la forme est similaire à celle numérisée, est en mousse noire (épaisseur 3 mm) et fixée sur un fond blanc de 12,5 cm de côté (figure 24). Le choix s'est porté sur des lettres en relief car, d'après l'étude de Bara, Fredembach et Gentaz (2010), elles induiraient une meilleure reconnaissance haptique et visuelle des lettres comparativement à des lettres en creux. Après une démonstration initiale de l'examineur, le participant doit à son tour suivre la lettre de l'index de la main dominante. S'il y a erreur sur le sens du suivi avec le doigt, l'examineur lui fait à nouveau une démonstration. La consigne est la suivante : « *Je vais te montrer comment suivre la lettre du doigt puis tu le reproduiras. Ensuite, tu écriras la lettre sur la feuille d'après ce que tu as vu et touché.* »



Figure 24. Lettres en mousse à suivre du doigt dans la modalité haptique.

2.3. Recueil et traitement des données

Afin de comparer l'impact des différentes présentations sur le geste graphomoteur, la tablette graphique est à nouveau utilisée dans cette étude. Les mesures portent sur les domaines d'évaluation de l'étude 2 :

- la spatialité avec le nombre de tracés réalisés pour une lettre et la longueur moyenne d'une lettre,
- la temporalité mesurée par la durée moyenne du tracé d'une lettre et la durée moyenne des levers,
- la cinématique évaluée par la vitesse moyenne de tracé, le nombre moyen de pauses dans une lettre et la durée totale de ces pauses,
- la force graphique avec la pression moyenne au cours du tracé d'une lettre.

La prise en compte du point de départ ainsi que la trajectoire de tracé permettent d'évaluer le respect des règles syntaxiques chez le participant lors de tracés de boucles composant la lettre. Deux indices portant sur la trajectoire sont alors introduits : le score du point de départ et le score du sens de rotation. Pour ces deux mesures, un score de 1 est attribué si le tracé est réalisé correctement d'après le modèle de la lettre et un score de 0 si la trajectoire ne correspond pas à celle du modèle (exemple en figure 25).



Figure 25. Illustration des indices de trajectoire pour les scores de point de départ (à gauche) et du sens de rotation (à droite) pour la lettre *a*. D'après la présentation de la lettre, le point de départ (point clair) doit être dans la partie supérieure droite de la lettre, délimitée par le diamètre de la boucle (ligne pointillée) et le sens de rotation doit être antihoraire.

Un indice de similarité spatiale est également introduit dans cette étude afin de compléter l'évaluation du tracé. Ce score correspond à l'indice DTW (*Dynamic Time Warping*). Il permet d'évaluer la similitude spatiale avec laquelle la forme du modèle a été tracée. Le calcul de l'indice se fait par la décomposition du modèle et de la lettre tracée en plusieurs centaines de points puis par la mesure de la distance séparant chaque paire de points appartenant aux deux formes. Le score de similarité est compris entre 0 et 1, correspondant au pourcentage de similitude. Plus la valeur est proche de 1, plus la forme de la lettre est proche de celle du modèle. L'indice DTW ne dépend ni de la taille de la lettre, ni du sens du tracé, mais il nécessite le même nombre de tracés entre le modèle et la lettre. Pour créer un modèle lisible par le logiciel, un adulte normoscripteur a alors écrit chacune des 6 lettres en suivant le tracé imprimé sur une feuille, et ce, sans lever le stylo. Compte tenu du fait que certains participants n'ont pas écrit les lettres en un seul tracé, le score de similarité n'a été évalué que pour 1604 lettres.

L'ensemble des indices évalués dans l'étude est résumé dans le tableau 24.

Tableau 24. Indices mesurées dans l'étude 3 pour évaluer la trajectoire, la spatialité, la temporalité, la cinématique et la force graphique du tracé.

Domaine d'évaluation	Indices mesurés
Trajectoire	Score du point de départ Score du sens de rotation
Spatialité	Nombre de tracés Longueur totale (mm) Score de similarité
Temporalité	Durée totale des tracés (s) Durée totale des levers (s)
Cinématique	Vitesse moyenne de tracé (mm/s) Nombre de pauses Durée totale des pauses (s)
Force graphique	Pression moyenne sur le stylet (UA)

2.4. Analyses statistiques

Dans un premier temps, l'effet des modalités sur le tracé de lettres par rapport à la modalité statique va être évalué dans le groupe T21 (n=24). De plus, nous nous intéresserons à l'impact de la complexité des lettres et à l'effet de l'âge de développement et de l'âge chronologique sur l'ensemble des indices. Dans une seconde partie, les analyses portant sur l'effet du groupe (T21 vs. AD, T21 vs. AC) et l'effet de la complexité des lettres seront présentées.

Pour les comparaisons inter-modalités, un test de normalité de Shapiro-Wilk pour chaque modalité ainsi que le test d'homogénéité des variances de Levene entre les cinq modalités sont appliqués sur l'ensemble des indices. La même démarche est réalisée pour les comparaisons inter-groupes. La normalité des données et l'homogénéité des variances ont été étudiées pour chaque indice et reportées dans les tableaux E1 et E2 (annexe E). Les analyses statistiques dans le groupe T21 portent sur les effets principaux des modalités et de la complexité de la lettre, ainsi que leur interaction (Modalité x Complexité). Aucun des indices dans le groupe T21 ne suit à la fois la loi normale et l'homogénéité des variances entre les modalités. Comme pour l'étude précédente, les données ont été transformées en rang puis une ANOVA à mesures répétées a été réalisée. Pour le test post-hoc, les comparaisons multiples sont réalisées selon l'ajustement de Tukey. Afin d'étudier l'influence de l'âge de développement et de l'âge chronologique sur les indices, deux ANCOVA à mesures répétées sur les rangs sont introduites. La première porte sur l'effet de

l'âge de développement dans le groupe T21, et sur l'effet d'interaction avec le facteur modalité (Modalité x Âge de développement). Pour connaître le sens d'évolution de la variable en fonction de l'âge, un test t permet de préciser le signe du coefficient β_1 . La deuxième ANCOVA portant sur l'âge chronologique suit la même démarche.

Les analyses statistiques dans les trois groupes portent sur les effets principaux des modalités, du groupe et de la complexité de la lettre, ainsi que leur interaction (Modalité x Groupe x Complexité). Aucun des indices dans les trois groupes ne suit la loi normale et l'homogénéité des variances entre les groupes. Les données ont donc été transformées en rang puis une ANOVA à mesures répétées a été réalisée. Pour le test post-hoc, les comparaisons multiples sont réalisées selon l'ajustement de Tukey.

Pour l'ensemble des analyses à mesures répétées, un modèle linéaire à effets mixtes (LMM) est utilisé. Il permet ainsi d'étudier les effets fixes (modalité, complexité, groupe, âge de développement, âge chronologique) tout en introduisant les effets aléatoires. Selon le protocole de l'étude, un effet aléatoire peut exister entre les différents sujets du chaque groupe (1|Groupe:Sujet) et entre les différentes lettres (1|Lettre). Pour chaque indice, le tableau 25 présente les modèles ainsi que leurs caractéristiques : le R^2 marginal correspondant à la variance expliquée par les effets fixes et le R^2 conditionnel rapportant la variance expliquée par les effets fixes et les effets aléatoires.

Les différences significatives sont établies selon un seuil alpha de $p < 0,05$. L'ensemble des statistiques a été réalisé à l'aide du logiciel R (version 3.2.3) et des fonctions suivantes : *lmer* du package « lme4 » (Bates, Maechler, Bolker & Walker, 2015), *lsmeans* du package « lsmeans » (Lenth, 2015), *sem.model.fits* du package « piecewiseSEM » (Lefcheck, 2015).

Tableau 25. Coefficients de détermination des modèles linéaires à effets mixtes pour chaque indice.

Modèle	Modalité x Complexité		.. Âge de dév.		.. Âge chrono.		... Groupe x Complexité	
		T21		T21		T21		T21, AD, AC	
Indices		R^2_m	R^2_c	R^2_m	R^2_c	R^2_m	R^2_c	R^2_m	R^2_c
<i>Trajectoire</i>									
Score du point de départ		0,00	0,40	0,14	0,40	0,11	0,40	0,01	0,04
Score du sens de rotation		0,01	0,39	0,13	0,39	0,14	0,40	0,02	0,10
<i>Spatialité</i>									
Nombre de tracés		0,01	0,30	0,05	0,30	0,02	0,30	0,07	0,25
Longueur totale		0,25	0,78	0,02	0,79	0,08	0,78	0,32	0,75
Score de similarité		0,17	0,54	0,13	0,55	0,08	0,55	0,36	0,57
<i>Temporalité</i>									
Durée des tracés		0,20	0,67	0,10	0,67	0,06	0,68	0,40	0,69
Durée des levers		0,01	0,29	0,04	0,29	0,01	0,29	0,08	0,26
<i>Cinématique</i>									
Vitesse de tracé		0,03	0,80	0,08	0,81	0,12	0,81	0,21	0,67
Nombre de pauses		0,03	0,38	0,03	0,39	0,02	0,39	0,14	0,39
Durée totale des pauses		0,03	0,34	0,04	0,35	0,02	0,35	0,15	0,40
<i>Force graphique</i>									
Pression		0,01	0,59	0,02	0,61	0,01	0,61	0,04	0,63

Note. R^2_m : coefficient marginal de détermination ; R^2_c : coefficient conditionnel de détermination.

3. Résultats

Les résultats de l'étude 3 portant, d'une part, sur l'effet des modalités de présentation sur l'écriture de lettres dans le groupe T21 et, d'autre part, sur la comparaison avec les deux groupes typiques vont désormais être détaillés. L'ensemble des résultats sera ensuite synthétisé à la fin de chacune des deux parties.

3.1. Impact des modalités de présentation dans le groupe T21

Dans un premier temps, l'effet de la modalité est étudié dans le groupe T21 (n=24), ainsi que l'effet de la complexité, de l'âge de développement et de l'âge chronologique. Une matrice de corrélations avec ajustement de Holm a été réalisée entre tous les indices, l'âge de développement et l'âge chronologique dans le groupe T21 (tableau E3 ; annexe E).

3.1.1. Trajectoire selon les modalités dans le groupe T21

Les statistiques descriptives concernant le score du point de départ et le score du sens de rotation dans le groupe T21 sont présentées dans le tableau 26.

Tableau 26. Moyenne et écart-type des indices de trajectoire selon la modalité de présentation dans le groupe T21.

Indices	Modalité				
	Statique	Dynamique	Verbo-statique	Verbo-dynamique	Haptique
Score du point de départ	0,932 ± 0,246	0,938 ± 0,230	0,927 ± 0,251	0,958 ± 0,388	0,923 ± 0,257
Score du sens de rotation	0,900 ± 0,275	0,930 ± 0,238	0,926 ± 0,244	0,951 ± 0,391	0,924 ± 0,254

Note. Les valeurs reportées correspondent à la moyenne ± l'écart-type. T21 : groupe porteur de trisomie 21.

L'ANOVA réalisée sur le **point de départ** du groupe T21 n'a pas mis en évidence d'effet significatif de la modalité [$F_{(4,3592)} = 1,05$; $p = 0,38$], ni de la complexité [$F_{(1,28)} = 0,36$; $p = 0,55$] ou encore de l'interaction Groupe x Complexité [$F_{(4,3592)} = 0,29$; $p = 0,88$]. L'ANCOVA portant sur l'âge de développement a révélé un effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,22)} = 12,81$; $p < 0,01$], indiquant un score du point de départ qui augmente avec l'âge de développement ($\beta_1 = 0,051$), et ce, quelle que soit la modalité [$F_{(4,3592)} = 1,63$; $p = 0,16$]. De même, l'analyse de covariance concernant l'âge chronologique a rapporté un effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,22)} = 9,09$; $p < 0,001$] signalant que le score du point de départ augmente avec l'âge chronologique ($\beta_1 = 0,13$), indépendamment de la modalité [$F_{(4,3592)} = 1,03$; $p = 0,39$].

Concernant le **sens de rotation**, l'ANOVA a montré un effet significatif de la modalité pour le groupe T21 [$F_{(4,3592)} = 3,23$; $p < 0,05$]. Le score pour la modalité statique est significativement supérieur à celui de la modalité dynamique ($p < 0,05$), inférieur à celui de la modalité verbo-dynamique ($p < 0,05$) et similaire à celui de la modalité verbo-statique ($p = 0,13$) et haptique ($p = 0,054$). Un effet significatif de la complexité de la lettre est observé [$F_{(1,28)} = 17,41$; $p < 0,001$], indiquant un score du sens de rotation des lettres faciles supérieur à celui des lettres difficiles, et ce, indépendamment de la modalité [$F_{(4,3592)} = 0,38$; $p = 0,82$]. L'ANCOVA portant sur l'âge de développement a mis en évidence un effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,22)} = 11,69$; $p < 0,01$], révélant un score du sens de rotation augmentant avec l'âge de développement ($\beta_1 = 0,16$). L'analyse n'a pas indiqué d'effet significatif de l'interaction Modalité x Âge de développement [$F_{(4,3592)} = 1,76$; $p = 0,76$]. L'ANCOVA concernant l'âge chronologique a rapporté un effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,22)} = 13,29$; $p < 0,01$] et de l'interaction Modalité x Âge chronologique [$F_{(4,3592)} = 2,46$; $p < 0,05$]. Dans chacune des cinq modalités, le score du sens de rotation augmente avec l'âge chronologique (S : $\beta_1 = 0,22$; $p < 0,01$; D : $\beta_1 = 0,19$; $p < 0,01$; VS : $\beta_1 = 0,21$; $p < 0,001$; VD : $\beta_1 = 0,16$; $p < 0,01$; H : $\beta_1 = 0,17$; $p < 0,01$).

3.1.2. Spatialité du tracé selon les modalités dans le groupe T21

Les statistiques descriptives concernant le nombre de tracés pour former une lettre, la longueur moyenne d'une lettre et le score de similarité dans le groupe T21 sont présentées dans le tableau 27.

Tableau 27. Moyenne et écart-type des indices de spatialité selon la modalité de présentation dans le groupe T21.

Indices	Modalité				
	Statique	Dynamique	Verbo-statique	Verbo-dynamique	Haptique
Nombre moy. de tracés	1,34 ± 0,92	1,49 ± 1,07	1,42 ± 0,78	1,42 ± 0,81	1,34 ± 0,68
Longueur moy. (mm)	94,2 ± 107,4	106,7 ± 97,4	105,9 ± 108,1	111,8 ± 104,3	91,0 ± 93,1
Score de similarité	0,876 ± 0,065	0,885 ± 0,063	0,882 ± 0,064	0,879 ± 0,065	0,874 ± 0,069

Note. Les valeurs reportées correspondent à la moyenne ± l'écart-type. T21 : groupe porteur de trisomie 21.

Pour le **nombre moyen de tracés**, l'ANOVA a montré un effet de la modalité dans le groupe T21 [$F_{(4,3592)} = 6,51$; $p < 0,001$]. Le nombre de tracés dans la modalité statique est statistiquement inférieur à celui dans la modalité dynamique ($p < 0,001$) et verbo-statique ($p < 0,05$), alors qu'il ne varie pas significativement par rapport à la modalité verbo-dynamique ($p = 0,059$) et haptique ($p = 0,76$). L'analyse de variance n'a pas révélé d'effet significatif de la complexité [$F_{(1,28)} = 0,73$; $p = 0,40$], ni de l'interaction Modalité x Complexité [$F_{(4,3592)} = 0,60$; $p = 0,66$]. L'ANCOVA portant sur l'âge de développement a mis en évidence un effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,22)} = 7,08$; $p < 0,05$], indiquant que le nombre de tracés diminue avec l'âge de développement ($\beta_1 = 0,17$), et ce, quelle que soit la modalité [$F_{(4,3592)} = 0,42$; $p = 0,80$]. Pour l'âge chronologique, l'ANCOVA n'a pas montré d'effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,22)} = 1,29$; $p = 0,27$], ni de l'interaction Modalité x Âge chronologique [$F_{(4,2592)} = 1,40$; $p = 0,23$].

Concernant la **longueur moyenne d'une lettre** dans le groupe T21, l'ANOVA a montré un effet significatif de la modalité [$F_{(4,3592)} = 63,30$; $p < 0,001$], indiquant que la modalité statique engendre des lettres de longueur inférieure à celle de la modalité dynamique ($p < 0,001$), verbo-statique ($p < 0,001$) et verbo-dynamique ($p < 0,001$). La modalité statique présente une longueur équivalente à celle de la modalité haptique ($p = 0,91$). L'analyse de variance a révélé un effet significatif de la complexité de la lettre [$F_{(1,28)} = 372,56$; $p < 0,001$] et de l'interaction Modalité x Complexité [$F_{(4,3592)} = 2,84$; $p < 0,05$]. Pour les lettres faciles, la modalité statique présente une longueur inférieure à celle dans la modalité dynamique ($p < 0,001$), verbo-statique ($p < 0,001$) et verbo-

dynamique ($p < 0,001$) et une longueur similaire à celle de la modalité haptique ($p = 1,00$). Pour les lettres difficiles, la modalité statique occasionne une longueur inférieure à celle de la modalité dynamique ($p < 0,001$) et verbo-dynamique ($p < 0,001$) et une longueur équivalente à celle de la modalité verbo-statique ($p = 0,15$) et haptique ($p = 0,98$). L'ANCOVA portant sur l'âge de développement n'a pas mis en évidence d'effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,22)} = 0,12$; $p = 0,73$]. Un effet de l'interaction Modalité x Âge de développement est rapporté [$F_{(4,3592)} = 7,04$; $p < 0,001$] mais, pour les cinq modalités, la longueur d'une lettre est indépendante de l'âge de développement (S : $p = 0,70$; D : $p = 0,70$; VS : $p = 0,69$; VD : $p = 0,87$; H : $p = 0,60$). De même, l'ANCOVA concernant l'âge chronologique n'a pas indiqué d'effet de cette co-variable [$F_{(1,22)} = 3,26$; $p = 0,08$] mais un effet de l'interaction Modalité x Âge chronologique est révélé [$F_{(4,3592)} = 7,50$; $p < 0,001$]. Pour les cinq modalités, la longueur d'une lettre est indépendante de l'âge chronologique (S : $p = 0,061$; D : $p = 0,13$; VS : $p = 0,068$; VD : $p = 0,11$; H : $p = 0,14$).

L'ANOVA évaluant le **score de similarité spatiale** a montré un effet significatif de la modalité dans le groupe T21 [$F_{(4,3592)} = 2,94$; $p < 0,05$]. La modalité statique induit un score significativement inférieur à celui de la modalité dynamique ($p < 0,05$) et un score semblable à celui de la modalité verbo-statique ($p = 0,78$), verbo-dynamique ($p = 0,81$) et haptique ($p = 0,99$). L'analyse de variance a révélé un effet de la complexité [$F_{(1,28)} = 161,71$; $p < 0,001$] et de l'interaction Modalité x Complexité [$F_{(4,3592)} = 2,74$; $p < 0,05$]. Cependant, le score de similarité ne varie pas entre la modalité statique et les quatre autres modalités, aussi bien pour les lettres faciles (S vs. D : $p = 0,41$; S vs. VS : $p = 0,98$; S vs. VD : $p = 0,38$; S vs. H : $p = 0,99$) que les lettres difficiles (S vs. D : $p = 0,86$; S vs. VS : $p = 1,00$; S vs. VD : $p = 1,00$; S vs. H : $p = 1,00$). Pour l'âge de développement, l'ANCOVA a montré un effet de cette co-variable [$F_{(1,22)} = 13,57$; $p < 0,01$] et de l'interaction Modalité x Âge de développement [$F_{(4,3592)} = 2,90$; $p < 0,05$]. Néanmoins, dans chacune des cinq modalités, le score de similarité augmente avec l'âge de développement (S : $\beta_1 = 0,30$; $p < 0,05$; D : $\beta_1 = 0,42$; $p < 0,001$; VS : $\beta_1 = 0,44$; $p < 0,001$; VD : $\beta_1 = 0,34$; $p < 0,01$; H : $\beta_1 = 0,35$; $p < 0,01$). L'ANCOVA concernant l'âge chronologique a également mis en évidence un effet de cet co-variable [$F_{(1,22)} = 6,98$; $p < 0,05$] et de l'interaction Modalité x Âge chronologique [$F_{(4,3592)} = 3,64$; $p < 0,01$]. Dans la modalité dynamique, le score de similarité ne dépend pas de l'âge chronologique ($p = 0,11$). Dans les quatre autres modalités, le score augmente avec

l'âge chronologique (S : $\beta_1 = 0,32$; $p < 0,05$; VS : $\beta_1 = 0,33$; $p < 0,05$; VD : $\beta_1 = 0,28$; $p < 0,05$; H : $\beta_1 = 0,32$; $p < 0,05$).

3.1.3. Temporalité du tracé selon les modalités dans le groupe T21

Les statistiques descriptives concernant la durée moyenne des tracés et la durée moyenne des levers dans le groupe T21 sont présentées dans le tableau 28.

Tableau 28. Moyenne et écart-type des indices de temporalité selon la modalité de présentation dans le groupe T21.

Indices	Modalité				
	Statique	Dynamique	Verbo-statique	Verbo-dynamique	Haptique
Durée moy. des tracés (s)	4,06 ± 2,88	5,26 ± 3,07	4,81 ± 3,19	5,58 ± 3,51	4,31 ± 2,70
Durée moy. des levers (s)	0,20 ± 0,51	0,36 ± 0,96	0,27 ± 0,57	0,30 ± 0,67	0,27 ± 1,38

Note. Les valeurs reportées correspondent à la moyenne ± l'écart-type. T21 : groupe porteur de trisomie 21.

Pour la **durée moyenne des tracés**, l'ANOVA a révélé un effet significatif de la modalité dans le groupe T21 [$F_{(4,3592)} = 129,38$; $p < 0,001$], démontrant que, la durée dans la modalité statique est significativement inférieure aux quatre autres modalités (S vs. D : $p < 0,001$; S vs. VS : $p < 0,001$; S vs. VD : $p < 0,001$; S vs. H : $p < 0,001$). L'analyse de variance a également mis en évidence un effet de la complexité [$F_{(1,28)} = 163,94$; $p < 0,001$], indiquant une durée de tracé pour les lettres faciles inférieure à celle des lettres difficiles, indépendamment de la modalité [$F_{(4,3592)} = 1,32$; $p = 0,26$]. Concernant l'âge de développement, l'ANCOVA n'a pas rapporté d'effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,22)} = 3,27$; $p = 0,08$], ni de l'interaction Modalité x Âge de développement [$F_{(4,3592)} = 2,18$; $p = 0,07$]. L'ANCOVA sur l'âge chronologique n'a pas montré d'effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,22)} = 0,27$; $p = 0,61$]. Un effet de l'interaction Modalité x Âge chronologique est montré [$F_{(4,3592)} = 13,47$; $p < 0,001$] mais, dans chacune des modalités, la durée des tracés ne dépend pas de l'âge chronologique (S : $p = 0,72$; D : $p = 0,53$; VS : $p = 0,33$; VD : $p = 0,57$; H : $p = 0,55$).

Concernant la **durée moyenne des levers**, l'ANOVA a rapporté un effet significatif de la modalité dans le groupe T21 [$F_{(4,3592)} = 5,99$; $p < 0,001$] témoignant d'une durée dans la modalité statique significativement inférieure à celle dans la modalité dynamique ($p < 0,001$), verbo-statique ($p < 0,05$) et verbo-dynamique ($p < 0,05$) et non significativement différent de celle dans la modalité haptique ($p = 0,82$). L'analyse de variance n'a pas mis en évidence d'effet significatif de la complexité [$F_{(1,28)} = 0,74$; $p = 0,40$], ni de l'interaction Modalité x Complexité [$F_{(4,3592)} = 1,00$; $p = 0,41$]. Concernant l'âge de développement, l'ANCOVA a révélé un effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,22)} = 5,68$;

$p < 0,05$], indiquant une durée des levers qui diminue avec l'âge de développement ($\beta_1 = -0,16$), et ce, indépendamment de la modalité [$F_{(4,3592)} = 0,52$; $p = 0,72$]. L'ANCOVA portant sur l'âge chronologique n'a montré aucun effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,22)} = 1,07$; $p = 0,31$], ni de l'interaction Modalité x Âge chronologique [$F_{(4,3592)} = 1,59$; $p = 0,17$].

3.1.4. Cinématique du tracé selon les modalités dans le groupe T21

Les statistiques descriptives concernant la vitesse moyenne de tracé, le nombre et la durée des pauses dans le groupe T21 sont présentées dans le tableau 29.

Tableau 29. Moyenne et écart-type des indices de cinématique selon la modalité de présentation dans le groupe T21.

Indices	Modalité				
	Statique	Dynamique	Verbo-statique	Verbo-dynamique	Haptique
Vitesse de tracé (mm/s)	25,94 ± 22,43	22,47 ± 19,33	24,99 ± 24,32	22,74 ± 19,51	24,92 ± 23,08
Nombre moy. de pauses	3,73 ± 5,13	4,68 ± 7,06	4,52 ± 5,74	4,74 ± 5,17	4,11 ± 5,50
Durée moy. des pauses (s)	0,30 ± 1,06	0,22 ± 0,73	0,24 ± 0,66	0,21 ± 0,40	0,20 ± 0,53

Note. Les valeurs reportées correspondent à la moyenne ± l'écart-type. T21 : groupe porteur de trisomie 21.

Dans le groupe T21, l'ANOVA a révélé un effet significatif de la modalité sur la **vitesse moyenne de tracé** [$F_{(4,3592)} = 17,86$; $p < 0,001$], indiquant une vitesse pour la modalité statique significativement supérieure à celle des quatre autres modalités (S vs. D : $p < 0,001$; S vs. VS : $p < 0,001$; S vs. VD : $p < 0,001$; S vs. H : $p < 0,001$). L'analyse de variance a également montré un effet significatif de la complexité [$F_{(1,28)} = 215,00$; $p < 0,001$], témoignant d'une vitesse de tracé des lettres faciles inférieure à celle des lettres difficiles, et ce, quelle que soit la modalité [$F_{(4,3592)} = 2,04$; $p = 0,09$]. Concernant l'âge de développement, l'ANCOVA n'a pas mis en évidence d'effet de cette co-variable [$F_{(1,22)} = 2,39$; $p = 0,14$], ni de l'interaction Modalité x Âge de développement [$F_{(4,3592)} = 1,26$; $p = 0,28$]. Un effet significatif de l'âge chronologique est rapporté [$F_{(1,22)} = 4,20$; $p < 0,05$] ainsi qu'un effet de l'interaction Modalité x Âge chronologique [$F_{(4,3592)} = 14,76$; $p < 0,001$]. Dans la modalité verbo-statique, la vitesse de tracé diminue avec l'âge chronologique ($\beta_1 = -0,45$; $p < 0,05$). Dans les autres modalités, la vitesse ne dépend pas de l'âge chronologique (S : $p = 0,11$; D : $p = 0,088$; VD : $p = 0,054$; H : $p = 0,096$).

Pour le **nombre moyen de pauses**, l'ANOVA a montré un effet significatif de la modalité dans le groupe T21 [$F_{(4,3592)} = 20,88$; $p < 0,001$], témoignant d'un nombre de pauses pour la modalité statique inférieur à celui pour la modalité dynamique ($p < 0,001$), verbo-statique ($p < 0,001$) et verbo-dynamique ($p < 0,001$) et similaire à celui pour la

modalité haptique ($p = 0,87$). L'analyse de variance a également montré un effet significatif de la complexité [$F_{(1,28)} = 13,02 ; p < 0,01$], indiquant un nombre de pauses lors du tracé de lettres faciles inférieur à celui des lettres difficiles, et ce, indépendamment de la modalité [$F_{(4,3592)} = 0,72 ; p = 0,58$]. L'ANCOVA portant sur l'âge de développement n'a pas rapporté d'effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,22)} = 1,21 ; p = 0,28$]. Un effet de l'interaction Modalité x Âge de développement est mis en évidence [$F_{(4,3592)} = 4,10 ; p < 0,01$] mais, dans chacune des modalités, le nombre de pauses n'évolue pas de façon significative avec l'âge de développement (S : $p = 0,23$; D : $p = 0,34$; VS : $p = 0,12$; VD : $p = 0,70$; H : $p = 0,45$). De même, l'ANCOVA concernant l'âge chronologique n'a pas révélé d'effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,22)} = 0,38 ; p = 0,54$], mais de l'interaction Modalité x Âge chronologique [$F_{(4,3592)} = 4,60 ; p < 0,01$]. Pour chaque modalité, le nombre de pauses ne dépend pas de l'âge chronologique (S : $p = 0,86$; D : $p = 0,79$; VS : $p = 0,22$; VD : $p = 0,76$; H : $p = 0,43$).

Dans le groupe T21, l'ANOVA portant sur la **durée moyenne des pauses** a mis en évidence un effet significatif de la modalité [$F_{(4,3592)} = 18,61 ; p < 0,001$]. Les tests post-hoc indiquent une durée de la modalité statique supérieure à celle de la modalité dynamique ($p < 0,001$), verbo-statique ($p < 0,001$) et verbo-dynamique ($p < 0,001$) et ne varient pas significativement de celle de la modalité haptique ($p = 0,98$). L'analyse a également souligné un effet significatif de la complexité [$F_{(1,28)} = 13,15 ; p < 0,01$], témoignant d'une durée de pauses lors du tracé de lettres faciles inférieures à celle des lettres difficiles, et ce, quelle que soit la modalité [$F_{(4,3592)} = 0,45 ; p = 0,77$]. Concernant l'âge de développement, l'ANCOVA n'a pas montré d'effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,22)} = 2,15 ; p = 0,16$], ni de l'interaction Modalité x Âge de développement [$F_{(4,3592)} = 1,73 ; p = 0,14$]. L'ANCOVA portant sur l'âge chronologique n'a pas révélé d'effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,22)} = 0,57 ; p = 0,46$] mais un effet d'interaction Modalité x Âge chronologique [$F_{(4,3592)} = 3,80 ; p < 0,01$]. Cependant, pour chacune des modalités, la durée des pauses ne dépend pas de l'âge chronologique (S : $p = 0,81$; D : $p = 0,73$; VS : $p = 0,24$; VD : $p = 0,66$; H : $p = 0,28$).

3.1.5. Force graphique selon les modalités dans le groupe T21

Les statistiques descriptives concernant la pression moyenne dans le groupe T21 sont présentées dans le tableau 30.

Tableau 30. Moyenne et écart-type de l'indice de force graphique selon la modalité de présentation dans le groupe T21.

Indice	Modalité				
	Statique	Dynamique	Verbo-statique	Verbo-dynamique	Haptique
Pression moy. (UA)	622,1 ± 185,4	601,7 ± 208,5	603,4 ± 197,0	630,9 ± 191,3	616,6 ± 182,1

Note. Les valeurs reportées correspondent à la moyenne ± l'écart-type. T21 : groupe porteur de trisomie 21.

Dans le groupe T21, l'ANOVA sur la **pression** a rapporté un effet significatif de la modalité [$F_{(4,3592)} = 8,17$; $p < 0,001$], indiquant une pression dans la modalité statique inférieure à celle dans la modalité verbo-statique ($p < 0,05$) et ne variant pas significativement des trois autres modalités (S vs. D : $p = 0,21$; S vs. VD : $p = 0,14$; S vs. H : $p = 0,98$). L'analyse de variance a également révélé un effet significatif de la complexité [$F_{(1,28)} = 30,66$; $p < 0,001$], témoignant d'une pression lors du tracé de lettres faciles inférieure à celle des lettres difficiles, et ce, quelle que soit la modalité [$F_{(4,3592)} = 0,41$; $p = 0,80$]. Concernant l'âge de développement, l'ANCOVA n'a pas montré d'effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,22)} = 0,44$; $p = 0,52$]. Un effet significatif de l'interaction Modalité x Âge de développement est montré [$F_{(4,3592)} = 11,54$; $p < 0,001$] mais, pour chaque modalité, la pression n'évolue pas de façon significative avec l'âge de développement (S : $p = 0,45$; D : $p = 0,32$; VS : $p = 0,40$; VD : $p = 0,61$; H : $p = 0,83$). Des résultats comparables sont retrouvés pour l'âge chronologique avec l'absence d'un effet significatif de cette co-variable [$F_{(1,22)} = 0,04$; $p = 0,84$] mais un effet significatif de l'interaction Modalité x Âge chronologique [$F_{(4,3592)} = 6,69$; $p < 0,001$]. La pression est indépendante de l'âge chronologique dans chaque modalité (S : $p = 0,64$; D : $p = 0,54$; VS : $p = 0,92$; VD : $p = 0,77$; H : $p = 1,00$).

3.1.6. Récapitulatif des résultats dans le groupe T21

Le tableau 31 regroupe un résumé des résultats émergents de cette première partie de l'étude. Les différences significatives entre la modalité statique et les quatre autres modalités sont reportées en gras.

Tableau 31. Récapitulatif des résultats de l'étude 3 pour le groupe T21.

Indices	Effet						
	Complexité	Modalité x Complexité			Mod x Âge de dév.	Mod x Âge chrono.	
<i>Trajectoire</i>							
Score de point de départ	NS	NS			↗	↗	
Score de sens de rotation	NS	S > D	S = VS	S < VD	S = H	↗	S, D, VS, VD, H : ↗
<i>Spatialité</i>							
Nombre de tracés	NS	S < D	S < VS	S = VD	S = H	↘	NS
Longueur d'une lettre	facile : difficile :	S < D S < D	S < VS S = VS	S < VD S < VD	S = H S = H	S, D, VS, VD, H : NS	S, D, VS, VD, H : NS
Score de similarité	facile : difficile :	S = D S = D	S = VS S = VS	S = VD S = VD	S = H S = H	S, D, VS, VD, H : ↗	S, VS, VD, H : ↗ D : NS
<i>Temporalité</i>							
Durée des tracés	NS	S < D	S < VS	S < VD	S < H	NS	S, D, VS, VD, H : NS
Durée des levers	NS	S < D	S < VS	S < VD	S = H	↘	NS
<i>Cinématique</i>							
Vitesse de tracé	facile : difficile :	S > D S > D	S = VS S > VS	S > VD S > VD	S > H S = H	NS	VS : ↘ S, D, VD, H : NS
Nombre de pauses	NS	S < D	S > VS	S > VD	S = H	S, D, VS, VD, H : NS	S, D, VS, VD, H : NS
Durée des pauses	NS	S > D	S > VS	S > VD	S = H	NS	S, D, VS, VD, H : NS
<i>Force graphique</i>							
Pression	NS	S = D	S < VS	S = VD	S = H	S, D, VS, VD, H : NS	S, D, VS, VD, H : NS

Note. S : modalité statique ; D : modalité dynamique ; VS : modalité verbo-statique ; VD : modalité verbo-dynamique ; H : modalité haptique ; NS : effet non significatif ; ↗ : augmente selon la variable ; ↘ : diminue selon la variable.

3.2. Comparaison de l'impact des modalités de présentation dans les trois groupes

Dans cette seconde partie, l'effet du groupe est introduit en comparant l'effet des modalités dans le groupe T21 (n=11) par rapport aux deux groupes typiques. Une matrice de corrélations avec ajustement de Holm a été réalisée entre tous les indices, l'âge de développement et l'âge chronologique dans les trois groupes (tableaux E4, E5, E6 ; annexe E).

3.2.1. Trajectoire selon les modalités dans les trois groupes

Les statistiques descriptives concernant le score du point de départ et le score du sens de rotation dans les trois groupes sont présentées dans le tableau 32.

Tableau 32. Moyenne et écart-type des indices de trajectoire dans les trois groupes selon la modalité de présentation.

Indices	Groupe		
	T21	AD	AC
Score du point de départ			
Statique	0,997 ± 0,055	0,980 ± 0,125	0,992 ± 0,082
Dynamique	0,998 ± 0,028	1,000 ± 0,000	0,997 ± 0,055
Verbo-statique	0,994 ± 0,078	0,986 ± 0,099	1,000 ± 0,000
Verbo-dynamique	1,000 ± 0,000	1,018 ± 0,330	0,989 ± 0,091
Haptique	0,998 ± 0,028	0,989 ± 0,099	0,991 ± 0,095
Score du sens de rotation			
Statique	0,973 ± 0,126	0,983 ± 0,098	0,992 ± 0,061
Dynamique	0,992 ± 0,061	0,994 ± 0,067	0,980 ± 0,119
Verbo-statique	0,988 ± 0,077	0,950 ± 0,199	0,992 ± 0,061
Verbo-dynamique	0,986 ± 0,090	1,009 ± 0,340	0,985 ± 0,102
Haptique	0,991 ± 0,067	0,985 ± 0,102	0,998 ± 0,028

Note. Les valeurs reportées correspondent à la moyenne ± l'écart-type. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AD : groupe au développement typique de même âge de développement ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique.

Pour le **score du point de départ**, l'ANOVA à trois facteurs n'a pas révélé d'effet significatif de la modalité dans les trois groupes [$F_{(4,4941)} = 2,26 ; p = 0,06$], ni du groupe [$F_{(2,30)} = 0,71 ; p = 0,50$]. Un effet significatif de l'interaction Modalité x Groupe a été cependant mis en évidence [$F_{(8,4937)} = 3,05 ; p < 0,01$]. Comme reporté dans la figure 26, le score du point de départ ne dépend pas de la modalité dans le groupe T21 (S vs. D : $p = 1,00$; S vs. VS : $p = 1,00$; S vs. VD : $p = 1,00$; S vs. H : $p = 1,00$) ni dans le groupe AC (S vs. D : $p = 1,00$; S vs. VS : $p = 0,92$; S vs. VD : $p = 1,00$; S vs. H : $p = 1,00$). Dans le groupe AD, la modalité statique engendre un score significativement inférieur aux modalités dynamique ($p < 0,01$)

et verbo-dynamique ($p < 0,01$) et un score similaire à la modalité verbo-statique ($p = 0,92$) et haptique ($p = 0,68$). L'analyse de variance n'a pas rapporté d'effet significatif de la complexité de la lettre [$F_{(1,28)} = 0,22$; $p = 0,65$], ni de l'interaction Modalité x Complexité [$F_{(4,4941)} = 0,12$; $p = 0,97$], ou encore de l'interaction Modalité x Groupe x Complexité [$F_{(8,4937)} = 1,10$; $p < 0,36$].

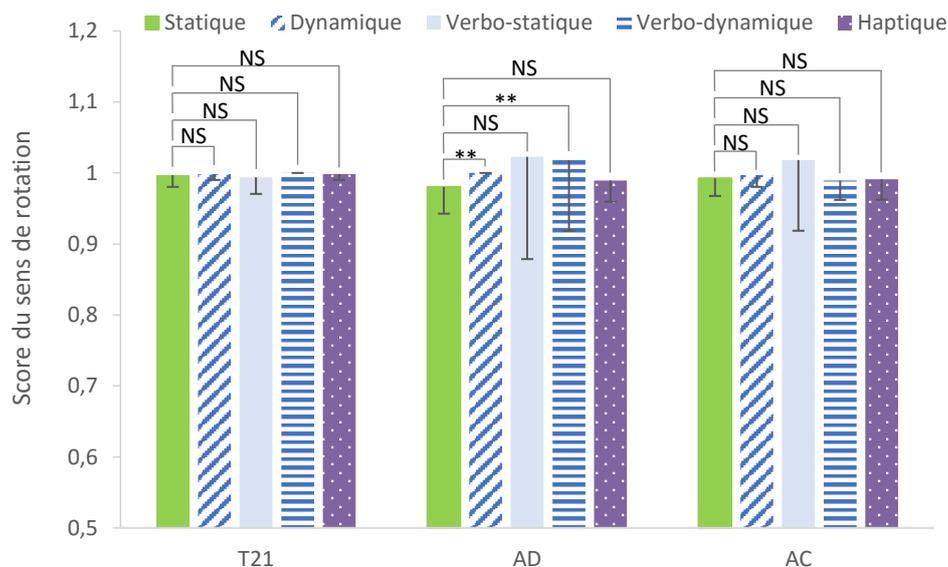


Figure 26. Score du sens de rotation en fonction des modalités de présentation dans les trois groupes. Les barres d'erreur verticales représentent l'erreur standard. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique. ** : $p < 0,01$; NS : non significatif.

Concernant le **score du sens de rotation**, l'ANOVA a mis en évidence un effet significatif de la modalité dans les trois groupes [$F_{(4,4941)} = 5,02$; $p < 0,001$] mais pas d'effet du groupe [$F_{(2,30)} = 0,25$; $p = 0,78$]. De plus, un effet significatif de l'interaction Modalité x Groupe est rapporté [$F_{(8,4937)} = 2,68$; $p < 0,01$] mais le score du sens de rotation dans la modalité statique n'est pas significativement différent des quatre autres modalités dans le groupe T21 (S vs. D : $p = 0,21$; S vs. VS : $p = 0,74$; S vs. VD : $p = 0,75$; S vs. H : $p = 0,36$), ni dans le groupe AD (S vs. D : $p = 0,89$; S vs. VS : $p = 0,33$; S vs. VD : $p = 0,97$; S vs. H : $p = 1,00$) ou encore dans le groupe AC (S vs. D : $p = 1,00$; S vs. VS : $p = 1,00$; S vs. VD : $p = 1,00$; S vs. H : $p = 1,00$). L'ANOVA a montré un effet de la complexité [$F_{(1,28)} = 11,49$; $p < 0,01$], indiquant un score du sens de rotation pour les lettres faciles supérieur à celui des lettres difficiles, et ce, indépendamment de la modalité [$F_{(4,4941)} = 1,33$; $p = 0,26$] et du groupe [$F_{(8,4937)} = 1,13$; $p = 0,34$].

3.2.2. Spatialité du tracé selon les modalités dans les trois groupes

Les statistiques descriptives concernant le nombre de tracés pour former une lettre, la longueur moyenne d'une lettre et le score de similarité dans les trois groupes sont présentées dans le tableau 33.

Tableau 33. Moyenne et écart-type des indices de spatialité dans les trois groupes selon la modalité de présentation.

Indices	Groupe		
	T21	AD	AC
Nombre moy. de tracés			
Statique	1,25 ± 0,55	1,40 ± 0,80	1,02 ± 0,16
Dynamique	1,43 ± 1,08	1,36 ± 0,78	1,05 ± 0,21
Verbo-statique	1,36 ± 0,74	1,33 ± 0,86	1,03 ± 0,20
Verbo-dynamique	1,31 ± 0,65	1,24 ± 0,54	1,04 ± 0,22
Haptique	1,26 ± 0,57	1,28 ± 0,62	1,01 ± 0,13
Longueur moy. (mm)			
Statique	90,4 ± 83,9	66,6 ± 65,2	81,8 ± 62
Dynamique	106,4 ± 94,1	71,4 ± 67,9	76,3 ± 54,6
Verbo-statique	108,4 ± 105,4	96,3 ± 107,2	74,6 ± 55,1
Verbo-dynamique	126,7 ± 119,5	82,1 ± 70,3	78,0 ± 50,7
Haptique	86,2 ± 75,9	76,3 ± 77,2	81,9 ± 54,8
Score de similarité			
Statique	0,878 ± 0,069	0,890 ± 0,062	0,928 ± 0,039
Dynamique	0,900 ± 0,061	0,891 ± 0,058	0,929 ± 0,044
Verbo-statique	0,894 ± 0,062	0,890 ± 0,057	0,918 ± 0,058
Verbo-dynamique	0,886 ± 0,067	0,897 ± 0,052	0,726 ± 0,045
Haptique	0,881 ± 0,067	0,888 ± 0,060	0,930 ± 0,042

Note. Les valeurs reportées correspondent à la moyenne ± l'écart-type. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AD : groupe au développement typique de même âge de développement ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique.

Pour le **nombre de tracés**, l'ANOVA à trois facteurs a révélé dans les trois groupes un effet de la modalité [$F_{(2,30)} = 10,13$; $p < 0,001$], ainsi qu'un effet significatif du groupe [$F_{(4,4941)} = 2,41$; $p < 0,05$] et de l'interaction Modalité x Groupe [$F_{(8,4937)} = 2,61$; $p < 0,01$]. Dans le groupe T21, le nombre de tracés pour la modalité statique est significativement inférieur à celui de la modalité dynamique ($p < 0,05$) et similaire aux trois autres modalités (S vs. VS : $p = 0,93$; S vs. VD : $p = 1,00$; S vs. H : $p = 1,00$). Le nombre de tracé dans la modalité statique ne diffère pas des autres modalités dans le groupe AD (S vs. D : $p = 1,00$; S vs. VS : $p = 0,47$; S vs. VD : $p = 0,096$; S vs. H : $p = 0,48$) et dans le groupe AC (S vs. D : $p = 1,00$; S vs. VS : $p = 1,00$; S vs. VD : $p = 1,00$; S vs. H : $p = 1,00$). L'analyse de variance n'a pas mis en évidence d'effet significatif de la complexité [$F_{(1,28)} = 0,06$; $p = 0,81$], ni de l'interaction Modalité x Complexité [$F_{(4,4941)} = 0,89$; $p = 0,47$]. Un effet de l'interaction Modalité x Groupe x Complexité a été rapporté [$F_{(8,4937)} = 2,82$; $p < 0,01$]. Comme indiqué

sur la figure 27, lors du tracé de lettres faciles, le nombre de tracés ne dépend pas de la modalité dans le groupe T21 (S vs. D : $p = 0,46$; S vs. VS : $p = 0,95$; S vs. VD : $p = 1,00$; S vs. H : $p = 1,00$) et le groupe AC (S vs. D : $p = 1,00$; S vs. VS : $p = 1,00$; S vs. VD : $p = 1,00$; S vs. H : $p = 1,00$). Dans le groupe AD, le nombre de tracés pour les lettres faciles dans la modalité statique est significativement supérieur à celui dans la modalité verbo-statique ($p < 0,05$) et non significativement différent des trois autres modalités (S vs. D : $p = 1,00$; S vs. VD : $p = 0,45$; S vs. H : $p = 1,00$). Le nombre de tracés pour les lettres difficiles ne varie pas selon la modalité dans le groupe T21 (S vs. D : $p = 0,99$; S vs. VS : $p = 1,00$; S vs. VD : $p = 1,00$; S vs. H : $p = 1,00$), le groupe AD (S vs. D : $p = 1,00$; S vs. VS : $p = 1,00$; S vs. VD : $p = 1,00$; S vs. H : $p = 0,86$) et le groupe AC (S vs. D : $p = 1,00$; S vs. VS : $p = 1,00$; S vs. VD : $p = 1,00$; S vs. H : $p = 1,00$).

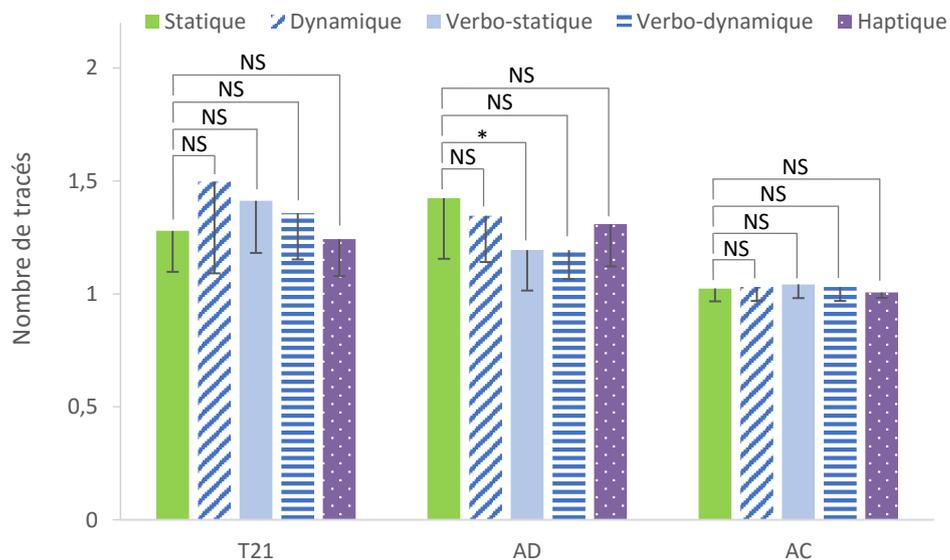


Figure 27. Nombre de tracés pour réaliser une lettre facile en fonction des modalités de présentation dans les trois groupes. Les barres d'erreur verticales représentent l'erreur standard. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique. * : $p < 0,05$; NS : non significatif.

Dans les trois groupes, l'ANOVA a montré un effet significatif de la modalité sur la **longueur moyenne d'une lettre** [$F_{(4,4941)} = 28,70$; $p < 0,001$], indiquant une longueur dans la modalité statique significativement inférieure aux quatre autres modalités (S vs. D : $p < 0,001$; S vs. VS : $p < 0,001$; S vs. VD : $p < 0,001$; S vs. H : $p < 0,01$). L'analyse de variance n'a pas mis en évidence d'effet significatif du groupe [$F_{(2,30)} = 0,81$; $p = 0,46$] mais un effet de l'interaction Modalité x Groupe [$F_{(8,4937)} = 15,28$; $p < 0,001$]. Comme indiqué dans la figure 28, dans le groupe T21, la longueur d'une lettre pour la modalité statique est significativement inférieure à celle de la modalité dynamique ($p < 0,001$), verbo-statique ($p < 0,05$) et verbo-dynamique ($p < 0,001$) et elle est équivalente à celle de la modalité

haptique ($p = 1,00$). Dans le groupe AD, la modalité statique engendre une longueur significativement inférieure à celle dans la modalité verbo-statique ($p < 0,001$) et verbo-dynamique ($p < 0,001$), et elle est similaire à celle de la modalité dynamique ($p = 0,99$) et haptique ($p = 0,11$). Dans le groupe AC, la longueur de la modalité statique ne varie pas significativement de celle des quatre autres modalités (S vs. D : $p = 0,64$; S vs. VS : $p = 1,00$; S vs. VD : $p = 0,80$; S vs. H : $p = 0,060$). L'ANOVA à trois facteurs a révélé un effet significatif de la complexité des lettres [$F_{(1,28)} = 340,86$; $p < 0,001$] et de l'interaction Modalité x Complexité [$F_{(4,4941)} = 5,37$; $p < 0,001$]. Pour les lettres faciles, la longueur dans la modalité statique est significativement inférieure à celle de la modalité dynamique ($p < 0,001$), verbo-statique ($p < 0,001$) et verbo-dynamique ($p < 0,001$) et elle est équivalente à celle de la modalité haptique ($p = 0,93$). Pour les lettres difficiles, la modalité statique engendre une longueur significativement inférieures à celle de la modalité verbo-dynamique ($p < 0,001$) et haptique ($p < 0,01$) et une longueur comparable à celle de la modalité dynamique ($p = 0,20$) et verbo-statique ($p = 0,056$). L'analyse de variance n'a pas mis en évidence d'effet significatif de l'interaction Modalité x Groupe x Complexité [$F_{(8,4937)} = 1,59$; $p = 0,12$].

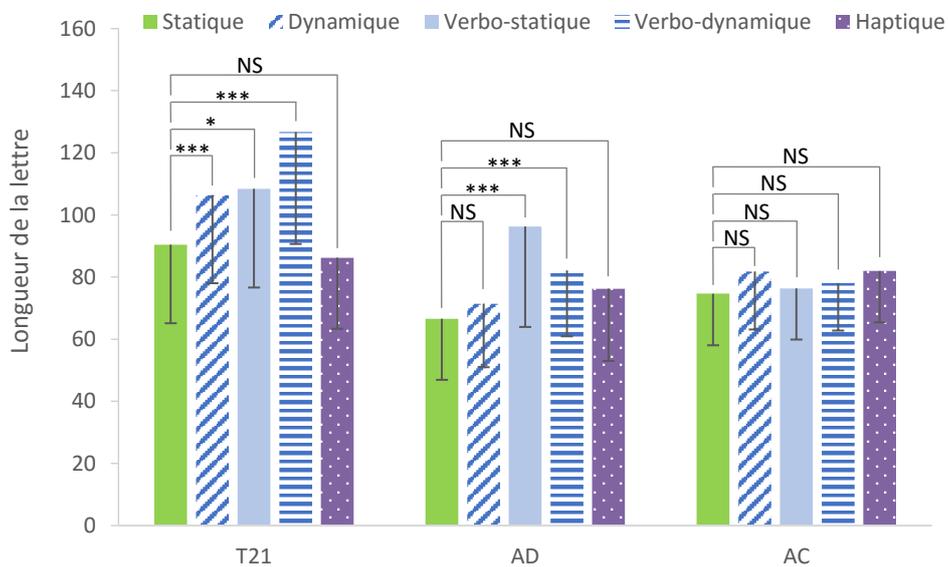


Figure 28. Longueur totale d'une lettre en fonction des modalités de présentation dans les trois groupes. Les barres d'erreur verticales représentent l'erreur standard. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique. * : $p < 0,05$; *** : $p < 0,001$; NS : non significatif.

Concernant l'indice de **similarité spatiale**, l'ANOVA a indiqué un effet de la modalité [$F_{(4,4941)} = 3,37$; $p < 0,001$], induisant un score dans la modalité statique significativement inférieur à celui de la modalité dynamique ($p < 0,05$) et non significativement différent des trois autres modalités (S vs. VS : $p = 0,86$; S vs. VD : $p = 0,32$; S vs. H : $p = 1,00$). L'analyse de

variance a également révélé un effet significatif du groupe [$F_{(2,30)} = 9,28 ; p < 0,001$] et de l'interaction Modalité x Groupe [$F_{(8,4937)} = 4,07 ; p < 0,001$]. Comme rapporté dans la figure 29, dans le groupe T21, la modalité statique génère un score de similarité significativement inférieur à celui de la modalité dynamique ($p < 0,001$) et un score analogue à celui des trois autres modalités (S vs. VS : $p = 0,087$; S vs. VD : $p = 0,72$; S vs. H : $p = 1,00$). Le score de similarité entre la modalité statique et les quatre autres modalités ne varie pas significativement dans le groupe AD (S vs. D : $p = 1,00$; S vs. VS : $p = 1,00$; S vs. VD : $p = 1,00$; S vs. H : $p = 1,00$) et dans le groupe AC (S vs. D : $p = 1,00$; S vs. VS : $p = 0,93$; S vs. VD : $p = 1,00$; S vs. H : $p = 1,00$). L'ANOVA à trois facteurs a mis en évidence un effet de la complexité [$F_{(1,28)} = 212,70 ; p < 0,001$], indiquant un score pour les lettres faciles inférieur à celui des lettres difficiles, et ce, quelle que soit la modalité [$F_{(4;4941)} = 0,49 ; p = 0,74$]. Concernant l'interaction Modalité x Groupe x Complexité, aucun effet significatif n'est montré [$F_{(8,4937)} = 1,83 ; p = 0,067$].

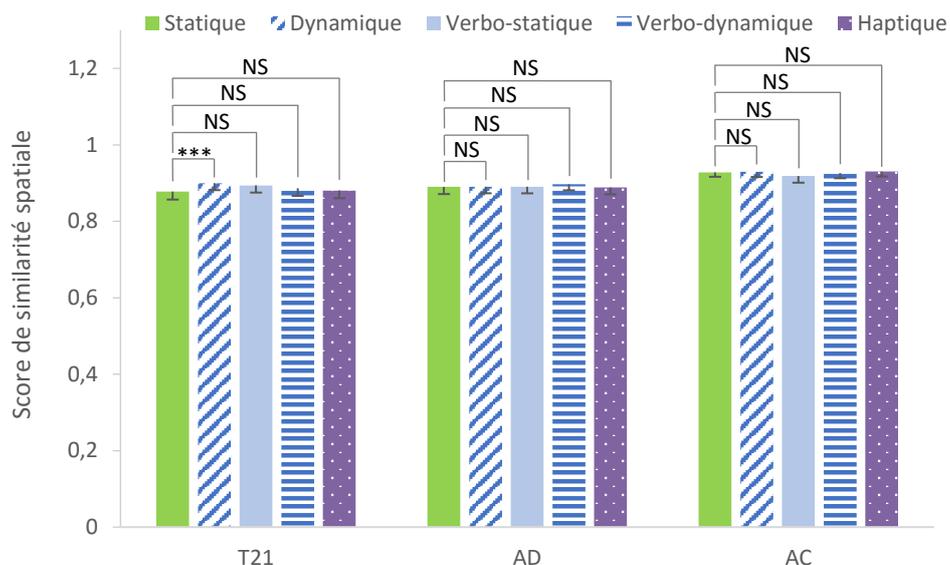


Figure 29. Score de similarité spatiale en fonction des modalités de présentation dans les trois groupes. Les barres d'erreur verticales représentent l'erreur standard. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique. *** : $p < 0,001$; NS : non significatif.

3.2.3. Temporalité du tracé selon les modalités dans les trois groupes

Les statistiques descriptives concernant la durée moyenne des tracés et la durée moyenne des levers dans les trois groupes sont présentées dans le tableau 34.

L'ANOVA sur la **durée moyenne des tracés** a mis en évidence un effet significatif de la modalité dans les trois groupes [$F_{(4,4941)} = 90,64 ; p < 0,001$], signalant une durée des tracés dans la modalité statique inférieure à celle de la modalité dynamique ($p < 0,001$),

verbo-statique ($p < 0,001$) et verbo-dynamique ($p < 0,001$) et similaire à celle de la modalité haptique ($p = 0,069$). L'analyse de variance a également révélé un effet significatif du groupe [$F_{(2,30)} = 16,06$; $p < 0,001$] et de l'interaction Modalité x Groupe [$F_{(8,4937)} = 6,19$; $p < 0,001$]. Comme indiqué dans la figure 30, dans le groupe T21, la modalité statique engendre une durée de tracé significativement inférieure à celle de la modalité dynamique ($p < 0,001$), verbo-statique ($p < 0,001$) et verbo-dynamique ($p < 0,001$) et une durée de tracé ne variant pas significativement de celle de la modalité haptique ($p = 1,00$). La même tendance se retrouve dans le groupe AD (S vs. D : $p < 0,001$; S vs. VS : $p < 0,001$; S vs. VD : $p < 0,001$; S vs. H : $p = 1,00$). Dans le groupe AC, la durée des tracés dans la modalité statique est significativement inférieure à celle des quatre autres modalités (S vs. D : $p < 0,001$; S vs. VS : $p < 0,001$; S vs. VD : $p < 0,001$; S vs. H : $p < 0,01$). L'ANOVA à trois facteurs a mis en évidence un effet significatif de la complexité [$F_{(1,28)} = 114,36$; $p < 0,001$] et de l'interaction Modalité x Complexité [$F_{(4,4941)} = 4,72$; $p < 0,001$]. La modalité statique induit une durée significativement inférieure à celle de la modalité dynamique, verbo-statique et verbo-dynamique et une durée similaire à celle de la modalité haptique, aussi bien pour les lettres faciles (S vs. D : $p < 0,001$; S vs. VS : $p < 0,001$; S vs. VD : $p < 0,001$; S vs. H : $p = 0,37$) que pour les lettres difficiles (S vs. D : $p < 0,001$; S vs. VS : $p < 0,001$; S vs. VD : $p < 0,001$; S vs. H : $p = 0,94$). Un effet significatif de l'interaction Modalité x Groupe x Complexité est rapporté [$F_{(8,4937)} = 2,20$; $p < 0,05$]. Dans le groupe T21, la tendance est similaire entre lettres faciles (S vs. D : $p < 0,001$; S vs. VS : $p < 0,01$; S vs. VD : $p < 0,001$; S vs. H : $p = 0,97$) et lettres difficiles (S vs. D : $p < 0,01$; S vs. VS : $p < 0,01$; S vs. VD : $p < 0,001$; S vs. H : $p = 1,00$).

Tableau 34. Moyenne et écart-type des indices de temporalité dans les trois groupes selon la modalité de présentation.

Indices	Groupe		
	T21	AD	AC
Durée moy. des tracés (s)			
Statique	4,81 ± 3,14	3,10 ± 2,24	1,94 ± 1,16
Dynamique	5,98 ± 2,81	4,19 ± 3,67	2,56 ± 2,01
Verbo-statique	5,54 ± 2,98	3,88 ± 2,76	2,41 ± 1,7
Verbo-dynamique	6,25 ± 3,02	3,73 ± 2,28	2,61 ± 2,02
Haptique	4,97 ± 2,95	3,02 ± 2,05	2,22 ± 1,29
Durée moy. des levers (s)			
Statique	0,18 ± 0,49	0,41 ± 1,16	0,02 ± 0,21
Dynamique	0,36 ± 1,02	1,01 ± 6,13	0,01 ± 0,09
Verbo-statique	0,27 ± 0,63	0,52 ± 2,11	0,03 ± 0,19
Verbo-dynamique	0,28 ± 0,65	0,44 ± 3,67	0,03 ± 0,26
Haptique	0,18 ± 0,42	0,46 ± 4,30	0,00 ± 0,05

Note. Les valeurs reportées correspondent à la moyenne ± l'écart-type. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AD : groupe au développement typique de même âge de développement ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique.

Egalement dans le groupe AD, il n'y a pas de différence de l'effet de la modalité entre les lettres faciles (S vs. D : $p < 0,001$; S vs. VS : $p < 0,05$; S vs. VD : $p < 0,001$; S vs. H : $p = 1,00$) et les lettres difficiles (S vs. D : $p < 0,01$; S vs. VS : $p < 0,001$; S vs. VD : $p < 0,001$; S vs. H : $p = 1,00$). Dans le groupe AC, la durée des tracés des lettres faciles selon la modalité statique est inférieure à celle de la modalité dynamique ($p < 0,05$) et verbo-dynamique ($p < 0,01$) et comparable aux deux autres modalités (S vs. VS : $p = 0,11$; S vs. H : $p = 0,97$). De plus, la modalité statique induit une durée des tracés des lettres difficiles inférieure à celle de la modalité dynamique ($p < 0,001$), verbo-statique ($p < 0,01$) et verbo-dynamique ($p < 0,001$) et une durée similaire à celle de la modalité haptique ($p = 0,12$).

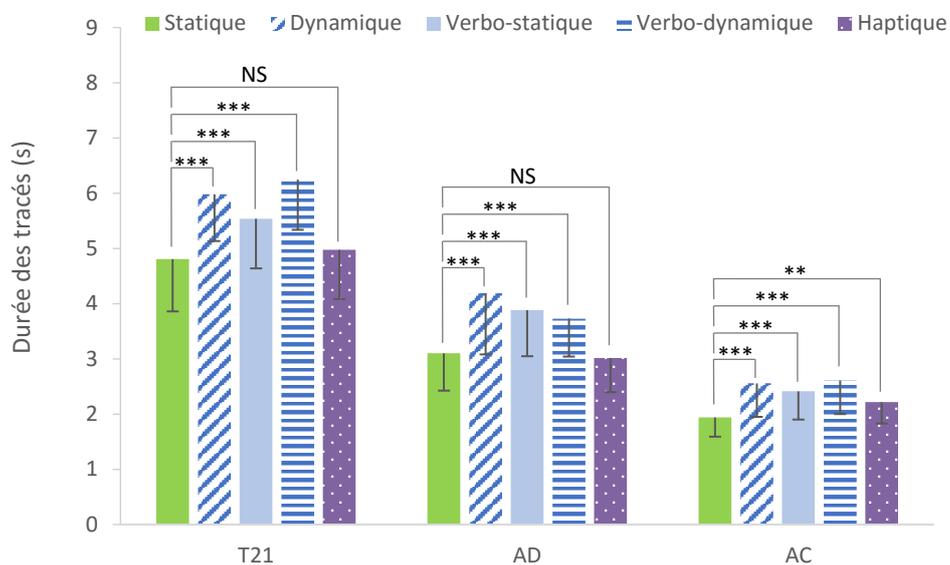


Figure 30. Durée des tracés en fonction des modalités de présentation dans les trois groupes. Les barres d'erreur verticales représentent l'erreur standard. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique. ** : $p < 0,01$; *** : $p < 0,001$; NS : non significatif.

Pour la **durée moyenne des levers**, l'ANOVA a montré un effet significatif de la modalité dans les trois groupes [$F_{(4,4941)} = 2,47$; $p < 0,05$]. Cependant, la modalité statique n'induit pas de différence significative sur la durée des levers par rapport aux quatre autres modalités (S vs. D : $p = 0,81$; S vs. VS : $p = 1,00$; S vs. VD : $p = 0,87$; S vs. H : $p = 0,35$). L'analyse de variance a mis en évidence un effet significatif du groupe [$F_{(2,30)} = 10,05$; $p < 0,001$] et de l'interaction Modalité x Groupe [$F_{(8,4937)} = 2,60$; $p < 0,01$]. Cependant, la durée des levers dans la modalité statique est similaire à celle des quatre autres modalités dans le groupe T21 (S vs. D : $p = 0,055$; S vs. VS : $p = 0,93$; S vs. VD : $p = 0,99$; S vs. H : $p = 1,00$), le groupe AD (S vs. D : $p = 1,00$; S vs. VS : $p = 0,45$; S vs. VD : $p = 0,092$; S vs. H : $p = 0,35$) et le groupe AC (S vs. D : $p = 1,00$; S vs. VS : $p = 1,00$; S vs. VD : $p = 1,00$; S vs. H : $p = 1,00$). L'ANOVA à trois facteurs n'a pas mis en évidence d'effet significatif de la complexité [$F_{(1,28)} = 0,10$; $p = 0,76$],

ni de l'interaction Modalité x Complexité [$F_{(4,4941)} = 0,90$; $p = 0,46$]. Un effet significatif de l'interaction Modalité x Groupe x Complexité est cependant rapporté [$F_{(8,4937)} = 2,68$; $p < 0,01$]. Pour les lettres faciles, il n'y a pas de différence significative entre la durée des levers de la modalité statique et celle des quatre autres modalités dans le groupe T21 (S vs. D : $p = 0,39$; S vs. VS : $p = 0,93$; S vs. VD : $p = 1,00$; S vs. H : $p = 1,00$), le groupe AD (S vs. D : $p = 1,00$; S vs. VS : $p = 0,058$; S vs. VD : $p = 0,62$; S vs. H : $p = 1,00$) et le groupe AC (S vs. D : $p = 1,00$; S vs. VS : $p = 1,00$; S vs. VD : $p = 1,00$; S vs. H : $p = 1,00$). Pour les lettres difficiles, l'effet de la modalité est comparable pour le groupe T21 (S vs. D : $p = 1,00$; S vs. VS : $p = 1,00$; S vs. VD : $p = 1,00$; S vs. H : $p = 1,00$), le groupe AD (S vs. D : $p = 1,00$; S vs. VS : $p = 1,00$; S vs. VD : $p = 0,99$; S vs. H : $p = 0,60$) et le groupe AC (S vs. D : $p = 1,00$; S vs. VS : $p = 1,00$; S vs. VD : $p = 1,00$; S vs. H : $p = 1,00$).

3.2.4. Cinématique selon les modalités dans les trois groupes

Les statistiques descriptives concernant la vitesse moyenne de tracé, le nombre et la durée des pauses dans les trois groupes sont présentées dans le tableau 35.

Tableau 35. Moyenne et écart-type des indices de cinématique dans les trois groupes selon la modalité de présentation.

Indices	Groupe		
	T21	AD	AC
Vitesse de tracé (mm/s)			
Statique	22,21 ± 18,76	24,73 ± 14,77	42,73 ± 24,78
Dynamique	18,33 ± 13,19	21,66 ± 15,64	43,17 ± 40,60
Verbo-statique	22,32 ± 23,63	27,47 ± 24,50	34,64 ± 16,17
Verbo-dynamique	23,33 ± 24,12	23,19 ± 13,05	39,39 ± 30,57
Haptique	21,19 ± 19,79	29,20 ± 23,57	40,13 ± 21,24
Nombre moy. de pauses			
Statique	4,75 ± 6,12	4,69 ± 5,52	1,58 ± 1,25
Dynamique	5,07 ± 5,31	6,48 ± 7,11	1,75 ± 1,55
Verbo-statique	5,28 ± 5,69	6,51 ± 8,17	2,70 ± 4,04
Verbo-dynamique	5,08 ± 5,48	5,15 ± 6,28	2,03 ± 2,06
Haptique	4,23 ± 5,06	4,04 ± 4,61	1,75 ± 1,74
Durée moy. des pauses (s)			
Statique	0,51 ± 1,51	0,33 ± 0,75	0,06 ± 0,07
Dynamique	0,23 ± 0,32	0,33 ± 0,56	0,06 ± 0,07
Verbo-statique	0,30 ± 0,82	0,34 ± 0,52	0,14 ± 0,34
Verbo-dynamique	0,24 ± 0,47	0,28 ± 0,54	0,08 ± 0,14
Haptique	0,18 ± 0,31	0,20 ± 0,30	0,06 ± 0,07

Note. Les valeurs reportées correspondent à la moyenne ± l'écart-type. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AD : groupe au développement typique de même âge de développement ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique.

L'ANOVA a montré un effet significatif de la modalité sur la **vitesse moyenne de tracé** dans les trois groupes [$F_{(4,4941)} = 21,88$; $p < 0,001$], montrant une vitesse dans la

modalité statique supérieure à celle dans la modalité dynamique ($p < 0,001$), verbo-statique ($p < 0,05$) et verbo-dynamique ($p < 0,001$) et similaire à celle dans la modalité haptique ($p = 1,00$). L'analyse de variance a également rapporté un effet significatif du groupe [$F_{(2,30)} = 6,02$; $p < 0,01$] et de l'interaction Modalité x Groupe [$F_{(8,4937)} = 3,33$; $p < 0,001$]. Comme indiqué dans la figure 31, la modalité statique engendre une vitesse supérieure à celle de la modalité dynamique et non significativement différente des trois autres modalités dans le groupe T21 (S vs. D : $p < 0,01$; S vs. VS : $p = 0,87$; S vs. VD : $p = 0,56$; S vs. H : $p = 0,98$) et dans le groupe AD (S vs. D : $p < 0,001$; S vs. VS : $p = 1,00$; S vs. VD : $p = 0,95$; S vs. H : $p = 0,87$). Dans le groupe AC, la vitesse pour la modalité statique est supérieure à celle de la modalité dynamique ($p < 0,01$), verbo-statique ($p < 0,01$) et verbo-dynamique ($p < 0,05$) et elle est similaire à celle de la modalité haptique ($p = 1,00$). L'ANOVA à trois facteurs a révélé un effet significatif de la complexité [$F_{(1,28)} = 103,63$; $p < 0,001$] et de l'interaction Modalité x Complexité [$F_{(4,4941)} = 3,32$; $p < 0,05$]. Pour les lettres faciles, la vitesse dans la modalité statique est significativement supérieure à celle dans la modalité dynamique ($p < 0,001$) et verbo-dynamique ($p < 0,05$) et comparable à celle dans la modalité verbo-statique ($p = 1,00$) et haptique ($p = 0,99$). Pour les lettres difficiles, la modalité statique engendre une vitesse significativement supérieure à celle de la modalité dynamique ($p < 0,001$) et verbo-statique ($p < 0,05$) et analogue à celle de la modalité verbo-dynamique ($p = 0,28$) et haptique ($p = 0,95$). L'ANOVA n'a pas mis en évidence d'effet significatif de l'interaction Modalité x Groupe x Complexité [$F_{(8,4937)} = 1,87$; $p = 0,06$].

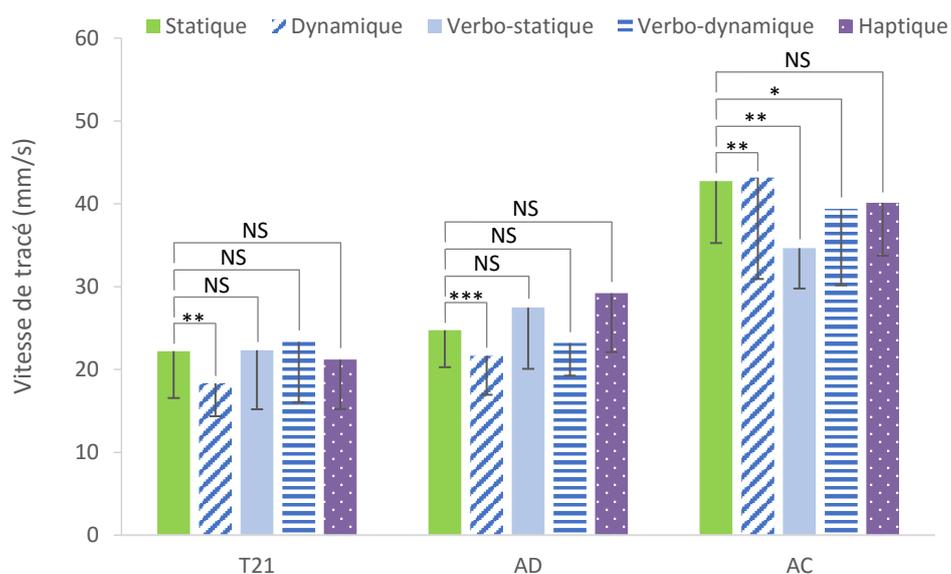


Figure 31. Vitesse de tracé en fonction des modalités de présentation dans les trois groupes. Les barres d'erreur verticales représentent l'erreur standard. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique. * : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$; *** : $p < 0,001$; NS : non significatif.

Concernant le **nombre de pauses**, l'ANOVA a montré un effet significatif de la modalité dans les trois groupes [$F_{(4,4941)} = 19,75 ; p < 0,001$], indiquant un nombre de pauses pour la modalité statique inférieur à celui pour la modalité dynamique ($p < 0,001$), verbo-statique ($p < 0,001$) et verbo-dynamique ($p < 0,001$) et similaire à celui pour la modalité haptique ($p = 0,87$). L'analyse de variance a également montré un effet significatif du groupe [$F_{(2,30)} = 7,85 ; p < 0,01$] et de l'interaction Modalité x Groupe [$F_{(8,4937)} = 2,80 ; p < 0,01$]. Comme indiqué dans la figure 32, la modalité statique dans le groupe T21 engendre un nombre de pauses significativement inférieur à celui de la modalité dynamique ($p < 0,01$) et verbo-statique ($p < 0,05$) et analogue à celui de la modalité verbo-dynamique ($p = 0,073$) et haptique ($p = 0,97$). Dans le groupe AD, le nombre de pauses dans la modalité statique est significativement inférieur à celui dans la modalité dynamique ($p < 0,01$) et ne variant pas significativement des trois autres modalités (S vs. VS : $p = 0,40$; S vs. VD : $p = 1,00$; S vs. H : $p = 1,00$). Dans le groupe AC, la modalité statique induit un nombre de pauses significativement inférieur à celui de la modalité verbo-statique ($p < 0,01$) et semblable aux trois autres modalités (S vs. D : $p = 1,00$; S vs. VD : $p = 0,46$; S vs. H : $p = 1,00$). L'ANOVA à trois facteurs a révélé un effet significatif de la complexité [$F_{(1,28)} = 8,62 ; p < 0,01$] et de l'interaction Modalité x Complexité [$F_{(4,4941)} = 3,14 ; p < 0,05$]. Pour les lettres faciles, le nombre de pauses dans la modalité statique est significativement inférieur à celui dans la modalité dynamique ($p < 0,01$) et verbo-dynamique ($p < 0,05$) et similaire à celle dans la modalité verbo-statique ($p = 0,25$) et haptique ($p = 1,00$). Pour les lettres difficiles, la modalité statique engendre un nombre de pauses significativement supérieur à celui de la modalité dynamique ($p < 0,01$) et verbo-statique ($p < 0,001$) et analogue à celle de la modalité verbo-dynamique ($p = 0,34$) et haptique ($p = 0,98$). L'ANOVA n'a pas mis en évidence d'effet significatif de l'interaction Modalité x Groupe x Complexité [$F_{(8,4937)} = 0,82 ; p = 0,59$].

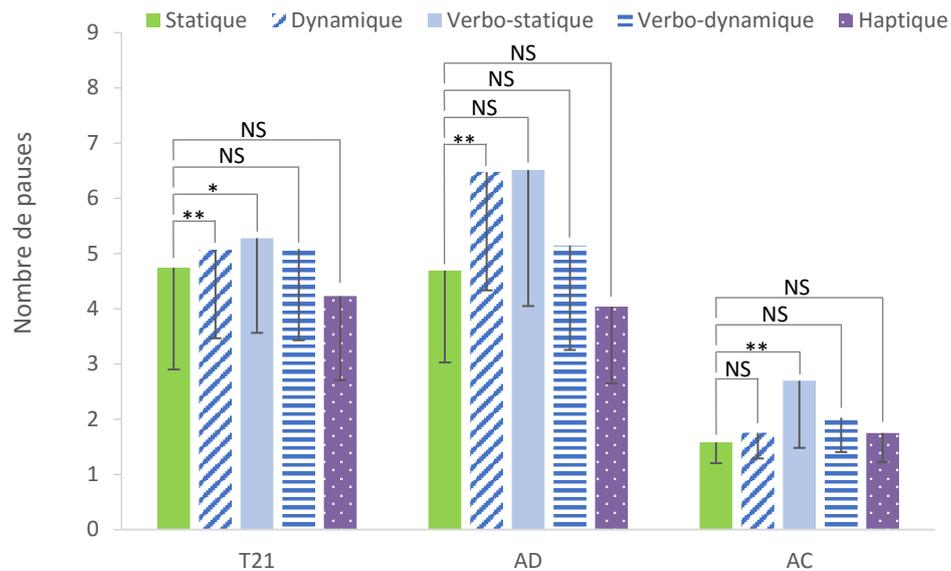


Figure 32. Nombre de pauses en fonction des modalités de présentation dans les trois groupes. Les barres d'erreur verticales représentent l'erreur standard. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique. * : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$; NS : non significatif.

Pour la **durée moyenne des pauses**, l'ANOVA a mis en évidence un effet significatif de la modalité dans les trois groupes [$F_{(4,4941)} = 16,96$; $p < 0,001$]. La modalité statique engendre des pauses plus longues comparativement à la modalité dynamique ($p < 0,001$), verbo-statique ($p < 0,001$) et verbo-dynamique ($p < 0,001$) et des pauses de durée semblable à celles de la modalité haptique ($p = 0,95$). L'analyse de variance a également rapporté un effet significatif du groupe [$F_{(2,30)} = 8,85$; $p < 0,001$] et de l'interaction Modalité x Groupe [$F_{(8,4937)} = 2,70$; $p < 0,01$]. Comme l'indique la figure 33, dans le groupe T21, la durée des pauses pour la modalité statique est significativement supérieure à celle de la modalité verbo-dynamique ($p < 0,05$) et similaire aux trois autres modalités (S vs. D : $p = 0,062$; S vs. VS : $p = 0,18$; S vs. H : $p = 0,87$). Dans le groupe AD, la modalité statique engendre une durée de pauses significativement inférieure à celle de la modalité dynamique ($p < 0,05$) et analogue aux trois autres modalités (S vs. VS : $p = 0,43$; S vs. VD : $p = 0,99$; S vs. H : $p = 1,00$). Dans le groupe AC, la durée des pauses de la modalité statique est significativement inférieure à celle de la modalité verbo-statique ($p < 0,01$) et non significativement différente de celle des trois autres modalités (S vs. D : $p = 0,94$; S vs. VD : $p = 0,86$; S vs. H : $p = 1,00$). L'ANOVA à trois facteurs a mis en évidence un effet significatif de la complexité [$F_{(1,28)} = 8,10$; $p < 0,01$] et de l'interaction Modalité x Complexité [$F_{(4,4941)} = 3,90$; $p < 0,01$]. Pour les lettres faciles, la durée des pauses dans la modalité statique ne diffère pas de celle des autres modalités (S vs. D : $p = 0,050$; S vs. VS : $p = 0,76$; S vs. VD : $p = 0,078$; S vs. H : $p = 1,00$). Pour les lettres difficiles, la modalité statique implique une durée des pauses supérieure à celle de la modalité dynamique ($p < 0,01$) et verbo-

statique ($p < 0,001$) et similaire à celle de la modalité verbo-dynamique ($p = 0,19$) et haptique ($p = 1,00$). L'analyse de variance n'a pas souligné d'effet significatif de l'interaction Modalité x Groupe x Complexité [$F_{(8,4937)} = 0,97 ; p = 0,46$].

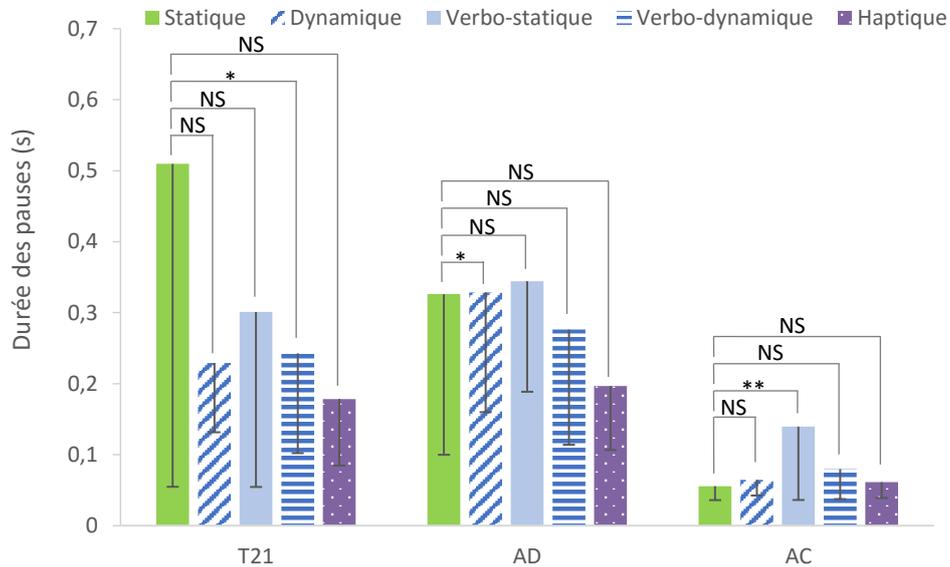


Figure 33. Durée des pauses en fonction des modalités de présentation dans les trois groupes. Les barres d'erreur verticales représentent l'erreur standard. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique. * : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$; NS : non significatif.

3.2.5. Force graphique selon les modalités dans les trois groupes

La force graphique est évaluée à partir de la pression moyenne exercée sur la tablette par le biais du stylet. Les statistiques descriptives concernant la pression dans les trois groupes sont présentées dans le tableau 36.

Tableau 36. Moyenne et écart-type de l'indice de force graphique dans les trois groupes selon la modalité de présentation.

Indice	Groupe		
	T21	AD	AC
Pression moy. (UA)			
Statique	640,5 ± 167,3	700,3 ± 217,3	675,9 ± 225,3
Dynamique	623,7 ± 165,2	687,3 ± 219,2	653,3 ± 202,9
Verbo-statique	620,4 ± 176,1	713,4 ± 197,0	684,8 ± 199,5
Verbo-dynamique	650,2 ± 154,6	708,8 ± 201,2	688,9 ± 215,5
Haptique	607,9 ± 142,5	700,6 ± 210,2	664,0 ± 230,0

Note. Les valeurs reportées correspondent à la moyenne ± l'écart-type. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AD : groupe au développement typique de même âge de développement ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique.

L'ANOVA sur la **pression** a mis en évidence un effet significatif de la modalité dans les trois groupes [$F_{(4,4941)} = 5,41 ; p < 0,001$]. Cependant, les analyses post-hoc ne montrent pas de différence significative entre la modalité statique et les autres modalités (S vs. D : $p = 0,31$; S vs. VS : $p = 0,97$; S vs. VD : $p = 0,56$; S vs. H : $p = 0,14$). L'analyse de variance n'a

pas souligné d'effet significatif du groupe [$F_{(2,30)} = 0,95 ; p = 0,40$] mais un effet significatif de l'interaction Modalité x Groupe [$F_{(8,4937)} = 2,18 ; p < 0,05$]. Comme indiqué dans la figure 34, dans le groupe T21, la pression dans la modalité statique est significativement inférieure à celle dans la modalité haptique ($p < 0,05$) et ne varie pas significativement des trois autres modalités (S vs. D : $p = 0,93$; S vs. VS : $p = 0,84$; S vs. VD : $p = 1,00$). La modalité statique implique une pression comparable à celle des autres modalités dans le groupe AD (S vs. D : $p = 1,00$; S vs. VS : $p = 1,00$; S vs. VD : $p = 1,00$; S vs. H : $p = 1,00$) et dans le groupe AC (S vs. D : $p = 1,00$; S vs. VS : $p = 0,83$; S vs. VD : $p = 0,98$; S vs. H : $p = 1,00$). L'ANOVA à trois facteurs a révélé un effet significatif de la complexité [$F_{(1,28)} = 6,15 ; p < 0,05$], indiquant une pression lors du tracé de lettres faciles inférieure à celle des lettres difficiles, et ce, quelle que soit la modalité [$F_{(4,4941)} = 0,65 ; p = 0,62$] et le groupe [$F_{(8,4937)} = 1,33 ; p = 0,22$].

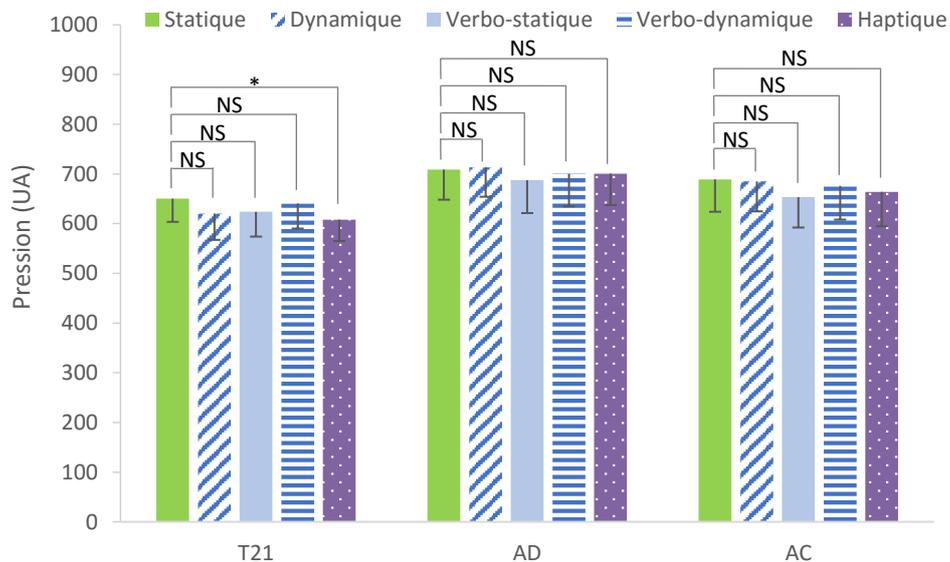


Figure 34. Pression exercée sur la feuille en fonction des modalités de présentation dans les trois groupes. Les barres d'erreur verticales représentent l'erreur standard. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique. * : $p < 0,05$; NS : non significatif.

3.2.6. Récapitulatif des résultats dans les trois groupes

Le tableau 37 regroupe un résumé des résultats de cette seconde partie de l'étude. Les différences significatives entre la modalité statique et les quatre autres modalités sont reportées en gras.

Tableau 37. Récapitulatif des résultats de l'étude 3 pour les groupes T21, AD et AC.

Indices	Effet									
	Groupe x Modalité (Lettres faciles)				Groupe x Modalité (Lettres difficiles)					
<i>Trajectoire</i>										
Score de point de départ	T21 :	S = D	S = VS	S = VD	S = H					
	AD :	S < D	S = VS	S < VD	S = H	<i>idem</i>				
	AC :	S = D	S = VS	S = VD	S = H					
Score de sens de rotation	T21 :	S = D	S = VS	S = VD	S = H					
	AD :	S = D	S = VS	S = VD	S = H	<i>idem</i>				
	AC :	S = D	S = VS	S = VD	S = H					
<i>Spatialité</i>										
Nombre de tracés	T21 :	S = D	S = VS	S = VD	S = H	T21 :	S = D	S = VS	S = VD	S = H
	AD :	S = D	S > VS	S = VD	S = H	AD :	S = D	S = VS	S = VD	S = H
	AC :	S = D	S = VS	S = VD	S = H	AC :	S = D	S = VS	S = VD	S = H
Longueur totale	T21 :	S < D	S < VS	S < VD	S = H					
	AD :	S = D	S < VS	S < VD	S = H					
	AC :	S = D	S = VS	S = VD	S < H					
Score de similarité	T21 :	S = D	S = VS	S = VD	S = H	T21 :	S = D	S = VS	S = VD	S = H
	AD :	S = D	S = VS	S = VD	S = H	AD :	S = D	S = VS	S = VD	S = H
	AC :	S = D	S = VS	S = VD	S = H	AC :	S = D	S = VS	S = VD	S = H
<i>Temporalité</i>										
Durée totale des tracés	T21 :	S < D	S < VS	S < VD	S = H	T21 :	S < D	S < VS	S < VD	S = H
	AD :	S < D	S < VS	S < VD	S = H	AD :	S < D	S < VS	S < VD	S = H
	AC :	S < D	S = VS	S < VD	S = H	AC :	S < D	S < VS	S < VD	S = H
Durée totale des levers	T21 :	S = D	S = VS	S = VD	S = H	T21 :	S = D	S = VS	S = VD	S = H
	AD :	S = D	S = VS	S = VD	S = H	AD :	S = D	S = VS	S = VD	S = H
	AC :	S = D	S = VS	S = VD	S = H	AC :	S = D	S = VS	S = VD	S = H
<i>Cinématique</i>										
Vitesse moyenne de tracé	T21 :	S = D	S = VS	S = VD	S = H	T21 :	S = D	S = VS	S = VD	S = H
	AD :	S > D	S = VS	S = VD	S = H	AD :	S > D	S = VS	S = VD	S = H
	AC :	S = D	S = VS	S = VD	S = H	AC :	S = D	S = VS	S = VD	S = H
Nombre de pauses	T21 :	S < D	S < VS	S = VD	S = H					
	AD :	S < D	S = VS	S = VD	S = H	<i>idem</i>				
	AC :	S = D	S < VS	S = VD	S = H					
Durée des pauses	T21 :	S = D	S = VS	S > VD	S = H					
	AD :	S < D	S = VS	S = VD	S = H	<i>idem</i>				
	AC :	S = D	S < VS	S = VD	S = H					
<i>Force graphique</i>										
Pression	T21 :	S = D	S = VS	S = VD	S < H					
	AD :	S = D	S = VS	S = VD	S = H	<i>idem</i>				
	AC :	S = D	S = VS	S = VD	S = H					

Note. En gras, l'effet significatif d'une modalité selon le groupe. S : modalité statique ; D : modalité dynamique ; VS : modalité verbo-statique ; VD : modalité verbo-dynamique ; H : modalité haptique ; T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AD : groupe au développement typique de même âge de développement ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique ; *idem* : effet des modalités similaire entre les lettres faciles et les lettres difficiles.

4. Synthèse des résultats de l'étude 3

Cette troisième étude avait pour objectif de tester l'impact de différentes modalités de présentation d'un modèle de lettre sur les caractéristiques dynamiques du tracé chez les personnes T21. Comparativement à la modalité contrôle (modalité statique) qui n'informe que sur la forme globale de la lettre et non sur le point de départ et la trajectoire du mouvement à réaliser, l'ensemble des analyses ont permis de révéler que les quatre modalités de présentation ont induit des variations du tracé de lettres dans les trois groupes.

Concernant le premier type d'analyses dans le groupe T21, un effet de la modalité a effectivement été mis en évidence pour tous les indices sauf pour le score de point de départ qui ne varie pas en fonction de la modalité. Les résultats indiquent que la présentation des lettres dans la **modalité dynamique** entraîne une baisse du respect du sens de rotation, une augmentation du nombre, de la longueur et de la durée des tracés, des levers, une vitesse réduite ainsi qu'une augmentation du nombre de pauses comparativement à la modalité contrôle. Par contre, la durée des pauses dans la modalité dynamique est réduite par rapport à la modalité contrôle. Le score de similarité spatiale et la pression ne varient pas entre les deux modalités de présentation des lettres. L'effet de la modalité dynamique ne varie pas entre les productions des lettres faciles et des lettres difficiles. Concernant la **modalité verbo-statique**, les résultats indiquent que le score du sens de rotation ne varie pas comparativement à la modalité contrôle chez les personnes T21. Par contre, la présentation verbo-statique entraîne une augmentation du nombre et de la durée des tracés, des levers ainsi que de la pression exercée sur le stylet. Par ailleurs, la modalité verbo-statique induit un nombre et une durée des pauses inférieurs à ceux dans la modalité contrôle. Un effet de la complexité de la lettre est observé sur la longueur et la vitesse des tracés. En effet, la longueur des lettres faciles est plus importante dans la modalité verbo-statique tandis qu'elle ne varie pas pour l'exécution de lettres difficiles. Pour la vitesse, celle-ci ne varie pas entre les conditions pour les lettres faciles alors que le tracé de lettres difficiles est lent dans la modalité verbo-statique. La **modalité verbo-dynamique** entraîne un meilleur score de sens de rotation par rapport à la modalité contrôle ainsi qu'une diminution du nombre et de la durée des pauses dans le groupe T21. Par ailleurs, cette modalité induit une augmentation de la longueur et de la durée des tracés, des levers ainsi que de la vitesse de tracé. Concernant le nombre de tracés, le score de similarité et la pression, la modalité verbo-dynamique ne se différencie pas de la modalité contrôle. L'effet de la modalité verbo-

dynamique ne varie pas entre les productions des lettres faciles et des lettres difficiles. La **modalité haptique** ne se différencie pas de la modalité contrôle pour la grande majorité des indices parmi le score de sens de rotation, le nombre et la longueur des tracés, le score de similarité spatiale, la durée des levers, le nombre et la durée des pauses ainsi que la pression chez les personnes T21. Les tracés durent plus longtemps dans la modalité haptique par rapport à la modalité contrôle. Les lettres faciles sont écrites plus lentement dans la modalité haptique et les lettres difficiles sont tracées à une vitesse similaire de celle de la modalité statique. L'effet de la modalité haptique ne varie pas entre les productions des lettres faciles et des lettres difficiles. Les analyses portant sur l'effet de l'âge de développement mettent en évidence dans toutes les modalités une amélioration de la trajectoire en termes de point de départ et de sens de rotation ainsi que de la similarité spatiale avec l'âge de développement et une diminution du nombre de tracés et de la durée des levers. A l'inverse, la longueur, la durée et la vitesse de tracé, le nombre et la durée des pauses ainsi que la pression ne varient pas significativement selon l'âge de développement des participants T21. Concernant l'âge chronologique, une amélioration des performances dans toutes les modalités est mise en évidence pour le point de départ et le sens de rotation du tracé. Le score de similarité spatiale augmente avec l'âge chronologique dans toutes les modalités mise à part la modalité dynamique. Concernant la vitesse de tracé, une diminution avec l'âge chronologique est révélée pour la modalité verbo-statique mais pas pour les autres modalités. Les résultats ne soulignent pas d'effet de l'âge chronologique pour le nombre, la longueur et la durée des tracés, des levers, le nombre et la durée des pauses ainsi que la pression.

L'influence des modalités sur le tracé de lettres dans la population T21 a été comparée à celle observée dans la population typique. Les comparaisons indiquent des différences entre le groupe T21 et les enfants typiques de même âge de développement. Ainsi, le respect du point de départ ne varie pas dans la population T21 tandis qu'il est plus important dans la modalité dynamique et verbo-dynamique chez les enfants typiques de même âge de développement. Le nombre de tracés des lettres faciles et difficiles ne varie pas entre les modalités dans le groupe T21 alors que chez les enfants typiques de même âge de développement la modalité verbo-statique induit un tracé de lettres faciles en un nombre de segments inférieur à celui dans la modalité contrôle. Concernant la longueur de tracé, la modalité dynamique induit des tracés plus grands par rapport à la modalité contrôle dans

le groupe T21 alors que les deux modalités sont similaires dans le groupe d'enfants typiques de même âge de développement. Pour la vitesse de tracé, la modalité dynamique ne se différencie pas de la modalité contrôle chez les personnes T21 alors que chez les enfants typiques de même âge de développement la vitesse dans la modalité dynamique est inférieure à celle dans la modalité contrôle. Dans le groupe T21, le nombre de pauses dans la modalité verbo-statique est supérieur à celui dans la modalité contrôle alors que les deux modalités sont similaires chez les enfants typiques de même âge de développement. Une diminution de la durée des pauses est mise en évidence dans le groupe T21 pour la modalité verbo-dynamique mais pas dans la modalité dynamique. A l'inverse, chez les enfants typiques de même âge de développement, la modalité verbo-dynamique ne varie pas de la modalité contrôle alors qu'une augmentation de la durée des pauses est révélée dans la modalité dynamique. Concernant la pression, la modalité haptique induit chez les personnes T21 une augmentation par rapport à la modalité contrôle alors que chez les enfants typiques de même âge de développement les deux modalités ne se différencient pas. Des similarités entre les deux groupes sont toutefois mises en évidence pour certains indices. Ainsi, la longueur dans la modalité verbo-statique et verbo-dynamique est supérieure à celle dans la modalité contrôle, et ce, dans les deux groupes. De même, la durée des tracés dans la modalité dynamique, verbo-statique et verbo-dynamique est supérieure à celle dans la modalité contrôle dans le groupe T21 et dans le groupe typique de même âge de développement. Concernant le nombre de pauses, la modalité dynamique induit une augmentation par rapport à la modalité contrôle dans les deux groupes. Les comparaisons ont également porté sur l'effet des modalités entre le groupe T21 et le groupe typique de même âge chronologique et révèlent des disparités entre les deux populations. Dans le groupe T21, la modalité dynamique, verbo-statique et verbo-dynamique induisent une augmentation de la longueur alors que, chez les personnes typiques de même âge chronologique, c'est la modalité haptique qui entraîne une longueur de tracé supérieure à celle dans la modalité contrôle. Le tracé de lettres faciles chez les personnes T21 présente dans la modalité verbo-statique une durée supérieure à la modalité contrôle alors que la durée de tracé des lettres faciles ne varie pas entre les deux modalités chez les personnes typiques de même âge chronologique. Concernant le nombre de pauses, la modalité dynamique induit chez les personnes T21 un nombre supérieur par rapport à la modalité contrôle alors que le nombre de pauses dans les deux modalités ne diffère pas chez les personnes typiques de même âge chronologique. Pour la durée des pauses, le tracé ne varie

pas entre la modalité verbo-statique et la modalité contrôle dans le groupe T21 alors que la modalité verbo-statique induit chez les personnes typiques un nombre de pauses supérieur à celui dans la modalité contrôle. La modalité haptique entraîne une augmentation de la pression chez les personnes T21 alors qu'elle ne diffère pas de la modalité statique dans le groupe typique de même âge chronologique. Les comparaisons ont cependant révélé quelques similarités sur l'effet des modalités entre les deux groupes. Ainsi, la modalité dynamique et la modalité verbo-dynamique induisent une augmentation de la durée des tracés par rapport à la modalité contrôle chez les personnes T21 et les personnes typiques de même âge chronologique. De même, la modalité verbo-statique entraîne un nombre de pauses supérieur à la modalité contrôle, et ce, dans les deux groupes.

De façon générale, cette étude a permis de mettre en évidence l'impact de la modalité de présentation sur l'écriture de lettres, aussi bien dans la population T21 que la population typique. Nous allons désormais discuter de l'ensemble des trois études dans le cadre de notre problématique de recherche.

Chapitre 5 - Discussion, limites et perspectives

Ce travail de thèse a porté sur l'étude de l'écriture manuscrite auprès d'enfants, adolescents et adultes porteurs de trisomie 21. Nous avons souhaité combiner deux types d'approche à savoir une analyse de la trace écrite ainsi qu'une analyse dynamique du mouvement afin de caractériser les conduites graphomotrices tant sur le plan de la qualité des tracés que sur le type de contrôle moteur engagé dans la tâche. Des comparaisons avec une population typique appariée sur l'âge de développement et l'âge chronologique nous ont permis de savoir si l'écriture d'enfants et d'adultes T21 se caractérisait par un simple retard de développement ou par des déficits spécifiques. Par ailleurs, différents facteurs reconnus dans la littérature comme ayant un impact sur l'écriture ont aussi été investigués. Nous proposons désormais de mettre en perspective l'ensemble des résultats de nos travaux au regard de la problématique de recherche posée dans cette thèse, et de la littérature dans le champ de la trisomie 21 et de l'écriture.

1. Evaluation du niveau d'écriture et de ses facteurs prédictifs

1.1. Habiletés d'écriture chez les personnes T21

Afin d'analyser l'écriture chez les personnes T21, une première étude a porté sur les productions de traces écrites chez des participants T21 comparativement à la population typique. Au travers d'une tâche de copie de texte du test BHK (Charles, Soppelsa & Albaret, 2003), l'écriture a été évaluée selon la qualité des tracés et la vitesse de transcription.

Les productions écrites des personnes T21 ont été comparées à celles d'enfants typiques de même âge de développement. D'après l'évaluation du BHK, le score global de qualité et la vitesse de transcription chez les participants T21 ne diffèrent pas significativement par rapport aux participants de même âge de développement. Plus précisément, aucune différence entre les deux groupes n'est observée sur 12 items parmi les 13 composant le score de qualité. Aussi bien chez les personnes T21 que chez les enfants apprentis scripteurs, l'écriture est inclinée et les lettres sont retouchées selon une fréquence comparable. Les mots sont proches entre eux dans les deux groupes et les

lettres troncs (*b, d, f*) sont disproportionnées par rapport aux lettres non troncs (*a, c, e*). On note également des lettres variant en hauteur et difformes avec un tracé tremblant et hésitant à une fréquence comparable entre les deux groupes. D'après l'analyse factorielle réalisée par Sage (2010), les items du test BHK peuvent être regroupés en quatre facteurs : organisation spatiale des lettres dans l'espace feuille, organisation spatiale des lettres dans le mot, forme et constance des lettres, réalisation motricité des lettres. D'après les résultats de notre étude, l'écriture des personnes T21 serait similaire à celle d'enfants typiques de même âge de développement pour les quatre facteurs caractérisant la trace écrite. Le seul critère de qualité du test BHK ne révélant pas de similarité entre ces deux groupes est celui portant sur la taille des lettres. Les personnes T21 produisent des lettres de plus grande taille que le groupe de participants de même âge de développement. Chez les personnes T21, l'écriture se réaliserait avec un geste graphomoteur reposant sur des mouvements plus amples que ceux présents dans la population typique. Mis à part cette particularité, les personnes T21 présentent des capacités dans le domaine de l'écrit en écrivant de façon correcte et lisible un certain nombre de mots ou de phrases. Ces résultats rejoignent certains travaux sur l'écriture. L'enquête de Turner et Alborz (2003) porte sur le niveau scolaire d'élèves T21 évalué par un questionnaire rempli par l'enseignant. A la fin de leur scolarité, les personnes T21 (18-19 ans) présentent un niveau d'écriture similaire à celui d'enfants typiques de 5 ans pour 75% d'entre eux correspondant notamment à l'item « écrire indépendamment le nom et le prénom ». De plus, 50% d'entre eux atteignent le niveau d'un enfant de 7 ans (« écrire une phrase simple de 4 mots ou plus) et 25 % celui d'un enfant de 11 ans (« écrire une courte lettre personnelle »). Une seconde enquête réalisée par Trenholm et Miranda (2006) souligne que les adultes T21 âgés entre 19 et 41 ans sont capables d'écrire leur prénom, des mots et des phrases simples. L'ensemble de ces résultats révèlent une certaine capacité d'écriture chez les adultes T21. Notre étude permet de compléter ce constat en soulignant que les enfants et les adolescents T21 sont également capables d'écrire plusieurs phrases simples telles que présentées dans le test BHK. Outre ces enquêtes révélant des capacités d'écriture chez les personnes T21, des études ont porté sur l'analyse des tracés. L'étude de Tsao, Velay, Barbier et Gombert (2011) visant à analyser la trace écrite chez des adultes T21 a pu montrer que leurs productions écrites, au niveau de la qualité des tracés et de la vitesse de transcription, étaient similaires à celles d'un groupe de participants de même âge de développement. L'étude de Varuzza, De Rose, Vicari et Menghini (2015) a également porté sur la trace écrite et rejoint ces résultats. Les données

issues d'une tâche de copie de texte soulignent une similarité du nombre d'erreurs, de l'orientation des lettres, de la pression exercée sur la feuille et de la taille des lettres entre des personnes T21 âgées de 7 à 31 ans et des enfants typiques de même âge de développement. Ces travaux concordent avec nos résultats. En effet, l'analyse des productions écrites chez des enfants et des adultes T21 recueillies dans notre étude met en avant une similarité des habiletés d'écriture avec une population typique de même âge de développement. Par ailleurs, notre étude a investigué plus spécifiquement la composante développementale en mesurant l'évolution des habiletés d'écriture au cours du développement dans une population T21. Il s'avère que les adultes T21 mais également les enfants T21 présentent une qualité de la trace écrite ainsi qu'une vitesse de transcription similaire à une population typique de même âge de développement. Ainsi, le développement de l'écriture se ferait de façon continue de l'enfance à l'âge adulte dans la population T21, tout comme dans la population typique. Ceci va dans le sens de l'approche développementale en faveur d'un retard de développement (Zesiger, 1969 ; 1982 ; 1998). Cette similarité développementale a également été mise en évidence par certaines recherches sur les conduites graphomotrices au travers du dessin. L'étude de Barrett et Eames (1996) portant sur l'analyse d'un dessin figuratif (dessin de bonhomme) chez des enfants T21 et des adolescents T21 révèle une séquence développementale similaire à celle observée chez des enfants typiques appariés selon le niveau de développement. Ainsi, les premiers tracés se composent d'éléments juxtaposés puis chaque partie est intégrée dans le contour de la forme globale. Certains travaux révèlent également une application similaire des règles de grammaire d'action dans le dessin géométrique dans la population avec déficience intellectuelle et notamment avec trisomie 21 (Detable & Vinter, 2003 ; Tsao & Mellier, 2005). Dans l'étude de Detable et Vinter (2003), des enfants et adolescents présentant une déficience intellectuelle, dont la trisomie 21, ont réalisé diverses tâches de tracé (libre, copie, traçage) de cercles. L'évaluation a porté sur le principe *SRP* (Start Rotation Principle) d'après lequel : si le tracé débute par un point situé entre 11h et 5h (axe virtuel selon le cadre horaire) alors la rotation s'effectuera selon un sens antihoraire (van Sommers, 1984). Dans chaque tranche d'âge, les pourcentages d'enfants avec déficience intellectuelle appliquant le principe *SRP* sont similaires aux proportions d'enfants typiques. Les travaux de Tsao et Mellier (2005) auprès d'enfants et adultes T21 rejoignent ces résultats. Dans une tâche de tracé de cercles de tailles différentes, les personnes T21 âgées de 8 à 22 ans appliquent les règles syntaxiques à l'image des enfants typiques âgés de même

âge de développement. Ces différentes composantes de la graphomotricité sont en partie à l'origine de l'apprentissage de l'écriture dans la population typique (Lurçat, 1974 ; 1980). En effet, afin de favoriser la mise en place de l'écriture manuscrite, il faut maîtriser le tracé de formes élémentaires (Zesiger, 1995; Smith-Engelsman, Niemeijer & van Galen, 2001). Les travaux présentés ici et portant sur la trace écrite, le dessin figuratif et le dessin géométrique soulignent la similarité de développement entre la population T21 et la population typique. En accord avec l'hypothèse d'une séquence et d'une structure similaires avancée par Zigler et collaborateurs (1969 ; 1982 ; 1998), notre étude indique que les capacités d'écriture d'enfants, d'adolescents et d'adultes T21 se caractérisent par un simple retard de développement. L'acquisition de l'écriture serait ralentie et continue de l'enfance à l'âge adulte.

Nous avons également comparé la trace écrite des personnes T21 à celle de personnes typiques de même âge chronologique. Les résultats ont révélé chez les participants T21 un score global de qualité et une vitesse de transcription inférieurs au groupe typique. Plus précisément, ces difficultés s'observent sur 8 items parmi les 13 composant le score de qualité. Concernant les items d'organisation spatiale des lettres, l'un des quatre facteurs révélés par l'étude de Sage (2010), le tracé est altéré chez les participants T21 avec une écriture non horizontale et des lettres plus souvent retouchées. Pour l'organisation spatiale des lettres dans le mot, les mots sont plus serrés et des erreurs de proportion entre les lettres troncs (*b, d, f*) et les lettres non-troncs (*a, c, e*) sont plus nombreuses chez les personnes T21. Des difficultés sont également rapportées pour la forme et la constance des lettres. Chez les personnes T21, les lettres sont déformées et la hauteur des lettres troncs varie significativement plus que celle des personnes typiques de même âge chronologique. Concernant la réalisation motrice des lettres, les participants T21 ont un tracé plus incertain et tremblant et des lettres de hauteur supérieure comparativement aux personnes typiques. L'ensemble des caractéristiques de la trace écrite est affectée chez les personnes T21 comparativement à la population typique de même âge chronologique. Nos résultats plaident ainsi en faveur d'un retard de développement dans l'acquisition de l'écriture chez les personnes T21, enfants, adolescents et adultes, et rejoignent en cela les rares travaux dans ce domaine (Tsao et al., 2011, 2012 ; Varuzza et al., 2015).

1.2. Les facteurs prédictifs de la qualité et de la vitesse d'écriture

La mise en place de l'écriture dépend d'une pluralité de processus (Bara & Gentaz, 2010 ; Vinter & Zesiger, 2007). Les difficultés d'écriture chez les personnes T21 pourraient s'expliquer par une diversité de facteurs impactant sur le développement de l'écriture. Certains facteurs individuels ont été mis en évidence chez l'enfant typique dans la littérature parmi l'âge chronologique, l'âge de développement, le genre, la tenue du stylo, les performances de coordination de la motricité fine, d'intégration perceptivo-motrice, de contrôle visuo-moteur et d'attention visuelle.

Notre étude a testé l'effet de l'âge de développement et de l'âge chronologique sur la trace écrite afin de pouvoir préciser l'évolution des habiletés d'écriture au cours du développement dans la population T21. La qualité et la vitesse d'écriture évaluées dans le test BHK s'améliorent avec l'âge de développement chez les personnes T21 tout comme chez les enfants typiques de même âge de développement. Ce résultat concorde avec l'enquête de Turner, Alborz et Gayle (2008) portant sur les facteurs prédictifs des compétences scolaires chez l'élève T21 en lecture, écriture et calcul. En effet, ces données mettent en évidence le rôle de l'âge de développement sur le niveau scolaire en particulier chez l'enfant et l'adolescent T21. Concernant le rôle de l'âge chronologique, nos résultats soulignent une amélioration des habiletés d'écriture en termes de qualité et de vitesse chez les participants T21 âgés de 10 à 40 ans. A nouveau, ce constat se retrouve dans l'étude de Turner, Alborz et Gayle (2008). En effet, le niveau scolaire, dont celui en écriture, s'améliore avec l'âge chronologique. Cet effet de l'âge chronologique sur les habiletés graphomotrices a aussi été mis en évidence dans des travaux sur le dessin. Les études de Detable et Vinter (2003) et Tsao et Mellier (2005) ont pu montrer que l'application des règles syntaxiques, ou encore l'organisation spatiale des tracés ainsi que la précision du contrôle du geste étaient sensibles à l'âge chronologique. Les auteurs concluent ainsi à l'existence de capacités préservées dans le domaine graphomoteur et à leurs évolutions possibles au cours du développement. Le nombre d'années d'expositions répétées à des tâches d'écriture pourrait jouer un rôle sur l'apprentissage et la maîtrise des mouvements graphomoteurs impliqués dans l'écriture manuscrite.

Parmi les facteurs individuels influençant l'écriture, le genre présente également un impact sur les habiletés d'écriture des personnes T21. D'après les régressions linéaires

simples, les filles auraient une écriture de meilleure qualité, et ce, dans le groupe T21 et le groupe typique de même âge de développement. Concernant la vitesse d'écriture, les filles écrivent plus rapidement que les garçons dans le groupe T21 et dans les deux groupes typiques. Ce résultat concorde avec des précédentes études sur le genre comme facteur prédicteur de la qualité d'écriture dans la population typique (Hackel, Wolfe, Bang & Canfield, 1992 ; Sage, 2010 ; Schneider et al., 2006). Ce résultat souligne à nouveau une similarité entre les personnes T21 et la population typique concernant les facteurs individuels impactant sur l'écriture.

Le type de tenue du stylo a été évalué et met en avant, cette fois-ci, des similarités entre la population T21 et celle de même âge chronologique. La majorité des personnes T21 (67%) et des personnes typiques âgées de même âge chronologique (71%) présente une position mature correspondant à un maintien du stylo par la pointe des doigts et par le pouce (trépied dynamique) favorisant des mouvements des doigts plutôt que de la main ou de l'avant-bras. Dans ces deux groupes, les participants ayant adopté une position mature des doigts présentent une écriture rapide et de meilleure qualité que ceux présentant une position intermédiaire (29-33%), position principalement liée aux mouvements de l'avant-bras. Le lien entre les capacités du geste graphomoteur et la tenue du stylo avait déjà été mis en évidence dans la population typique. L'étude de Stevens (2008) a porté sur l'effet de la tenue du stylo sur l'endurance d'écriture et la fatigue ressentie par l'adulte. Les résultats soulignent une meilleure endurance grâce à la tenue en trépied dynamique par rapport à une tenue latérale. Concernant le groupe d'enfants de même âge de développement, on observe qu'ils tiennent très majoritairement le stylo en position intermédiaire (87% du groupe). Peu de variabilité interindividuelle est alors mise en évidence. Certaines disparités sur les comportements graphomoteurs existent cependant entre les personnes T21 et les enfants typiques de même âge de développement. Le niveau de développement cognitif ne suffirait pas à lui seul à expliquer les habiletés d'écriture chez les personnes T21. Les années d'apprentissage permettraient d'adopter une tenue du stylo mature aussi bien dans la population typique que dans la population T21. Ceci peut prendre place au travers de tâches impliquant la prise en main d'un stylo, tels que des tâches de tracés, de coloriage, de dessin ou d'écriture, activités classiquement rencontrées dans le domaine scolaire et possiblement dans le cadre professionnel. Grâce à l'expérience de vie et la maturation du système moteur,

les personnes T21 ont pu adopter une tenue du stylo propice à l'amélioration de la qualité et de la vitesse d'écriture.

Le traitement perceptivo-moteur a aussi été mesuré afin de rendre compte des facteurs prédicteurs du niveau d'écriture dans nos deux populations. Les régressions linéaires multiples ont permis de mettre en évidence une importante contribution des capacités perceptivo-motrices dans l'écriture chez les personnes T21. La coordination de la motricité fine évaluée par l'imitation de la position des mains (NEPSY I ; Korkman, Kirk & Kemp, 2003) explique à elle seule 70% de la variance du score de qualité obtenu au BHK. Les régressions linéaires multiples dans le groupe typique de même âge de développement révèlent par contre l'existence d'un ensemble facteurs prédicteurs. En effet, 87% de la variance du score de qualité s'expliqueraient par l'âge, le genre, la préhension, la coordination de la motricité fine, le contrôle visuo-moteur et l'attention visuelle. Dans le groupe typique de même âge chronologique, le genre et la préhension du stylo expliquent 28% de la variance de la qualité. Bien que les résultats aient mis en évidence un niveau de coordination des doigts similaire entre le groupe T21 et le groupe typique de même âge de développement, cette capacité de déliement des doigts jouerait un rôle majeur dans les habiletés d'écriture chez les personnes T21. Dans la littérature, il a été relevé que les personnes T21 présentaient généralement des mains courtes avec une proportion atypique entre la longueur des doigts et de la paume (Savelsbergh, van der Kamp & Davis, 2001) induisant chez l'enfant T21 une prise plus fréquemment palmaire lors de la saisie d'objet par rapport à l'enfant typique (Charlton, Ihsen & Lavelle, 2000 ; Kearney & Gentile, 2003). D'autre part, l'étude de Jover, Ayoun, Berton et Carlier (2010) a porté sur le type de saisie adoptée par des enfants et adolescents T21 âgés de 4 à 18 ans. Les résultats ont montré qu'en adaptant la taille de l'objet à saisir par rapport à la taille de la main, la préférence pour une saisie palmaire disparaissait. L'ensemble de ces résultats soulignent l'importance de la prise en compte de la taille de la main des personnes T21 dans l'étude des actions de motricité fine. Dans la littérature, le lien entre dextérité (manuelle ou digitale) et performances d'écriture a été mis en évidence chez l'enfant typique par de nombreuses études évaluant la qualité (Cornhill & Case-Smith, 1996 ; Kaiser, Albaret & Doudin, 2009 ; Smits-Engelsman, Niemeijer & van Galen, 2001 ; van Hoorn, Maathius, Peters & Hadders-Algra, 2010 ; Volman et al., 2006 ; Weintraub & Graham, 2000) et la vitesse d'écriture (Feder et al., 2005). Il s'avère que chez les enfants et adultes T21 le niveau de coordination de la

motricité fine joue aussi un rôle, et ce, de façon prépondérante. En effet, l'implication des mouvements fins, précis et dissociés des doigts jouerait un rôle fort sur les capacités à exécuter le geste graphomoteur mobilisées dans l'écriture manuscrite. Notre étude souligne également l'implication des capacités d'intégration visuo-motrice nécessitant un contrôle visuel du mouvement et une anticipation des changements de direction. Ainsi, chez les personnes T21, le niveau de contrôle visuo-moteur explique, avec l'âge de développement et la coordination de la motricité fine, 35% de la variance de la vitesse d'écriture. Par ailleurs, dans la population typique de même âge de développement, la vitesse s'explique par le contrôle visuo-moteur accompagné de l'âge, du genre et de la préhension (90% de la variance). Chez les personnes typiques de même âge chronologique ce sont l'âge, le genre, la préhension et l'attention visuelle qui prédisent 53% de la variance de la vitesse. A nouveau, on constate le poids particulièrement important de la motricité fine comme facteur explicatif des habiletés d'écriture dans la population T21. L'étude de Tseng et Chow (2000) met en évidence l'importance de l'intégration visuo-motrice, en particulier chez les scripteurs lents. Dans le domaine de la psychomotricité, Soppelsa et Albaret (2004) présentent différentes tâches de rééducation de la motricité manuelle tels que la mobilisation coordonnée et dissociée des doigts (exercice des marches) ou la manipulation de matériel (balle de ping-pong, mikado, pliage, découpage, jeux de ficelles, de nœuds, etc...). Ce protocole proposé par Albaret et Soppelsa (1999) a été évalué chez l'enfant typique âgé de 9 ans à l'aide de l'échelle du développement psychomoteur de Lincoln-Oseretesky. Après avoir appliqué le programme de rééducation, le score standard des participants s'est amélioré, en particulier dans les domaines du contrôle-précision au niveau manuel, de la vitesse de mouvement doigt-poignet, des coordinations globales et des activités manuelles. Compte tenu de la contribution importante de la coordination de la motricité fine et de l'intégration visuo-motrice sur l'écriture des participants T21, on peut supposer qu'un entraînement ciblé sur la motricité manuelle, à l'instar de celui d'Albaret et Soppelsa (1999), soit particulièrement pertinent pour améliorer la qualité des tracés et la vitesse de transcription d'enfants et adultes T21. Ces suggestions rejoignent celles des classiques prises en charge proposées aux familles d'enfants T21. Concernant la rééducation des enfants T21, de Fréminville, Nivelon et Touraine (2007) préconisent dès l'âge de 6 mois un accompagnement en kinésithérapie et psychomotricité. L'intervention porte alors sur la motricité globale mais également sur la motricité fine (Escoffier, 1999 ; Noack, 1999). Elle consiste en des exercices moteurs en vue d'améliorer le tonus musculaire, la posture,

l'équilibration et les modes de locomotion. De plus, l'enfant T21 peut être amené à la manipulation d'objets de formes, tailles et poids variés afin d'améliorer la précision du geste qui sera sollicitée ultérieurement dans la vie quotidienne (enfiler des vêtements, attacher des boutons, utiliser une pince à linge, ouvrir et fermer un cartable, tourner une clé). Quelques études ont en effet testé l'apport de prise en charge précoce sur le développement moteur de jeunes enfants T21 (pour une revue : Fidler, 2005) mais, à notre connaissance, aucune n'a mesuré l'impact d'une prise en charge sur l'acquisition de l'écriture. Cette première étude invite à poursuivre de tels travaux notamment chez l'enfant T21 d'âge scolaire et chez l'adulte T21 afin de pouvoir mesurer plus finement l'apport d'une telle rééducation sur les conduites graphomotrices.

Cette première étude confirme l'existence de compétences relativement préservées au niveau de la fonction motrice de l'écriture et ne plaident pas en faveur d'un déficit spécifique. Nos résultats viennent ainsi conforter l'hypothèse de séquence et de structure similaires (Zigler, 1969 ; 1982 ; 1998). Nous avons souhaité compléter ce premier travail en analysant la dynamique des tracés afin de mieux comprendre les processus cognitifs en jeu dans une tâche d'écriture dans la population T21.

2. Analyse de la dynamique du tracé de lettres

Le retard de développement observé dans l'acquisition de l'écrit est à analyser en fonction des processus cognitifs en jeu, et notamment du type de contrôle impliqué dans une tâche d'écriture. Afin de tenter d'y répondre, une seconde étude a porté sur la dynamique du tracé de lettres isolées à l'aide d'une tablette graphique.

Le recours à une tablette graphique nous a permis de récolter un ensemble de mesures permettant l'analyse du mouvement afin de pouvoir préciser le type de contrôle (rétroactif ou proactif) privilégié par les personnes T21. Pour la grande majorité des indices (nombre de tracés, longueur d'une lettre, durée des tracés et des levers, vitesse de tracé, nombre et durée des pauses), les habiletés d'écriture dans le groupe T21 sont similaires à celles des enfants typiques de même âge de développement. Toutes lettres confondues, les personnes T21 réalisent autant de tracés que les enfants typiques de même âge de développement. Cette décomposition de la lettre en plusieurs segments, typiquement présente chez l'enfant apprenti scripteur, relèverait de l'utilisation massive des

informations visuelles et tactilo-kinesthésiques impliquant une vérification constante du tracé afin de corriger sa trajectoire (Mayor, Deonna & Zesiger, 2000). Par ailleurs, les analyses montrent que le tracé d'une lettre chez les personnes T21 dure aussi longtemps que celui des enfants typiques. Dans les deux groupes, le tracé est lent avec des pauses plus nombreuses et durant plus longtemps que le groupe typique de même âge chronologique. Chez les personnes T21 et les enfants typiques, le fait de décomposer une lettre en plusieurs tracés ralentirait le geste graphomoteur dû à la présence de plusieurs couples d'accélération/décélération correspondant à chaque segment tracé. D'après Mayor, Deonna et Zesiger (2000), l'acquisition de l'écriture se définit par le passage d'un contrôle rétroactif à un contrôle proactif. Avant l'âge de 10 ans, l'enfant apprenti scripteur exécute son tracé sous un contrôle rétroactif en corrigeant son tracé en cours d'exécution à l'aide des informations visuelles et tactilo-kinesthésiques. Au début de l'apprentissage, l'écriture se compose alors de grandes lettres réalisées en plusieurs segments et par un tracé lent, irrégulier avec de nombreuses pauses. On retrouve ces caractéristiques chez les personnes T21 et les enfants typiques de même âge de développement. Ceci rejoint les résultats de l'étude de Tsao, Velay, Barbier et Gombert (2012) portant sur la production de lettres isolées et du mot *papa* sur une tablette graphique. Les résultats ont mis en évidence une similarité entre des adultes T21 (âgés en moyenne de 24 ans) et des enfants typiques (6 ans) pour le nombre de tracés, la durée des tracés, le nombre et la durée des pauses. Chez les personnes T21, tout comme chez l'enfant typique de même âge de développement, le geste graphomoteur serait soumis à un contrôle rétroactif en cours d'exécution induisant des mouvements segmentés, lents et saccadés.

Afin de s'assurer de la stabilité des patterns observés, nous avons testé l'effet du niveau de complexité de la tâche graphique ainsi que du nombre d'essais. Les lettres faciles (*a, e, s*) et difficiles (*b, f, g*) ont été choisies selon leur complexité motrice et leur fréquence dans la langue française (d'après Jolly, Huron & Gentaz, 2014 ; New, Pallier, Ferrand & Matos, 2001). Pour une grande majorité des indices mesurés, les analyses de l'effet de la complexité de la lettre ne révèlent pas de différence entre les lettres faciles et difficiles. Les résultats diffèrent selon la complexité uniquement pour le nombre de tracés et la durée des levers. Pour les lettres faciles, le groupe T21 trace chaque graphème avec le même nombre de segments et les levers durent aussi longtemps que ceux récoltés auprès du groupe de même âge de développement. Cependant, pour les lettres difficiles, la similarité du nombre

de tracés et de la durée des levers se retrouve entre le groupe T21 et le groupe de même âge chronologique, tous deux présentant moins de segments que le groupe d'enfants typiques. Les enfants typiques de même âge de développement que les participants T21 sont âgés entre 3,5 et 9 ans, on peut donc supposer que les plus jeunes d'entre eux n'ont pas encore eu l'opportunité de se familiariser avec les lettres dites difficiles. A l'inverse, les personnes T21 âgées de 10 à 40 ans ont pu rencontrer plus fréquemment les lettres difficiles, par le biais d'exercice répété d'écriture de lettres ou de mots, ce qui pourrait expliquer leur avantage par rapport aux jeunes enfants typiques. L'expérience de vie semble ainsi influencer la mise en place de l'écriture chez les personnes T21. La variabilité intraindividuelle a aussi été mesurée afin de savoir si elle ne pouvait pas être un marqueur du geste graphomoteur à l'instar de ce qui a pu être observé récemment chez des populations avec TDA/H, dyslexie ou dysgraphie (Borella, Chicherio, Re, Sensini & Cornoldi, 2011 ; Danna, Paz-Villagràn & Velay, 2013). L'étude de Borella et collaborateurs (2011) a porté sur la variation intraindividuelle chez les enfants avec trouble déficit de l'attention avec/sans hyperactivité et des enfants dyslexiques comparativement à des enfants typiques. Dans une tâche d'écriture de séries des lettres *l* et *e*, les deux groupes présentant un trouble ont un coefficient individuel de variation (ICV = rapport entre l'écart-type individuel et la moyenne individuelle) supérieur au groupe typique. Une autre étude s'est intéressée aux caractéristiques dynamiques de l'écriture chez des enfants dysgraphiques (Danna, Paz-Villagràn & Velay, 2013). Dans une tâche d'écriture du mot *lapin*, les analyses révèlent un tracé présentant des fluctuations atypiques de la vitesse chez l'enfant dysgraphique par rapport à l'enfant et l'adulte normoscripteurs. Ce bruit neuromoteur plus ou moins intense s'ajouterait aux instructions générées par le système nerveux central. L'ensemble de ces travaux révèle une variabilité intraindividuelle élevée du geste graphomoteur comme un marqueur de l'écriture au sein de différents troubles (TDA/H, dyslexie, dysgraphie). Afin d'évaluer la variabilité intraindividuelle auprès de notre échantillon, nous avons basé nos analyses sur le calcul d'un coefficient individuel de variation, à l'instar de Borella et collaborateurs (2011). Les résultats recueillis indiquent que la variabilité intraindividuelle du groupe T21 est comparable à celle d'enfants typiques de même âge de développement. L'écriture d'une lettre varierait entre les essais selon un niveau comparable entre les deux groupes pour le nombre de segments composant une lettre, la longueur du tracé, la durée des levers, le nombre et de la durée des pauses ainsi que la pression. Concernant les comparaisons sur l'âge chronologique, il s'avère que les personnes T21 présentent une plus

grande variabilité intraindividuelle que les personnes typiques pour le nombre de segments, la longueur, la durée des tracés, des levers, la vitesse et la pression. D'après les résultats de notre étude, le niveau d'écriture chez les personnes T21 s'apparentant à celui d'enfants typiques pourrait s'expliquer en partie par une variabilité intraindividuelle élevée. Ces variations, observées pour le nombre de segments, la longueur des tracés, la durée des levers et la pression, rendraient alors peu stable le geste graphomoteur chez les personnes T21, à l'instar des enfants typiques apprentis scripteurs. Une particularité est mise cependant en évidence pour la vitesse et la durée des tracés. Pour ces indices, les personnes T21 présentent une variabilité intraindividuelle inférieure aux enfants typiques de même âge de développement. C'est au cours des années d'apprentissage que le bruit neuromoteur tend à diminuer permettant un meilleur ajustement du geste graphomoteur. Il est possible que l'expérience de vie, et notamment l'exercice répété de tâches graphiques, induise une meilleure stabilité du geste graphomoteur notamment pour la temporalité et la cinématique du tracé des participants T21 par rapport aux enfants typiques. Nos données ne permettent pas ainsi de présenter la variabilité intraindividuelle comme un marqueur de l'acquisition de l'écriture chez les personnes T21. D'autres mesures telles que celles suggérées par Danna, Paz-Villagràn et Velay (2013) seraient à même de rendre compte de l'effet de la variabilité intraindividuelle sur les habiletés d'écriture chez les personnes T21.

En définitive, les résultats de cette seconde étude ne mettent pas en avant de déficit spécifique sur le plan de la programmation et de l'exécution de la production écrite, mais pointent un délai important dans les étapes d'acquisition de l'écriture. Les données axées sur l'analyse du mouvement viennent ainsi conforter les conclusions de notre première étude sur l'analyse de la trace écrite.

3. Impact des modalités de présentation sur la dynamique du tracé de lettres

Comme nous avons pu le voir dans le chapitre 2, de nombreuses pratiques d'enseignement ont été mises en place et évaluées dans l'apprentissage de l'écriture chez l'enfant normoscripteur. Cette dernière étude s'est intéressée à l'impact des modalités de présentation de lettres sur l'analyse des mouvements d'écriture. Ainsi, l'effet de quatre modalités de présentation du tracé d'une lettre a été testé auprès des personnes T21 comparativement à une modalité contrôle définie par une présentation statique de chaque lettre affichée à l'écran d'un ordinateur sans information explicite sur le point de départ ni

sur la trajectoire des tracés. Rappelons que la modalité dynamique a consisté en la visualisation graduelle du tracé d'une lettre à vitesse constante, la modalité verbo-statique décomposait le mouvement selon des consignes orales décrivant la trajectoire des tracés associées à une présentation visuelle de la lettre, la modalité verbo-dynamique combinait les deux présentations visuelles et verbales de façon synchrone et enfin, dans la modalité haptique, chaque lettre était représentée à l'aide de mousse en relief dont le contour était suivi avec le doigt.

Concernant la trajectoire du tracé, la modalité verbo-dynamique se démarque des autres modalités présentées dans notre étude. En effet, contrairement aux autres modalités, la présentation à la fois visuelle et verbale entraîne chez les participants T21 une amélioration de l'exécution graphique de la trajectoire concernant le sens de rotation mais pas le point de départ. A l'inverse, pour les enfants typiques de même âge de développement, on note une amélioration du respect du point de départ dans les modalités visuelle et verbale (modalité dynamique et verbo-dynamique) mais pas du sens de rotation. L'étude de Hayes (1982) a porté sur la présentation visuelle de lettre accompagnée d'instructions verbales auprès d'enfants âgés de 5 à 6 ans. La reproduction de pseudo-lettres était alors évaluée selon l'exactitude de la forme tracée. Comparativement à des enfants ayant suivi un entraînement soit visuel soit verbal, les enfants s'étant entraînés à la copie de pseudo-lettres grâce à la présentation visuo-verbale ont présenté de meilleures performances. L'auteur suggère que l'ajout de composantes perceptives lors de l'apprentissage permet une meilleure reproduction de la forme. En effet, la qualité du tracé de lettres dépendrait de la qualité de la représentation mentale de la lettre dans le système moteur (Jolly, Palluel-Germain & Gentaz, 2013). La combinaison multimodale permettrait une meilleure représentation interne de la lettre chez l'enfant typique. Les personnes T21 ont pu bénéficier de cette présentation multimodale de la lettre afin d'améliorer le respect de la trajectoire des tracés.

L'analyse d'indices temporels révèle un effet de la présentation de la lettre dans le groupe T21. On note une durée des tracés supérieure dans les quatre modalités de présentation comparativement à la modalité contrôle. De plus, la modalité dynamique, verbo-statique et verbo-dynamique engendrent une diminution de la durée des pauses ainsi que du nombre de pauses dans les deux modalités verbales. Des résultats relativement similaires s'observent dans le groupe typique de même âge de développement. En effet, on observe

une durée globale du mouvement plus importante dans les modalités dynamique, verbo-statique et verbo-dynamique, associée là encore à une augmentation du nombre de pauses et de la durée des pauses pour la modalité dynamique. Des résultats concordant ont été obtenus dans l'étude de Joly et Gentaz (2013) auprès d'enfants apprentis scripteurs. La tâche consistait en un visionnage d'une vidéo présentant le tracé virtuel de plusieurs lettres puis en la copie des lettres à partir d'un point de départ prédéfini sur une tablette tactile. Les résultats indiquent une augmentation du nombre de pics de vitesse avec une diminution de la vitesse chez les enfants ayant réalisé cette tâche. D'après les auteurs, la diminution de la vitesse s'expliquerait par le développement typique de l'écriture révélant une augmentation du tracé principalement entre 8 et 10 ans. Dans le cadre de notre étude, un allongement de la durée des tracés associé à une baisse du nombre et de la durée des pauses pourrait être interprété comme un gain de fluidité chez les personnes T21. Le geste graphomoteur serait ainsi plus fluide grâce notamment au ralentissement du tracé.

Les données recueillies sur la taille des tracés indiquent pour les participants T21 une augmentation de la taille des lettres pour les modalités dynamique, verbo-statique et verbo-dynamique par rapport à la modalité contrôle. Ces résultats se retrouvent chez les enfants typiques notamment pour les modalités verbo-statique et verbo-dynamique. L'étude de Wuang et collaborateurs (2008) précise que plus la tâche motrice est précise plus les mouvements sont difficiles et donc altérées chez les personnes présentant une déficience intellectuelle. Le geste graphomoteur impliqué dans l'écriture de grandes lettres nécessite moins de précision que celui dans le tracé de petites lettres. C'est pourquoi on observe chez l'enfant typique une diminution de la taille des lettres au cours de l'apprentissage de l'écriture (Zesiger, 2003). La présentation d'un modèle de lettre accompagnée d'informations visuelles et/ou verbales sur la trajectoire amènerait alors les personnes T21 à ralentir le tracé et à élargir leur mouvement permettant une écriture plus fluide. Ainsi, l'amélioration de la fluidité, caractérisée par une baisse du nombre et de la durée des pauses, pourrait être liée au tracé de grandes lettres.

Concernant la segmentation de l'écriture, le groupe T21 présente dans la modalité dynamique et la modalité verbo-statique un nombre de tracés supérieur à celui de la modalité contrôle. Pour les deux groupes typiques, le nombre de tracés ne varie entre les modalités. Dans la modalité dynamique, la présentation visuelle du tracé engendrerait chez les personnes T21 une décomposition du geste graphomoteur en plusieurs segments qui

vont alors aider à contrôler le bon déroulement des tracés. Dans la modalité verbo-statique, l'information émise est structurée sous forme de plusieurs phrases. Le tracé de lettres pourrait être alors décomposé en fonction des différents contenus verbaux chez les personnes T21. Cette segmentation du tracé dans les deux modalités rejoint nos précédents résultats sur la prédominance d'un contrôle rétroactif du geste graphomoteur en cours d'exécution (Zesiger, 2003) chez les personnes T21. Dans le cadre d'un tracé de lettres isolées selon un modèle, la tâche incite les participants à réutiliser de façon intensive les informations émises au cours du tracé afin de reproduire au mieux le modèle en respectant sa forme globale, sa trajectoire ou sa vitesse.

La modalité haptique varie peu de la modalité contrôle comparativement aux autres modalités, notamment dans le groupe T21 et le groupe typique de même âge chronologique. Dans le groupe T21, la modalité haptique induit une augmentation de la durée des tracés et un ralentissement du tracé des lettres faciles ainsi qu'une augmentation de la pression chez les participants T21. Dans le groupe typique de même âge chronologique, seule la longueur du tracé est augmentée. Dans le groupe typique de même âge de développement, aucun indice ne diffère entre la modalité haptique et la modalité contrôle. Le ralentissement du tracé et l'augmentation de la pression induits par la modalité haptique chez les personnes T21 pourrait s'expliquer par leurs difficultés rencontrées au niveau de la perception tactile (Brandt, 1996 ; Labat, Ecalle & Magnan, 2013 ; Vinter et al., 2008). Cependant, les résultats révélant un effet de la modalité haptique concernent peu d'indices, aussi bien dans le groupe T21 que dans les groupes typiques. Les informations issues de la perception haptique ne seraient pas autant traitées que les informations visuelles portant sur la forme globale de la lettre. Après avoir manipulé la lettre en mousse, les participants de la population T21 et de la population typique ont retranscrit la lettre d'après ce qu'ils avaient vu et non ce qu'ils avaient touché. La modalité haptique mériterait à nouveau d'être évaluée au travers d'une tâche de perception tactile mais sans contrôle visuel à l'instar des études chez l'enfant typique (Bara & Gentaz, 2011 ; Hillairet de Boisferon et collaborateurs, 2007).

Cette troisième étude met en évidence un effet des différentes modalités de présentation sur l'écriture de lettres dans la population T21 mais également dans la population typique. Nos résultats vont en faveur d'une présentation visuelle et verbale des lettres pour induire une amélioration du tracé en termes de sens de rotation de la trajectoire et de fluidité chez les personnes T21.

4. Limites des études et perspectives de recherche

En conclusion, l'écriture manuscrite d'enfants et d'adultes T21 se caractérise davantage par un simple retard de développement que par un déficit spécifique. Ces données vont dans le sens de l'hypothèse de séquence et de structure similaires développée par Zigler et collaborateurs (1969 ; 1982 ; 1998). Le geste graphomoteur des personnes T21, observé ici à partir d'analyses de la trace écrite et de l'analyse dynamique du mouvement, présente en effet des caractéristiques communes avec le geste graphomoteur du groupe contrôle d'enfants typiques de même âge de développement. Dans l'ensemble, les lettres produites sont lisibles et correctement formées. Les productions écrites des participants T21, obtenues au test du BHK (Charles, Soppelsa & Albaret, 2003), sont relativement similaires à celle du groupe contrôle de même âge de développement sur le plan de la qualité des lettres produites, de l'agencement spatial des tracés et de la vitesse de production. L'analyse dynamique des tracés met en avant là encore des similitudes entre ces deux populations. La similarité des indices spatio-temporels entre les personnes T21 et les enfants typiques laisse ainsi supposer la prédominance d'un contrôle rétroactif de l'écriture chez les enfants et les adultes T21. Les données recueillies ne varient pas selon le degré de difficulté des lettres tracées, ce mode de contrôle semble stable chez la population T21, tout comme chez le groupe contrôle de même âge de développement. Les analyses sur la variabilité intraindividuelle ont à nouveau mis en évidence certaines similarités entre ces deux populations. La variabilité intraindividuelle ne peut être avancée comme marqueur de l'écriture chez les personnes T21, à l'instar de ce qui a pu être observé dans d'autres populations avec troubles neurodéveloppementaux. L'étude des facteurs prédictifs de l'écriture met en avant le rôle majeur de la coordination de la motricité fine et du contrôle visuo-moteur sur la qualité et la vitesse des tracés chez les participants T21. D'autre part, cette recherche met en évidence l'effet bénéfique d'une présentation visuelle et verbale de la lettre sur la fluidité et la trajectoire des tracés.

Nos études ont porté sur un groupe composé de 24 participants T21 âgés de 10 à 40 ans. Il serait intéressant de poursuivre ces travaux à partir d'une cohorte de taille plus importante. Ceci permettrait d'augmenter l'échantillon de participants T21 et de les répartir de façon plus homogène selon l'empan d'âge. Recruter davantage de participants permettrait également d'étendre ce travail à un facteur contextuel autre que les modalités de présentation de la lettre. Par exemple, en comparant les habiletés d'écriture de

participants T21 dont le type de scolarisation varie (milieu classique ou spécialisé), nous pourrions évaluer l'effet de la prise en charge sur les conduites d'écriture. De plus, ceci inviterait à adapter les préconisations pour l'apprentissage de l'écriture selon la prise en charge. A l'instar des travaux de Tsao et collaborateurs (Tsao & Kinderlberger, 2009 ; Tsao, Kinderlberger, de Fréminville, Touraine & Bussy, 2015), les différences interindividuelles à l'aide d'une analyse en clusters pourraient être étudiées aussi dans le domaine de l'écriture. Une telle approche pourrait mettre en relation les différences entre individus T21 avec un ensemble de facteurs individuels (tels que ceux présentés dans notre étude) et de facteurs contextuels (type de prise en charge ou type d'enseignement) mais celle-ci nécessite également une grande cohorte de participants.

La composante graphomotrice de l'écriture a été étudiée à l'aide des six lettres *a*, *e*, *s* et *b*, *f*, *g* choisies selon leur complexité motrice et leur fréquence dans la langue française (d'après Jolly, Huron & Gentaz, 2014 ; New, Pallier, Ferrand & Matos, 2001). Afin de généraliser les caractéristiques de l'écriture des personnes T21, des travaux pourraient s'étendre à l'étude d'autres lettres de l'alphabet telles que celles réalisées classiquement en deux tracés (*i*, *j*, *t*) ou celles jugées dans notre étude comme trop peu étudiées chez l'enfant apprenti scripteur (*x*, *y*, *z*). Ceci permettrait d'introduire de nouveaux degrés de complexité pour évaluer la stabilité du geste selon les levers de stylo nécessaires au tracé ou les changements de direction composant la lettre. De plus, il serait intéressant d'analyser la cinématique des mouvements impliqués dans le tracé de pseudo-lettres. En écartant la composante linguistique de la lettre, le tracé de pseudo-lettres informerait sur la composante strictement motrice. Ce type de stimulus permettrait d'évaluer l'effet des modalités de présentation sur l'apprentissage d'une nouvelle forme et mieux contrôler le niveau de complexité motrice en faisant varier les changements de direction présents dans la pseudo-lettre. Notre étude s'est initialement restreinte au tracé de lettres car nous souhaitons mettre en place des tâches similaires chez tous les participants. Effectivement, une partie des tâches sur la tablette graphique n'a pu être réalisée par les plus jeunes enfants scolarisés en maternelle. Il serait alors possible d'élargir l'étude de l'écriture au tracé graphique d'une série de boucles pour s'adapter aux plus jeunes enfants ou au tracé de mots et pseudo-mots (en se limitant à des personnes T21 dont l'âge de développement dépasse 5 ans 6 mois). Dans les études 2 et 3, la fluidité des tracés de lettres a été évaluée par le nombre et la durée des pauses. D'après Mayor, Deonna et Zesiger (2000), la mesure des couples

d'accélération et décélération représente également un indice de fluidité de l'écriture. Ces pics de vitesse pouvant être dus à la présence de variations de courbure dans la lettre. C'est pourquoi Danna, Paz-Villagràn et Velay (2013) préconisent d'enlever ces fluctuations typiques de la vitesse (observés à 5 Hz) afin de rendre compte de la variation atypique de la vitesse du tracé. Par l'apport de la mesure de ces pics de vitesse, des précisions pourront être apportées sur la fluidité de l'écriture chez les personnes T21. L'influence de différentes modalités de présentation des lettres sur le geste graphomoteur a été étudiée dans l'étude 3. Suite à la présentation du modèle, le participant devait tracer immédiatement la lettre d'après ce qu'il avait perçu. A partir de nos résultats suggérant chez les personnes T21 une amélioration de la trajectoire et de la fluidité du tracé à l'aide d'informations visuelles et verbales, nous pourrions désormais tester l'effet sur l'écriture d'un entraînement régulier mettant l'accent sur l'explicitation verbale et visuelle des tracés de lettres. L'apprentissage pourrait aussi être évalué par l'impact de cet entraînement sur le tracé de pseudo-lettres. En effet, chez l'enfant typique, les travaux sur l'étude de l'instruction de l'écriture ont mis en évidence un effet bénéfique de séances régulières (hebdomadaires et sur plusieurs semaines ou mois) sur la trace écrite et le geste graphomoteur (Berninger et al., 1997 ; 2015 ; Hayes, 1982 ; Hillairet de Boisferon, Bara, Gentaz & Colé, 2007 ; Jolly & Gentaz, 2013 ; Jones & Christensen, 1999 ; Karlsdottir, 1996). Ceci pourrait être réalisé à l'aide d'un entraînement hebdomadaire comprenant différentes tâches d'écriture centrées sur la visualisation du tracé et l'écoute d'instructions verbales, et ce, sur une période beaucoup plus longue que celle proposée dans le cadre de l'étude 3.

L'étude de l'écriture permet alors une meilleure compréhension des processus en jeu dans la population T21 mais également dans la population typique. Malgré l'essor des nouvelles technologies, l'écriture manuscrite reste une capacité hautement sollicitée au quotidien dans le domaine scolaire. Ainsi, son étude représente un enjeu majeur en faveur d'une insertion scolaire, sociale et professionnelle des personnes en situation de handicap. De nombreuses perspectives de recherche restent encore à être explorées dans le domaine de l'écriture et de la trisomie 21 afin de développer des pistes de remédiation favorisant la mise en place d'une écriture.

Bibliographie

- Adi-Japha, E., & Freeman, N. F. (2001). Development of differentiation between writing and drawing systems. *Developmental psychology*, 37, 101–114.
- Adi-Japha, E., Landau, Y. E., Frenkel, L., Teicher, M., Gross-Tsur, V., & Shalev, R. S. (2007). ADHD and dysgraphia: underlying mechanisms. *Cortex*, 43(6), 700–709.
- Adrien, J. L. (1996). *Autisme du jeune enfant. Développement psychologique et régulation de l'activité*. Paris: Expansion Scientifique Française.
- Agnew, P., & Maas, F. (1982). An interim Australian version of the Jebsen-Taylor test of hand function. *The Australian Journal of Physiotherapy*, 28, 23–29.
- Ajuriaguerra, J., Auzias, M., & Denner, A. (1971). *L'écriture de l'enfant : L'évolution de l'écriture et ses difficultés*. Neuchâtel, Delachaux, Niestlé.
- Akaike, H. (1973). Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. In B. N. Petrov & F. Csaki (Eds.), *Second international symposium on information theory* (pp. 267-281). Budapest: Academiai Kiado.
- Albaret, J.-M., Danna, J., Soppelsa, R., & Kaiser, M.-L. (2013). Définitions et modèles. In J. M. Albaret, M.-L. Kaiser & R. Soppelsa (Eds.), *Troubles de l'écriture chez l'enfant : Des modèles à l'intervention* (pp. 5-29). Louvain-La-Salle: De Boeck Supérieur.
- Albaret, J. M., Kaiser, M.-L., & Soppelsa, R. (2013). *Troubles de l'écriture chez l'enfant - Des modèles à l'intervention*. Louvain-La-Salle: De Boeck Supérieur.
- Albaret, J.-M., & Soppelsa, R. (1999). *Précis de rééducation de la motricité manuelle: 2ème édition*. Groupe de Boeck.
- Alston, J. (1985). The handwriting of seven to nine year olds. *British Journal of Special Education*, 12, 68-72.
- American Association on Mental Retardation (2002). *Mental retardation: Definition, classification and systems of supports (10th ed.)*. Washington, DC: AAMR.
- Amundson, S. J. (1992). *Handwriting: evaluation and intervention in school settings*. In J. Case-Smith & C. Pehoski (Eds.), *Development of Hand Skills in the Child*. Rockville, MD: American Occupational Therapy Association.
- Amundson, S. J. (1995). *Evaluation Tool of Children's Handwriting (ETCH) Examiner's Manual*, O.T. Kids, Homer, AK.
- Anson, J. G. (1992). Neuromotor control and Down syndrome. In J. J. Summers (Ed.), *Approaches to the Study of Motor Control and Learning* (pp. 387-413). New York, NY: Elsevier.
- American Psychiatric Association (2000). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders (4th ed., text rev.)*. Washington, DC: Author.
- American Psychiatric Association (2010). *Ethical principles of psychologists and code of conduct (with the 2010 amendments)*. Washington, DC: American Psychological Association.
- American Psychiatric Association (2013). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders (5th ed.)*. Washington, DC: American Psychiatric Association.
- Arnell, H., Gustaffson, J., Ivarsson, S.A., & Anneren, G. (1996) Growth and pubertal development in Down's syndrome. *Acta Paediatr.* 65, 1102-6.
- Athenes, S., & Guiard, Y. (1990). Le développement des postures d'écriture : une étude comparative chez les droitiers et les gauchers. In C. Sirat, J. Irigoien & E. Pouille (Eds), *L'écriture, le cerveau, l'œil et la main* (p.59-73). Paris : Brepols.
- Auzias, M. (1970). *Les troubles de l'écriture chez l'enfant*. Neuchâtel : Delachaux et Niestlé.

- Auzias, M., & Ajuriaguerra, J. (1986). Les fonctions culturelles de l'écriture et les conditions de son développement chez l'enfant. *Enfance*, 39(2-3), 145-167.
- Azéma, B., & Martinez, N. (2005). Les personnes handicapées vieillissantes: espérances de vie et de santé; qualité de vie. *Revue française des affaires sociales*, 2, 295-333.
- Ministère de l'Éducation Nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (2015). *Bulletin officiel spécial n°11 du 26 novembre 2015*. Repéré à l'adresse http://www.education.gouv.fr/pid285/bulletin_officiel.html?pid_bo=33400
- Baddeley, A. (1992). Working memory. *Science*, 255(5044), 556-559.
- Baguley, T. (2012). *Serious Stats: A Guide to Advanced Statistics for the Behavioral Sciences*. Palgrave Macmillan.
- Baldy, R. (2002). *Dessine-moi un bonhomme. Dessins d'enfants et développement cognitif*. Paris : In Press Éditions.
- Bara, F., Fredembach, B., & Gentaz, É. (2010). Rôle des procédures exploratoires manuelles dans la perception haptique et visuelle de formes chez des enfants scolarisés en cycle 2. *L'Année psychologique*, 110(02), 197-225.
- Bara, F., & Gentaz, E. (2006). Comment les enfants apprennent-ils à écrire et comment les aider ? In P. Dessus & E. Gentaz (Eds.), *Apprendre et enseigner à l'école*. Paris : Dunod.
- Bara, F., & Gentaz, E. (2010). Apprendre à tracer les lettres : une revue critique. *Psychologie française*, 55, 129-144.
- Bara, F., & Gentaz, E. (2011). Haptics in teaching handwriting: The role of perceptual and visuo-motor skills. *Human Movement Science*, 30, 745-759.
- Bara, F., Morin, M.-F., Montésinos-Gelet, I., & Lavoie, N. (2011). Conceptions et pratiques en graphomotricité chez des enseignants de primaire en France et au Québec. *Revue française de pédagogie*, 3, 41-56.
- Bard, C., & Hay, L. (1983). Etude ontogénétique de la coordination visuo-manuelle. *Canadian Journal of Psychology/Revue canadienne de psychologie*, 37(3), 390.
- Barnett, A., Henderson, S., Scheib, B., & Schulz, J. (2007). *Detailed Assessment of Speed of Handwriting (DASH)*. UK: Pearson.
- Barrett, M. D., & Eames, K. (1996). Sequential developments in children's human figure drawings. *British Journal of Developmental Psychology*, 14, 219-236.
- Bates, B., Maechler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Linear Mixed-Effects Models using 'Eigen' and S4. R package version 1.1-10. <http://CRAN.R-project.org/package=lme4>
- Baurain, C., & Nader-Grosbois, N. (2009). Évaluer la régulation émotionnelle, la résolution de problèmes socio-émotionnels et les compétences sociales d'enfants présentant une déficience intellectuelle: études de cas. *Revue Francophone de la Déficience Intellectuelle*, 20, 123-147.
- Beaugerie-Perrot, A., & Lelord, G. (1991). *Intégration scolaire et autisme*. Paris, PUF, coll. Nodules
- Bellugi, U., Lichtenberger, L., Mills, D., Galaburda, A., & Korenberg, J. R. (1999). Bridging cognition, the brain and molecular genetics: evidence from williams syndrome. *Trends Neuroscience*, 22, 197-207.
- Bennett-Gates, D., & Zigler, E. (1998). Resolving the developmental-difference debate: An evaluation of the triarchic and systems theory models. In J. A. Burack, R. M. Hodapp, & E. Zigler (Eds.), *Handbook of mental retardation and development* (pp. 115-131). Cambridge, England: Cambridge University Press.
- Benoit, M., Staccini, P., Brocker, P., Benhamidat, T., Bertogliati, C., Lechowski, L., ... & Robert, P. H. (2003). Symptômes comportementaux et psychologiques dans la maladie d'Alzheimer: résultats de l'étude REAL. FR. *La Revue de médecine interne*, 24, 319s-324s.
- Berninger, V. (2009). Highlights of programmatic, interdisciplinary research on writing. *Learning Disabilities. Research and Practice*, 24, 68-79.
- Berninger, V. W., Vaughan, K. B., Abbott, R. D., Abbott, S. P., Rogan, L. W., Brooks, A., ... & Graham, S. (1997). Treatment of handwriting problems in beginning writers: Transfer from handwriting to composition. *Journal of Educational Psychology*, 89(4), 652-666.

- Berninger, V. W., Nagy, W., Tanimoto, S., Thompson, R., & Abbott, R. D. (2015). Computer instruction in handwriting, spelling, and composing for students with specific learning disabilities in grades 4–9. *Computers & Education, 81*, 154–168.
- Berninger, V. W., Vaughan, K., Abbott, R. D., Begay, K., Coleman, K. B., Curtin, G., et al. (2002). Teaching spelling and composition alone and together: Implications for the simple view of writing. *Journal of Educational Psychology, 94*(2), 291–304.
- Berwick, D. M. & Winickoff, D. E. (1996). The truth about doctors' handwriting: a prospective study. *British Medical Journal, 313*, 1657–1658.
- Bhatt, S., Schreck, R., Graham, J. M., Korenberg, J. R., Hurvitz, C. G., & Fischel-Ghodsian, N. (1995). Transient leukemia with trisomy 21: description of a case and review of the literature. *American journal of medical genetics, 58*(4), 310–314.
- Bihrlé, A. M., Bellugi, U., Delis, D., & Marks, S. (1989). Seeing either the forest or the trees: Dissociation in visuospatial processing. *Brain and cognition, 11*(1), 37–49.
- Binet, A., & Simon, T. (1904). Méthodes nouvelles pour le diagnostic du niveau intellectuel des anormaux. *L'année Psychologique, 11*(1), 191–244.
- Block, M. E. (1991). Motor development in children with Down syndrome: A review of the literature. *Adapted Physical Activity Quarterly, 8*(3), 179–209.
- Bonnardel, R. (2008). *Test de dextérité manuelle*. Paris : ECPA.
- Bonney, M. A. (1992). Understanding and assessing handwriting difficulty: perspectives from the literature. *Australian Occupational Therapy Journal, 39*, 7–15.
- Book, J. A., Fraccaro, M., & Lindsten, J. (1959). Cytogenetical observations in mongolism. *Acta Paediatrica, 48*, 453–468.
- Bourdin, B., Cogis, D., & Foulin, J.-N. (2010). Influence des traitements graphomoteurs et orthographiques sur la production de textes écrits: perspective pluridisciplinaire. *Langages, (1)*, 57–82.
- Bourdin, B., & Fayol, M. (1994). Is written language production more difficult than oral language production? *International journal of psychology, 29*, 591–620.
- Bourdin, B., & Fayol, M. (2000). Is graphic activity cognitively costly? A developmental approach. *Reading and writing: An interdisciplinary journal, 13*, 183–196.
- Bourquin, C., & Lambert, J. L. (1998). *Trisomie 21 et vieillissement : suggestions pour l'évaluation et l'intervention*. Editions SZH.
- Brandt, B. R. (1996). Impaired tactual perception in children with Down's syndrome. *Scandinavian Journal of Psychology, 37*(3), 312–316.
- Braswell, G. S., Rosengren, K. S., & Pierrousakos, S. L. (2007). Task constraints on preschool children's grip configurations during drawing. *Developmental psychobiology, 49*(2), 216–225.
- Broadley, I., MacDonald, J., & Buckley, S. (1995). Working memory in children with Down syndrome. *Down Syndrome Research and Practice, 3*(1), 3–8.
- Buckley, S., Bird, G., & Byrne, A. (1996). Reading acquisition by young children. In B. Stratford & P. Gunn (Eds.), *New approaches to Down syndrome* (pp. 268–279). London: Cassell.
- Burack, J. A., Hodapp, R., Iarocci, G. & Zigler, E. (Eds.), (2012). *The Oxford handbook of intellectual disabilities and development*. New York, NY: Oxford University Press.
- Burack, J. A., Hodapp, R. M., & Zigler, E. (1988). Issues in the classification of mental retardation: Differentiating among organic etiologies. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, 29*(6), 765–779.
- Burack, J. A., Russo, N., Flores, H., Iarocci, G., & Zigler, E. (2012). The more we know, the less we know, but that's OK: Developmental implications for theory, methodology, and interpretation. In J. A. Burack, R. M. Hodapp, G. Iarocci, & E. Zigler (Eds.), *The Oxford handbook of intellectual disability and development* (pp. 3–12). New York: Oxford University Press.
- Burr, V. (2002). Judging gender from samples of adult handwriting: Accuracy and use of cues. *The Journal of social psychology, 142*(6), 691–700.

- Cahill, S. M. (2009). Where does handwriting fit in? Strategies to support academic achievement. *Intervention in School and Clinic, 44*(4), 223–228.
- Carlesimo, G. A., Marotta, L., & Vicari, S. (1997). Long-term memory in mental retardation: Evidence for a specific impairment in subjects with Down's syndrome. *Neuropsychologia, 35*(1), 71-79.
- Carlier, M., & Ayoun, C., 2007. *Déficiences Intellectuelles et Intégration Sociale*. Liège : Mardaga.
- Carlier, M., Desplanches, A. G., Philip, N., Stefanini, S., Vicari, S., Volterra, V., ... & Swillen, A. (2011). Laterality preference and cognition: cross-syndrome comparison of patients with trisomy 21 (Down), del7q11. 23 (Williams–Beuren) and del22q11. 2 (DiGeorge or Velo-Cardio-Facial) syndromes. *Behavior genetics, 41*(3), 413-422.
- Carlier, M., Stefanini, S., Deruelle, C., Volterra, V., Doyen, A.-L., Lamard, C., ... & Fisch, G. (2006). Laterality in persons with intellectual disability. Do patients with Trisomy 21 and Williams-Beuren syndrome differ from typically developing persons? *Behavior Genetics, 36*, 365-376.
- Carr, J. C. (2005). Stability and change in cognitive ability over the life span: a comparison of populations with and without Down's syndrome. *Journal of Intellectual Disability Research, 49*(12), 915-928.
- Carr, J. (1970). Mental and motor development in young mongol children. *Journal of Intellectual Disability Research, 14*(3), 205-220.
- Carr, J. C. (1975). *Young children with Down's syndrome*. London: Butterworth.
- Carr, J. C. (1985). The development of intelligence. In D. Lane & B. Stratford (Eds.), *Current approaches to Down's syndrome* (pp. 167–186). London: Holt Rinehart & Winston.
- Carr, J. C. (1995). *Down's syndrome: Children growing up*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Carvalho, R. L., & Almeida, G. L. (2009). The effect of vibration on postural response of Down syndrome individuals on the seesaw. *Research in developmental disabilities, 30*(6), 1124-1131.
- Céleste, B., & Lauras, B. (1997). *Le jeune enfant porteur de trisomie 21*. Paris : Nathan.
- Centerwall, S. A., & Centerwall, W. R. (1960). A study of children with mongolism reared in the home compared to those reared away from the home. *Pediatric, 25*, 678-685.
- Chang, S. H., & Yu, N. Y. (2010). Characterization of motor control in handwriting difficulties in children with or without developmental coordination disorder. *Developmental Medicine and Child Neurology, 52*, 244–250.
- Chao, L. L., & Martin, A. (2000). Representation of manipulable man-made objects in the dorsal stream. *Neuroimage, 12*, 478–484.
- Chapman, R. S., & Hesketh, L. J. (2000). Behavioral phenotype of individuals with Down syndrome. *Mental Retardation and Developmental Disabilities Research Reviews, 6*(2), 84-95.
- Chapman, R. S., Seung, H. K., Schwartz, S. E., & Bird, E. K. R. (1998). Language Skills of Children and Adolescents With Down Syndrome. II. *Production Deficits. Journal of Speech, Language, and Hearing Research, 41*(4), 861-873.
- Charles, M., Soppelsa, R., & Albaret, J. M. (2003). *BHK – Échelle d'évaluation rapide de l'écriture chez l'enfant*. Paris : Éditions et applications psychologiques.
- Charlton, J. L., Ihsen, E., & Lavelle, B. M. (2000). Control of manual skills in children with Down syndrome. In D. J. Weeks, R. Chua, & D. Elliott (Eds.), *Perceptual-motor behavior in Down syndrome* (pp. 25–48). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Charlton, J. L., Ihsen, E., & Oxley, J. (1996). Kinematic characteristics of reaching in children with Down syndrome. *Human Movement Science, 15*, 727–743.
- Charte des droits fondamentaux de l'Union Européenne (2000). Repérée à l'adresse http://www.europarl.europa.eu/charter/pdf/text_fr.pdf
- Chartrel, E., & Vinter, A. (2004). L'écriture : une activité longue et complexe à acquérir. *Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant, 78*, 174-180.

- Chartrel, E., & Vinter, A. (2006). Rôle des informations visuelles dans la production de lettres cursives chez l'enfant et l'adulte. *L'année psychologique*, 106, 43-64.
- Christensen, C. A. (2004). Relationship between orthographic-motor integration and computer use for the production of creative and well-structured written text. *British Journal of Educational Psychology*, 74(4), 551-564.
- Christensen, C. A. (2005). The role of orthographic-motor integration in the production of creative and well-structured written text for students in secondary school. *Educational Psychology*, 25(5), 441-453.
- Chua, R., Weeks, D., & Elliott, D. (1996). A functional systems approach to understanding verbal-motor integration in individuals with Down syndrome. *Down Syndrome Research and Practice*, 4(1), 25-36.
- Chumlea, W. C., & Cronk, C. E. (1981). Overweight among children with trisomy 21. *Journal of Intellectual Disability Research*, 25(4), 275-280.
- Clements, W., & Barrett, M. (1994). The drawings of children and young people with Down's syndrome: a case of delay or difference? *British Journal of Educational Psychology*, 64(3), 441-452.
- Comblain, A. (2001). Fonctionnement mnésique. In J.A. Rondal & A. Comblain. *Manuel de psychologie des handicaps : Sémiologie et principes de remédiation*. Sprimont : Mardaga.
- Comblain, A. (1996). *Mémoire de travail et langage dans le syndrome de Down* (Thèse de doctorat). Université de Liège.
- Comblain, A., & Thibaut, J.-P. (2009). Approche neuropsychologique du syndrome de Down. In M. Poncelet, S. Majerus & M. van der Linden (Eds.), *Traité de neuropsychologie de l'enfant* (pp. 491-524). Marseille : Solal
- Connelly, V., Gee, D., & Walsh, E. (2007). A comparison of keyboarded and handwritten compositions and the relationship with transcription speed. *British Journal of Educational Psychology*, 77(2), 479-492.
- Coppus, A., Evenhuis, H., Verberne, G.-J., Visser, F., Van Gool, P., Eikelenboom, P., & Van Duijn, C. (2006). Dementia and mortality in persons with Down's syndrome. *Journal of Intellectual Disability Research*, 50(10), 768-777
- Corballis, M. C. (2003). From mouth to hand: gesture, speech, and the evolution of right-handedness. *Behavioral and Brain Sciences*, 26(2), 199-208.
- Cornhill, H., & Case-Smith, J. (1996). Factors that relate to good and poor handwriting. *American Journal of Occupational Therapy*, 50(9), 732-739.
- Courbois, Y., & Facon, B. (2014). Les savoirs de la psychologie cognitive. In C. Gardou (Ed.), *Handicap, une encyclopédie des savoirs* (pp. 257-272). Toulouse: ERES.
- Courbois, Y., & Paour, J.-L. (2007). Le retard mental. In S. Ionescu, & A. Blanchet (Eds.), *Psychologie du développement et de l'éducation* (pp. 377-406). Paris : Presses Universitaires de France.
- Courtney, S. M., Ungerleider, L. G., Keil, K., & Haxby, J. V. (1996). Object and spatial visual working memory activate separate neural systems in human cortex. *Cerebral Cortex*, 6(1), 39-49.
- Couzens, D., & Cuskelly, M. (2014). Cognitive strengths and weaknesses for informing educational practice. In R. Faragher & B. Clarke (Eds.), *Educating learners with Down syndrome research, theory, and practice with children and adolescents* (pp. 41-59). Oxon : Routledge.
- Couzens, D., Haynes, M., & Cuskelly, M. (2012). Individual and Environmental Characteristics Associated with Cognitive Development in Down Syndrome: A Longitudinal Study. *Journal of Applied Research in Intellectual Disabilities*, 25(5), 396-413.
- Cox, M. V., & Maynard, S. (1998). The human figure drawings of children with Down syndrome. *British Journal of Developmental Psychology*, 16(2), 133-137.
- Currie, J., & Stabile, M. (2006). Child mental health and human capital accumulation: the case of ADHD. *Journal of Health Economics*, 25(6), 1094-1118.
- Daly, C. J., Kelley, G. T., & Krauss, A. (2003). Relationship between visual-motor integration and handwriting skills of children in kindergarten: A modified replication study. *American journal of occupational therapy*, 57(4), 459-462.

- Danna, J., Paz-Villagrán, V., & Velay, J.-L. (2013). Signal-to-Noise velocity peaks difference: A new method for evaluating the handwriting movement fluency in children with dysgraphia. *Research in developmental disabilities, 34*(12), 4375–4384.
- Daunhauer, L. A., & Fidler, D. J. (2011). The Down syndrome behavioral phenotype: implications for practice and research in occupational therapy. *Occupational therapy in health care, 25*(1), 7–25.
- Davis, W. E., & Kelso J. A. S. (1982). Analysis of "invariant characteristics" in the motor control of Down syndrome and normal subjects. *Journal of Motor Behaviour, 14*, 194-212.
- de Campos, A. C., Rocha, N. A. C. F., & Savelsbergh, G. J. (2009). Reaching and grasping movements in infants at risk: A review. *Research in developmental disabilities, 30*(5), 819-826.
- de Campos, A. C., Rocha, N. A. C. F., & Savelsbergh, G. J. P. (2010). Development of reaching and grasping skills in infants with Down syndrome. *Research in Developmental Disabilities, 31*(1), 70-80.
- de Fréminville, B, Nivelon, A., & Touraine, R. (2007). *Livret de suivi médical de la personne porteuse de trisomie 21 (2^{ème} édition)*. Paris : Trisomie 21 France.
- de Fréminville, B., & Touraine, R. (2014). *Down syndrome*. Repéré à l'adresse http://www.orpha.net/consor/cgi-bin/OC_Exp.php?Expert=870
- De La Paz, S., & Graham, S. (1997). Effects of dictation and advanced planning instruction on the composing of students with writing and learning problems. *Journal of Educational Psychology, 89*(2), 203.
- De Vigan, C., Khoshnood, B., Cadio, E., Vodovar, V., & Goffinet, F. (2008a). Le registre des malformations de Paris : un outil pour la surveillance des malformations et l'évaluation de leur prise en charge. *Bulletin épidémiologique hebdomadaire. InVS, 28-29*, 250-253.
- De Vigan, C., Khoshnood, B., Cadio, E., Vodovar, V., & Goffinet, F. (2008b). Diagnostic prénatal et prévalence de la trisomie 21 en population parisienne, 2001–2005. *Gynécologie Obstétrique & Fertilité, 36*(2), 146-150.
- Del Giudice, E., Grossi, D., Angelini, R., Crisanti, A. F., Latte, F., Fragassi, N. A., & Trojano, L. (2000). Spatial cognition in children. I. Development of drawing-related (visuospatial and constructional) abilities in preschool and early school years. *Brain and development, 22*(6), 362-367.
- Delazer, M., Lochy, A., Jenner, C., Domahs, F., & Benke, T. (2002). When writing 0 (zero) is easier than writing O (o): a neuropsychological case study of agraphia. *Neuropsychologia, 40*(12), 2167-2177.
- DEPP. - Direction de l'Évaluation, de la Prospective et de la Performance (2014). *Repères Et Références Statistiques. Enseignements, Formation, Recherche. Ministère de l'Éducation Nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche*. Repéré à l'adresse http://cache.media.education.gouv.fr/file/2014/04/7/DEPP_RERS_2014_344047.pdf
- DEPP. - Direction de l'Évaluation, de la Prospective et de la Performance (2015). *Repères Et Références Statistiques. Enseignements, Formation, Recherche. Ministère de l'Éducation Nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche*. Repéré à l'adresse http://cache.media.education.gouv.fr/file/2015/67/6/depp_rers_2015_454676.pdf
- Detable, C., & Vinter, A. (2003). Les activités graphiques d'enfants et d'adolescents présentant un retard mental: Étude du respect d'une règle syntaxique. *European review of applied psychology, 53*(3/4), 179-188.
- Devenny, D. A., Silverman, W. P., Hill, A. L., Jenkins, E., Sersen, E. A., & Wisniewski, K. E. (1996). Normal ageing in adults with Down's syndrome: A longitudinal study. *Journal of Intellectual Disability Research, 40*(3), 208-221.
- Dinehart, L. H. (2015). Handwriting in early childhood education: Current research and future implications. *Journal of Early Childhood Literacy, 15*(1), 97-118.
- Dinehart, L., & Manfra, L. (2013). Associations Between Low-Income Children's Fine Motor Skills in Preschool and Academic Performance in Second Grade. *Early Education & Development, 24*(2), 138–161.
- Dmitriev, V. (2001). *Early intervention for children with Down syndrome: Time to begin*. Austin, Texas: Pro-Ed.
- Dobbie, L. & E. N. Askov (1995). Progress of handwriting research in the 1980s and future prospects. *The Journal of Educational Research, 88*, 339–351.
- Dooijes, E. H. (1983). Analysis of handwriting movements. *Acta Psychologica, 5*, 99–114.

- Dorfberger, S., Adi-Japha, E., & Karni, A. (2009). Sex differences in motor performance and motor learning in children and adolescents: An increasing male advantage in motor learning and consolidation phase gains. *Behavioural Brain Research*, 198, 165-171.
- Down, J. L. H. (1862). On the condition of the mouth in idiocy. *Lancet*, 7(65), 1862.
- Down, J. L. H. (1866). Observation on an Ethnic Classification of Idiots. *London Hospital Reports*, 3, 259-262.
- Duncan, G. J., Dowsett, C. J., Claessens, A., Magnuson, K., Huston, A. C., Klebanov, P., ... & Japel, C. (2007). School readiness and later achievement. *Developmental psychology*, 43(6), 1428.
- Dunst, C. J. (1990) Sensorimotor development of infants with Down syndrome. In D. Cicchetti & M. Beeghly (Eds), *Children with Down syndrome: A developmental perspective* (pp. 180-230). New York: Cambridge University Press.
- Dunst, C. J., Brassell, W. R. & Rheingrover, R. M. (1981) Structural and organisational features of sensorimotor intelligence among retarded infants and toddlers. *British Journal of Educational Psychology*, 51, 133-143.
- Dykens, E. M., & Hodapp, R. M. (1999). Behavioural phenotypes towards new understandings of people with developmental disabilities. In Bouras, N. (Ed.), *Psychiatric and behavioural disorders in developmental disabilities and mental retardation* (pp. 96-108). Cambridge: Cambridge University Press.
- Dykens, E., Hodapp, R., & Evans, D. (2006). Profiles and development of adaptive behavior in children with Down syndrome. *Down Syndrome Research and Practice*, 9(3), 45-50.
- Dykens, E. M., Rosner, B. A., & Ly, T. M. (2001). Drawings by individuals with Williams syndrome: Are people different from shapes? *American Journal on Mental Retardation*, 106(1), 94-107.
- Edgin, J. O., Pennington, B. F., & Mervis, C. B. (2010). Neuropsychological components of intellectual disability: the contributions of immediate, working, and associative memory. *Journal of Intellectual Disability Research*, 54(5), 406-417.
- Elliott, D. (1985). Manual asymmetries in the performance of sequential movement by adolescents and adults with Down syndrome. *American Journal of Mental Deficiency*, 90, 90-97.
- Elliott, D., & Bunn, L. (2004). Motor disorders in children with intellectual disabilities. In D. Dewey & D.E. Tupper (Eds.), *Developmental motor disorders: A neuropsychological perspective* (pp. 137-151). New York: Guilford Press.
- Elliott, D., Weeks, D. J., & Chua, R. (1994). Anomalous Cerebral Lateralization and Down Syndrome. *Brain and Cognition*, 26(2), 191-195.
- Elliott, D., Weeks, D. J., & Gray, S. (1990). Manual and oral praxis in adults with Down's syndrome. *Neuropsychologia*, 28, 1307-1315.
- Elliott, D., Weeks, D. J., & Jones, R. (1986). Lateral asymmetries in finger-tapping by adolescents and young adults with Down syndrome. *American Journal of Mental Deficiency*, 90, 472-475.
- Elliott, D., Welsh, T. N., Lyons, J., Hansen, S., & Wu, M. (2006). The visual regulation of goal-directed reaching movements in adults with Williams syndrome, Down syndrome, and other developmental delays. *Motor control*, 10(1), 34-54.
- Ellis, A. W., & Young, A. W. (1988). *Human Cognitive Neuropsychology*. London: Lawrence Erlbaum Ass.
- Enea-Drapeau, C., Carlier, M., & Huguet, P. (2012). Tracking subtle stereotypes of children with trisomy 21: From facial-feature-based to implicit stereotyping. *PLoS one*, 7(4), e34369.
- Erez, N., Yochman, A., and Parush, S. (1996). *The Hebrew Handwriting Evaluation*, Faculty of Medicine, School of Occupational Therapy, Hebrew University of Jerusalem, Israel.
- Erez, N., Yochman, A., and Parush, S. (1999). *The Hebrew Handwriting Evaluation* (2nd Ed.), Faculty of Medicine, School of Occupational Therapy, Hebrew University of Jerusalem, Israel.
- Escoffier, G. (1999). Kinésithérapie - Education précoce. *GEIST SOLEIL*, 18, 12-13.
- Esquirol, E. (1838). *Des maladies mentales considérées sous les rapports médical, hygiénique et médico-légal*. Paris : J.-B. Baillière.

- Evenhuis, H. M., Theunissen, M., Denkers, I., Verschuure, H., & Kemme, H. (2001). Prevalence of visual and hearing impairment in a Dutch institutionalized population with intellectual disability. *Journal of Intellectual Disability Research, 45*(5), 457-464.
- Fabbro, F., Alberti, B., Gagliardi, C., & Borgatti, R. (2002). Differences in native and foreign language repetition tasks between subjects with William's and Down's syndromes. *Journal of Neurolinguistics, 15*(1), 1-10.
- Fayol, M., & Miret, A. (2005). Écrire, orthographier et rédiger des textes. *Psychologie Française, 50*(3), 391-402.
- Feder, K. P., & Majnemer, A. (2007). Handwriting development, competency, and intervention. *Developmental Medicine & Child Neurology, 49*(4), 312-317.
- Feder, K. P., Majnemer, A., Bourbonnais, D., Platt, R., Blayney, M., & Synnes, A. (2005). Handwriting performance in preterm children compared with term peers at age 6 to 7 years. *Developmental Medicine & Child Neurology, 47*(3), 163-170.
- Fidler, D. J. (2005). The emerging Down syndrome behavioral phenotype in early childhood: Implications for practice. *Infants & Young Children, 18*(2), 86-103.
- Fidler, D. J., Barrett, K. C., & Most, D. E. (2005). Age-related differences in smiling and personality in Down syndrome. *Journal of Developmental and Physical Disabilities, 17*(3), 263-280.
- Fidler, D. J., & Hodapp, R. M. (1999). Craniofacial maturity and perceived personality in children with Down syndrome. *American Journal on Mental Retardation, 104*(5), 410-421.
- Fidler, D. J., Philofsky, A., & Hepburn, S. L. (2007). Language phenotypes and intervention planning: Bridging research and practice. *Language and communication Mental retardation and developmental disabilities research reviews, 13*(1), 47-57.
- Finley, W. H., Finley, S. C., Rosecrans, C. J., & Tucker, C. C. (1966). Normal-21-trisomy mosaicism. Report of four cases and review of the subject. *American journal of diseases of children (1960), 112*(5), 444-447.
- Fishler, K., & Koch, R. (1991). Mental development in Down syndrome mosaicism. *American Journal on Mental Retardation*.
- Ford, C. E., Jones, K. W., Miller, O. J., Mittwoch, U., Penrose, L. S., Ridler, M., & Shapiro, A. (1959). The chromosomes in a patient showing both mongolism and the Klinefelter syndrome. *The Lancet, 1*(7075), 709-710.
- Fox, J. (2005). The R Commander: A Basic Statistics Graphical User Interface to R. *Journal of Statistical Software, 14*(9), 1-42.
- Freeman, S., & Kasari, C. (2002). Characteristics and qualities of the play dates of children with Down syndrome: Emerging or true friendships? *American Journal of Mental Retardation, 107*, 16-31.
- Gilhodes, J. C., & Velay, J. L. (2012). *Ecriture Suite*. UMR CNRS 6193: INCM.
- Glasson, E. J., Sullivan, S. G., Hussain, R., Petterson, B. A., Montgomery, P. D., & Bittles, A. H. (2002). The changing survival profile of people with Down's syndrome: implications for genetic counselling. *Clinical genetics, 62*(5), 390-393.
- Glencross, D. J. (1980). Levels and strategies of response organisation. In: G. E. Stelmach & J. Requin (Eds.), *Tutorials in motor behavior* (pp. 551-566). Amsterdam: North Holland.
- Gombert, J. E. (2002). Children with Down syndrome use phonological knowledge in reading. *Reading and writing, 15*(5-6), 455-469.
- Gombert, J. E., & Fayol, M. (1992). Writing in preliterate children. *Learning and instruction, 2*, 23-41.
- Gomes, M. M., & Barela, J. A. (2007). Postural control in Down syndrome: the use of somatosensory and visual information to attenuate body sway. *Motor Control, 11*(3), 224.
- Goodnow, J. J., & Levine, R. A. (1973). "The grammar of action": Sequence and syntax in children's copying. *Cognitive Psychology, 4*(1), 82-98.
- Graham, S. (1986a). A review of handwriting scales and factors that contribute to variability in handwriting scores. *Journal of School Psychology, 24*(1), 63-71.

- Graham, S. (1986b). The reliability, validity, and utility of three handwriting measurement procedures. *The Journal of Educational Research*, 79(6), 373-380.
- Graham, S. (1990). The role of production factors in learning disabled students' compositions. *Journal of educational psychology*, 82, 781-791.
- Graham, S., Berninger, V. W., Weintraub, N. & Schafer, W. (1998). Development of handwriting speed and legibility in grades 1-9. *The Journal of Educational Research*, 92, 42- 52.
- Graham, S., Harris, K. R., & Fink, B. (2000). Is handwriting causally related to learning to write? Treatment of handwriting problems in beginning writers. *Journal of educational psychology*, 92, 620-633.
- Graham, S., Struck, M., Santoro, J., & Berninger, V.W. (2006). Dimensions of good and poor handwriting legibility in first and second graders: Motor programs, visual-spatial arrangement, and letter formation parameter setting. *Developmental neuropsychology*, 29, 43-60.
- Graham, S., & Weintraub, N. (1996). A review of handwriting research: Progress and prospects from 1980 to 1994. *Educational Psychology Review*, 8(1), 7-87.
- Graham, S., Weintraub, N. & Berninger, V. W. (1998). The relationship between handwriting style and speed and legibility. *Journal of Educational Research*, 91, 290-296.
- Groff, P. J. (1964). Who Are the Better Writers-The Left-Handed or the Right-Handed? *The Elementary School Journal*, 65(2), 92-96.
- Groud, P. F., & Martin-Krumm, C. (2012). Impact des croyances des enseignants de maternelle sur les capacités scolaires des enfants porteurs de trisomie 21, quelle réalité ? *Carrefours de l'éducation*, 2, 203-219.
- Guidetti, M. & Tourrette, C. (1999) *Handicaps et développement psychologique de l'enfant*. Paris : Armand Colin.
- Hackel, M. E., Wolfe, G. A., Bang, S. M. & Canfield, J. S. (1992). Changes in hand function in the aging adult as determined by the Jebsen test of hand function. *Physical Therapy*, 72, 373-377.
- Hall, B. (1970). Somatic deviations in newborn and older mongoloid children. *Acta Paediatrica*, 59(2), 199-204.
- Hamilton, A. C., & Coslett, H. B. (2007). Impairment in writing, but not reading, morphologically complex words. *Neuropsychologia*, 45(7), 1586-1590.
- Hamstra-Bletz, L., & Blöte, A. W. (1990). Development of handwriting in primary school: A longitudinal study. *Perceptual and motor skills*, 70(3), 759-770.
- Hamstra-Bletz, L., & Blöte, A.W. (1993). A longitudinal study on dysgraphic handwriting in primary school. *Journal of Learning Disabilities*, 26, 689-699.
- Hamstra-Bletz, L., DeBie, J., & DenBrinker, B. (1987). *Concise Evaluation Scale for children's handwriting*, Lisse, Swets & Zeitlinger, Germany.
- Handwriting Without Tears® (2014). *Research Review*. Repéré à l'adresse <https://www.hwtears.com/files/HWT%20Research%20Review.pdf>
- Haslam, R. H., & Milner, R. (1992). The physician and Down syndrome: are attitudes changing?. *Journal of child neurology*, 7(3), 304-310.
- Hayes, D. (1982). Handwriting practice: The effects of perceptual prompts. *Journal of Educational Research*, 75, 169-172.
- Henderson, S. E. (1985). Motor skill development. In D. Lane & B. Stratford (Eds.), *Current approaches to Down syndrome* (pp. 187-218). London: Holt, Rinehart & Winston.
- Henderson, S. E. (1986). Some aspects of the development of motor control in Down's syndrome. In H. T. A. Whiting & M. G. Wade (Eds.), *Themes in motor development* (pp. 69-91). Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers.
- Herrick, V. E., & Elebacher, A. (1963). The evaluation of legibility in handwriting. In V. E. Herrick (Ed.), *New Horizons of Research in Handwriting*, University of Wisconsin Press, Madison.
- Heuer, H. (1988). Testing the invariance of relative timing: Comment on Gentner (1987). *Psychological Review*, 95, 255-276.

- Hillairet de Boisferon, A., Bara, F., Gentaz, E., & Colé, P. (2007). Préparation à la lecture des jeunes enfants: Effets de l'exploration visuo-haptique des lettres et de la perception visuelle des mouvements d'écriture. *L'Année psychologique*, 107(04), 537-564.
- Hodapp, R. M., & Dykens, E. M. (2001). Strengthening behavioral research on genetic mental retardation syndromes. *American Journal on Mental Retardation*, 106(1), 4-15.
- Hodapp, R. M., Evans, D. W., & Gray, F. L. (1999). Intellectual development in children with Down syndrome. In J. Rondal, J. Perera, & L. Nadel (Eds.), *Down syndrome: A review of current knowledge* (pp. 124-132). London: Whurr.
- Hodges, N. J., Cunningham, S. J., Lyons, J., Kerr, T. L., & Elliott, D. (1995). Visual feedback processing and goal-directed movement in adults with Down syndrome. *Adapted Physical Activity Quarterly*, 12, 176-176.
- Huau, A., Velay, J. L., & Jover, M. (2015). Graphomotor skills in children with developmental coordination disorder (DCD): Handwriting and learning a new letter. *Human movement science*, 42, 318-332.
- Hulme, C., & Mackenzie, S. (1992). *Working memory and severe learning disabilities*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Iarocci, G., & Petrill, S. A. (2012). Behavioral genetics, genomics, intelligence, and mental retardation. In J. A. Burack, R. M. Hodapp, G. Iarocci & E. Zigler (Eds.), *The Oxford handbook of intellectual disability and development* (pp. 13-29). New York: Oxford University Press.
- Inhelder, B. (1943). *Le diagnostic du raisonnement chez les débiles mentaux*. Neuchatel: Delachaux et Niestlé.
- Inhelder, B. (1963). *Le diagnostic du raisonnement chez les débiles mentaux*. 2ème édition. Neuchatel: Delachaux et Niestlé.
- International Society for Technology in Education (2007). *NETS for Students 2007 Profiles*. Washington, DC: International Society for Technology in Education.
- Itard, J. M. G. (1801). *De l'éducation d'un homme sauvage: Des premiers développement physiques et moraux du jeune sauvage de l'Aveyron*. Paris : Goujon Fils.
- Jacobs, P. A., Baikie, A. G., Court Brown, W. M., & Strong, J. A. (1959). The somatic chromosomes in mongolism. *The Lancet*, 1(7075), 710-710.
- Janicki, M. P., Dalton, A. J., Henderson, C. M., & Davidson, P. W. (1999). Mortality and morbidity among older adults with intellectual disability: health services considerations. *Disability & Rehabilitation*, 21(5/6), 284-294.
- Jarrold, C., Baddeley, A., & Phillips, C. (1999). Down syndrome and the phonological loop: The evidence for, and importance of, a specific verbal short-term memory deficit. *Down Syndrome Research and Practice*, 6(2), 61-75.
- Jarrold, C., Baddeley, A. D., & Phillips, C. E. (2002). Verbal Short-Term Memory in Down Syndrome. A Problem of Memory, Audition, or Speech? *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 45(3), 531-544.
- Jebsen, R. H., Taylor, N., Trieschman, R. B., Trotter, M. J. & Howard, L. A. (1969). An objective and standardised test of hand function. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 50, 311-319.
- Jernigan, T. L., Bellugi, U., Sowell, E., Doherty, S. & Hesselink, J. R. (1993). Cerebral morphological distinctions between Williams and Down syndrome. *Archives of Neurology*, 50, 186-191.
- Jobling, A. M. A. (1999). Attainment of motor proficiency in school-aged children with Down syndrome. *Adapted Physical Activity Quarterly*, 16, 344-361.
- Jobling, A. M. A., & Mon-Williams, M. (2000). Motor development in Down syndrome: a longitudinal perspective. In A. Vermeer & W.E. Davix (Eds.), *Physical and motor development in mental retardation* (pp. 181-190). Basel, Suisse : Karger.
- Joffe, V., & Varlokosta, S. (2007). Patterns of syntactic development in children with Williams syndrome and Down's syndrome: Evidence from passives and wh-questions. *Clinical linguistics & phonetics*, 21(9), 705-727.
- Johnson, R. C., & Abelson, R. B. (1969). Intellectual, behavioral, and physical characteristics associated with trisomy, translocation, and mosaic types of Down's syndrome. *American journal of mental deficiency*, 73, 852-855.

- Jolly, C., & Gentaz, E. (2013). Évaluation des effets d'entraînements avec tablette tactile destinés à favoriser l'écriture de lettres cursives chez des enfants de Cours Préparatoire. *Sciences et Technologies de l'Information et la Communication pour l'Éducation et la Formation*, 20, 495-512.
- Jolly, C., Huron, C., & Gentaz, E. (2014). A one-year survey of cursive letter handwriting in a French second-grade child with Developmental Coordination Disorder. *L'Année psychologique*, 114(03), 421-445.
- Jolly C., Palluel-Germain R., & Gentaz E. (2013). Apport des interfaces haptiques et tactiles dans les apprentissages multisensoriels de l'écriture. In J.M. Albaret, M.L Kaiser, and R. Soppelsa (Eds.), *Troubles de l'écriture chez l'enfant : des modèles à l'intervention* (pp. 115-133). Louvain-La-Salle: De Boeck Supérieur.
- Jones, D., & Christensen, C. A. (1999). Relationship between automaticity in handwriting and students' ability to generate written text. *Journal of Educational Psychology*, 91(1), 44-49.
- Jover, M. (2000). Perspectives actuelles sur le développement du tonus et de la posture. In J. Rivière (Ed.), *Le développement psychomoteur du jeune enfant. Idées neuves et approches actuelles* (pp. 13-52). Marseille : Solal.
- Jover, M., Ayoun, C., Berton, C., & Carlier, M. (2010). Specific grasp characteristics of children with trisomy 21. *Developmental psychobiology*, 52(8), 782-793.
- Kaiser, M.-L. (2009). Facteurs endogènes et exogènes influençant l'écriture manuelle chez l'enfant (Thèse de doctorat). Université Toulouse III - Paul Sabatier.
- Kaiser, M. L., Albaret, J. M., & Doudin, P. A. (2009). Relationship between visual-motor integration, eye-hand coordination, and quality of handwriting. *Journal of Occupational Therapy, Schools, and Early Intervention*, 2, 87-95.
- Kaiser, M.-L., Carrasco, C. A., Soppelsa, R., & Albaret, J.-M. (2013). Facteurs endogènes. In J.M. Albaret, M.-L. Kaiser & R. Soppelsa (Eds.), *Troubles de l'écriture chez l'enfant : Des modèles à l'intervention* (pp. 91-113). Louvain-La-Salle: De Boeck Supérieur.
- Kandel, S., & Valdois, S. (2005). The effect of orthographic regularity on children's handwriting production. *Current Psychology Letters. Behaviour, Brain & Cognition*, 17(3), 1-10.
- Kandel, S., Álvarez, C., & Vallée, N. (2006). Syllables as processing units in handwriting production. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 32, 18-31
- Kao, H. S. R., Shek, D. T. L. & Lee, E. S. P. (1983). Control modes and task complexity in tracing and handwriting performance. *Acta Psychologica*, 54, 69-77.
- Karlsdottir, R. (1996). Development of cursive handwriting. *Perceptual and motor skills*, 82(2), 659-673.
- Karlsdottir, R., & Stefansson, T. (2002). Problems in developing functional handwriting. *Perceptual and motor skills*, 94, 623-662.
- Kasari, C., Mundy, P., Yirmiya, N., & Sigman, M. (1990). Affect and attention in children with Down syndrome. *American Journal on Mental Retardation*, 95, 55-67.
- Kay-Raining Bird, E., & Chapman, R. (2011). Literacy development in childhood, adolescence, and young adulthood in persons with Down syndrome. In J. Burack, R. Hodapp, G. Iarocci, & E. Zigler, (Eds.), *The Oxford Handbook of Intellectual Disability and Development* (2nd edition, pp. 184 -199). Toronto, Canada: Oxford University Press.
- Kay-Raining Bird, E., Cleave, P. L., White, D., Pike, H., & HelmKay, A. (2008). Written and oral narratives of children and adolescents with Down syndrome. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 51, 436-450.
- Kearney, K., & Gentile, A. M. (2003). Prehension in young children with Down syndrome. *Acta psychologica*, 112(1), 3-16.
- Keogh, J., & Sugden, D. A. (1985). *Movement skill development*. New York: Macmillan.
- Kimura, J., Tachibana, K., Imaizumi, K., Kurosawa, K., & Kuroki, Y. (2003). Longitudinal growth and height velocity of Japanese children with Down's syndrome. *Acta Paediatrica*, 92(9), 1039-1042.
- Knieps, L. J., Walden, T. A., & Baxter, A. (1994). Affective expressions of toddlers with and without Down syndrome in a social referencing context. *American Journal on Mental Retardation*, 99(3), 301-312.

- Korkman, M., Kirk, U., & Kemp, S. L. (2003). *Bilan neuropsychologique de l'enfant (NEPSY)*. Paris: Éditions du Centre de Psychologie Appliquée.
- Kushki, A., Chau, T., & Anagnostou, E. (2011). Handwriting difficulties in children with autism spectrum disorders: A scoping review. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 41(12), 1706-1716.
- Labat, H., Ecalle, J., & Magnan, A. (2013). Étude de l'effet d'une exploration auditive et haptique et des capacités de transfert intermodal sur l'apprentissage des lettres auprès d'un enfant porteur de trisomie 21. *ANAE. Approche neuropsychologique des apprentissages chez l'enfant*, (123), 212-218.
- Labat, H., Magnan, A., & Ecalle, J. (2011). Effet d'une exploration multisensorielle séquentielle orientée sur le développement de la compréhension du principe alphabétique chez les enfants de 5 ans faibles connaisseurs de lettres. *Année Psychologique*, 111(4), 641.
- L'Abbé, Y., Labine, R., Lemieux, N., & Lespinasse, I. (2004). *Prévention du retard mental. Causes et conduites préventives à adopter. Volume 1*. Montréal, Québec: Édition science et culture.
- Lafayette Instrument Company (1985). *Instructions and normative data for Model 32020, Purdue Pegboard*. Lafayette, IN: LIC.
- Lam, S. S., Au, R. K., Leung, H. W., & Li-Tsang, C. W. (2011). Chinese handwriting performance of primary school children with dyslexia. *Research in developmental disabilities*, 32(5), 1745-1756.
- Lambert, E., & Espéret, E. (1996). *Chunking phenomena in novice writers: Changes in lexical unit size, writing speed and pauses all along the first grade year*. Communication présentée à la « European Writing Conference », Barcelone.
- Lambert, E., & Espéret, E. (1997). Le début du langage écrit : Les premières productions grapho-motrices. *Arob@se*, 1(2), 1-15.
- Lambert, E., Alamargot, D., Larocque, D., & Caporossi, G. (2011). Dynamics of the spelling process during a copy task: Effects of regularity and frequency. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 65, 141-150.
- Lambert, E., Kandel, S., Fayol, M., & Espéret, E. (2008). The effect of the number of syllables on handwriting production. *Reading & Writing*, 21, 859-883.
- Lambert, E., Sausset, S., & Rigalleau, F. (2015). The ortho-syllable as a processing unit in handwriting: the mute effect. *Reading and Writing*, 1-16.
- Lambert, J. L., & Rondal, A. J. (1979). *Le mongolisme*. Bruxelles: Pierre Mardaga.
- Lange, K. W., Tucha, L., Walitza, S., Gerlach, M., Linder, M., & Tucha, O. (2007). Interaction of attention and graphomotor functions in children with attention deficit hyperactivity disorder. *Journal of Neural Transmission*, 72, 249-259.
- Larsen, S. C., and Hammill, D. P. (1989). *Test of Legible Handwriting*, Pro-Ed., Austin, TX
- Latash, M. L. (1992). Motor control in Down syndrome: the role of adaptation and practice. *Journal of Developmental and Physical Disabilities*, 4, 227-261.
- Latash, M. L., & Anson, J. G. (1996). What are "normal movements" in atypical populations? *Behavioral and brain sciences*, 19(1), 55-68.
- Laws, G. (2002). Working memory in children and adolescents with Down syndrome: evidence from a colour memory experiment. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 43(3), 353-364.
- Laws, G., & Lawrence, L. (2001). Spatial representation in the drawings of children with Down's syndrome and its relationship to language and motor development: A preliminary investigation. *British journal of developmental psychology*, 19(3), 453-473.
- Le Petit, C., & Berthelot, J. M. (2006). L'obésité: un enjeu en croissance. *Rapports sur la santé*, 17(3), 45.
- Lefcheck, J. (2015). Piecewise Structural Equation Modeling. R package version 1.0.0. <http://CRAN.R-project.org/package=piecewiseSEM>
- Lejeune, J., Gautier, M., & Turpin, R. (1959). Etude des chromosomes somatiques de neuf enfants mongoliens. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 248, 1721-1722.

- Lemons, C. J., & Fuchs, D. (2010). Phonological awareness of children with Down syndrome: Its role in learning to read and the effectiveness of related interventions. *Research in Developmental Disabilities, 31*(2), 316-330.
- Lenth, R. (2015). Least-Squares Means. R package version 2.21-1. <http://CRAN.R-project.org/package=lsmeans>
- Lion François, L., & Des Portes, V. (2004). Les grandes étapes du développement psychomoteur entre 0 et 3 ans: Surveillance de l'enfant de 0 à 3 ans. *La Revue du praticien, 54*(18), 1991-1997.
- Longcamp, M., Anton, J.-L., Roth, M., & Velay, J.-L. (2003). Visual presentation of single letters activates a premotor area involved in writing. *Neuroimage, 19*, 1492-1500.
- Longcamp, M., Boucard, C., Gilhodes, J. C., Anton, J. L., Roth, M., Nazarian, B., & Velay, J. L. (2008). Learning through hand-or typewriting influences visual recognition of new graphic shapes: Behavioral and functional imaging evidence. *Journal of Cognitive Neuroscience, 20*(5), 802-815.
- Longcamp, M., Boucard, C., Gilhodes, J., & Velay, J.C. (2006). Remembering the orientation of newly learned characters depends on the associated writing knowledge: A comparison between handwriting and typing. *Human Movement Science, 25*(4-5), 646-656.
- Longcamp, M., Zerbato-Poudou, M. T., & Velay, J. L. (2005). The influence of writing practice on letter recognition in preschool children: A comparison between handwriting and typing. *Acta psychological, 119*, 67-69.
- Longstaff, M. G., & Heath, R. A. (1997). Space-time invariance in adult handwriting. *Acta psychologica, 97*(2), 201-214.
- Lott, I. T., & Dierssen, M. (2010). Cognitive deficits and associated neurological complications in individuals with Down's syndrome. *The Lancet Neurology, 9*(6), 623-633.
- Lurçat, L. (1974). *Etudes de l'acte graphique*. Paris : Mouton.
- Lurçat, L. (1980). *L'activité graphique à l'école maternelle*. Paris : ESF.
- Lurçat, L. (1983). Le graphisme et l'écriture chez l'enfant. *Revue française de pédagogie, 65*(1), 7-18.
- Lydic, J. S., & Steele, C. (1979). Assessment of the quality of sitting and gait patterns in children with Down's syndrome. *Physical Therapy, 59*(12), 1489-1494.
- Maarse, F. J., Van Galen, G. P., & Thomassen, A.J.W.M. (1989). Models for the generation of writing units in handwriting under variation of size, slant, and orientation. *Human Movement Science, 8*, 271-288.
- Määttä, T. (2011). *Down Syndrome, Health and Disability. A population-based case record and follow-up study*. Oulu: University of Oulu. Repéré à l'adresse <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9789514297090.pdf>
- Mackenzie, N. M. (2011). From drawing to writing: What happens when you shift teaching priorities in the first six months of school? *Australian Journal of Language & Literacy, 34*(3), 322-340.
- Maeland, A. F. (1992). Handwriting and perceptual-motor skills in clumsy, dysgraphic and "normal" children. *Perceptual and Motor Skills, 75*, 1207-1217.
- Marschner, I. (2014). Fitting Generalized Linear Models. R package version 1.1.2. <http://CRAN.R-project.org/package=glm2>
- Mayor, C., Deonna, T., & Zesiger, P. (2000). L'acquisition de l'écriture. *Enfance, 53*(3), 295-304.
- Mazzone, L., Mugno, D., & Mazzone, D. (2004). The general movements in children with Down syndrome. *Early human development, 79*(2), 119-130.
- McGowan, M., Marder, E., Dennis, J., Wright, C., Cole, T., Short, J., & Ellis, J. (2012). Revised growth charts for children with down syndrome. *Archives of Disease in Childhood, 97*(Suppl 1), A64-A64.
- McHale, K., & Cermak, S. A. (1992). Fine motor activities in elementary school: Preliminary findings and provisional implications for children with fine motor problems. *The American Journal of Occupational Therapy, 46*, 898-903.
- Medwell, J., & Wray, D. (2008). Handwriting. A Forgotten Language Skill? *Language and Education, 22*(1), 34-47.

- Mellier, D., & Elloy, E. (1998). Formation de la saisie manuelle et de l'usage d'un outil chez le jeune enfant trisomique. In: F.P. Buchel, J.L. Paour, Y. Courbois & U. Sharnhorst U (Eds.), *Attention, mémoire, apprentissage : études sur le retard mental* (p.53-61). Luzerne/CH: Edition SZH/SPC.
- Melyn, M. A., & White, D.T. (1973). Mental and developmental milestones of non-institutionalized Down's syndrome children. *Pediatrics*, 52, 542-545.
- Merton, P. A. (1973). How we control contractions of our muscles. *Scientific American*, 226, 30-37.
- Messinger, D. S., Fogel, A., & Dickson, K. L. (2001). All smiles are positive, but some smiles are more positive than others. *Developmental Psychology*, 37(5), 642.
- Meulenbroek, R. G. J., & van Galen, G. P. (1986). Movement analysis of repetitive writing behavior of first, second and third grade primary school children. In H.S.R. Kao, G.P. van Galen & R. Hoosain (Eds.), *Graphnomics: Contemporary research in handwriting* (pp.71-92). Amsterdam, North-Holland.
- Meulenbroek, R. G. J., & van Galen, G. P. (1988). The acquisition of skilled handwriting: Discontinuous trends in kinematic variables. *Advances in psychology*, 55, 273-281.
- Meulenbroek, R. G. J., & van Galen, G. P. (1989). The production of connecting strokes in cursive writing: Developing co-articulation in 8 to 12 year-old children. In R. Plamondon, C.Y. Suen & M.L. Simner (Eds.), *Computer recognition and human production of handwriting* (pp. 273-286). World Scientific Publication Co.
- Meulenbroek, R. G. J., & van Galen, G. P. (1990). Perceptual-motor complexity of printed and cursive letters. *Journal of experimental education*, 58, 95-110.
- Meulenbroek, R. G. J., Vinter A., & Mounoud, P. (1993). Development of start-rotation principle in circle production. *British Journal of Developmental Psychology*, 11, 307-320.
- Miller, J. (1999). Profiles of language development in children with Down syndrome. In J. Miller, M. Leddy & L. Leavitt (Eds.), *Improving the communication of people with Down syndrome* (11-40). Baltimore: Brookes.
- Mogasale, V. V., Patil, V. D., Patil, N. M., & Mogasale, V. (2012). Prevalence of specific learning disabilities among primary school children in a South Indian city. *The Indian Journal of Pediatrics*, 79(3), 342-347.
- Moldrich, R. X., Dauphinot, L., Laffaire, J., Rossier, J., & Potier, M. C. (2007). Down syndrome gene dosage imbalance on cerebellum development. *Progress in neurobiology*, 82(2), 87-94.
- Moreira, D. A., San Juan, A., Pereira, P. S., & De Souza, C. S. (2000). A case of mosaic trisomy 21 with Down's syndrome signs and normal intellectual development. *Journal of Intellectual Disability Research*, 44(1), 91-96.
- Morss, J. R. (1983) Cognitive development in the Down's syndrome infant: slow or different? *British Journal of Educational Psychology*, 53, 40-47.
- Moss, S. C., & Hogg, J. (1981). Observation and classification of prehension in preschool children: A reliability study. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 52(2), 273-277.
- Moy, E., & Tsao, R. (2012). Handwriting in Adults with Down Syndrome. In A. Van Den Bosch & E. Dubois (Eds.), *New Developments in Down Syndrome Research* (pp. 227-246). New York, NY: Nova Science Publishers.
- Moy, E., Tardif, C., & Tsao, R. (2016). Predictors of Handwriting in Adolescents and Adults with Down Syndrome. *International Journal of Disability, Development and Education*. <http://dx.doi.org/10.1080/1034912X.2016.1183769>
- Murthy, S. K., Malhotra, A. K., Mani, S., Shara, M. E. A., Al-Rowaished, E. E. M., Naveed, S., ... & AlAli, M. T. (2007). Incidence of Down Syndrome in Dubai, UAE. *Medical Principles and Practice*, 16, 25-28.
- Myrelid, Å., Gustafsson, J., Ollars, B., & Annerén, G. (2002). Growth charts for Down's syndrome from birth to 18 years of age. *Archives of disease in childhood*, 87(2), 97-103.
- Nader-Grosbois, N. (1997) Variabilité inter- et intra- individuelles des compétences cognitives et socio-communicatives chez le jeune enfant présentant un retard mental. *Revue francophone de la déficience intellectuelle*, 8, 2, 159-172.
- Nader-Grosbois, N. (2000) *Patterns de développement cognitif et communicatif de jeunes enfants tout-venant et à retard mental* (Thèse de Doctorat). Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve.

- Nader-Grosbois, N. (2001a) Profils longitudinaux cognitifs et communicatifs d'enfants à retard mental. *Revue Francophone de la Déficience Intellectuelle*, 12(2), 145-179.
- Nader-Grosbois, N. (2001b) Relations entre capacités cognitives et communicatives d'enfants à retard mental. *Revue Francophone de la Déficience Intellectuelle*, 12(1), 45-66.
- Nader-Grosbois, N. (2001c) Patterns de développement cognitif d'enfants normaux et retardés mentaux au cours du stade sensori-moteur. *Revue Européenne du handicap mental*, 23(b), 4-27.
- Nader-Grosbois, N. (2006). *Le développement cognitif et communicatif du jeune enfant: Du normal au pathologique*. De Boeck Supérieur.
- Nader-Grosbois, N. (2007). *Régulation, autorégulation, dysrégulation: pistes pour l'intervention et la recherche*. Editions Mardaga.
- Næss, K. A. B., Melby-Lervåg, M., Hulme, C., & Lyster, S. A. H. (2012). Reading skills in children with Down syndrome: A meta-analytic review. *Research in developmental disabilities*, 33(2), 737-747.
- Nakagawa, S., & Schielzeth, H. (2013). A general and simple method for obtaining R² from generalized linear mixed-effects models. *Methods in Ecology and Evolution*, 4(2), 133-142.
- Nelson, C. A., Monk, C. S., Lin, J., Carver, L. J., Thomas, K. M., & Truwit, C. L. (2000). Functional neuroanatomy of spatial working memory in children. *Developmental psychology*, 36(1), 109.
- New B., Pallier C., Ferrand L., Matos R. (2001) Une base de données lexicales du français contemporain sur internet: LEXIQUE, *L'Année Psychologique*, 101, 447-462.
- Noack, N. (1997). Eléments de réflexion sur le développement et les caractéristiques psychomotrices du sujet porteur d'une trisomie 21: Trisomie 21. *Évolutions psychomotrices*, (36), 59-81.
- Noack, N. (1999). Education précoce : les apports possibles d'une prise en charge psychomotricité précoce dans le cadre de l'éducation précoce. *GEIST SOLEIL*, 20, 10-13.
- Noyer, M., & Baldy, R. (2002). Du dessin à la lecture et à l'écriture. *Psychologie et éducation*, 49, 73-88.
- Oken-Wright, P. (1998). Transition to Writing: Drawing as a Scaffold for Emergent Writers. *Young Children*, 53(2), 76-81.
- Olsen, C. L., Cross, P. K., & Gensburg, L. J. (2003). Down Syndrome: Interaction between Culture, Demography, and Biology in determining the prevalence of a genetic trait. *Human Biology*, 75(4), 503-520.
- Organisation Mondiale de la Santé (1993). *CIM-10 - Classification internationale des troubles mentaux et des troubles du comportement : critères diagnostiques pour la recherche*. Paris : Masson.
- Organisation Mondiale de la Santé (2001). *Classification internationale du fonctionnement, du handicap et de la santé : CIF*. Genève : Organisation mondiale de la Santé. Repéré à l'adresse http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/42418/1/9242545422_fre.pdf
- Orphanet (2014). Les cahiers d'Orphanet - Prévalence des maladies rares : Données bibliographiques. Classement par prévalence décroissante ou par nombre de cas publiés. *Série Maladies Rares, Mai* (2).
- Orsini-Bouichou, F., Hurtig, M., Paour, J.-L. & Planche, P. (1990) Une méthode d'apprentissage destinée à analyser les relations entre développement et fonctionnement cognitif. In G. Netchine-Grynberg (Ed.), *Développement et fonctionnement cognitif chez l'enfant : des modèles généraux aux modèles locaux* (pp. 223-245). Paris : Presses Universitaires de France.
- Pagani, L. S., Vitaro, F., Tremblay, R. E., McDuff, P., Japel, C., & Larose, S. (2008). When predictions fail: The case of unexpected pathways toward high school dropout. *Journal of Social Issues*, 64(1), 175-194.
- Paillard, J. (1990). Les bases nerveuses du contrôle visuo-manuel de l'écriture. In C. Sirat, J. Irigoien & E. Poulle, E. (Eds.), *L'écriture, le cerveau, l'œil et la main* (pp. 23-52). Paris : Brepols.
- Paillard, J. (1991). Motor and representational framing of space. In J. Paillard (Ed.), *Brain and space* (pp. 163-182). Oxford, England: Oxford University Press.
- Palisano, R. J., Walter, S. D., Russell, D. J., Rosenbaum, P. L., Gémus, M., Galuppi, B. E., & Cunningham, L. (2001). Gross motor function of children with Down syndrome: creation of motor growth curves. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 82(4), 494-500.

- Paoletti, R. (1999). *Éducation et motricité de l'enfant de 2 à 8 ans*. Montréal : Gaëtan Morin.
- Paoloni-Giacobino, A., Lemieux, N., Lemyre, E., & Lespinasse, J. (2007). Specific language impairment as the prominent feature in a patient with a low-level trisomy 21 mosaicism. *Journal of Intellectual Disability Research, 51*(5), 401-405.
- Papavassiliou, P., York, T. P., Gursoy, N., Hill, G., Nicely, L. V., Sundaram, U., ... & Jackson-Cook, C. (2009). The phenotype of persons having mosaicism for trisomy 21/Down syndrome reflects the percentage of trisomic cells present in different tissues. *American journal of medical genetics Part A, 149*(4), 573-583.
- Pennington, B.F., & Bennetto, L. (1998). Toward a neuropsychology of mental retardation. In J.A. Burack, R.M. Hodapp, & E. Zigler. *Handbook of mental retardation and development*. Cambridge : Cambridge University Press.
- Pennington, B. F., Moon, J., Edgin, J., Stedron, J., & Nadel, L. (2003). The neuropsychology of Down syndrome: Evidence for hippocampal dysfunction. *Child Development, 74*, 75-93.
- Penrose, L. S. (1949). The incidence of mongolism in the general population. *The British Journal of Psychiatry, 95*(400), 685-688.
- Perret, P., & Faure, S. (2006). Les fondements de la psychopathologie développementale. *Enfance, 58*(4), 317.
- Perron, R., & Coumes, F. (1964). Etude génétique des traces graphiques. In J. de Ajuriaguerra (Ed.), *L'écriture de l'enfant. Tome I. L'évolution de l'écriture et ses difficultés* (pp. 1-9). Neuchâtel : Delachaux et Niestlé.
- Perron-Borelli, M. (1996). *Echelles Différentielles d'Efficiences Intellectuelles, forme révisée*. Issy Les Moulineaux: EAP.
- Phelps, J., Stempel, L., & Speck, G. (1985). The children's handwriting scale: A new diagnostic tool. *The Journal of Educational Research, 79*(1), 46-50.
- Pinter, J. D., Eliez, S., Schmitt, J. E., Capone, G. T., & Reiss, A. L. (2001). Neuroanatomy of Down's syndrome: a high-resolution MRI study. *American Journal of Psychiatry, 158*(10), 1659-1665.
- Pitrou, M., & Thibault, C. (2012). *L'Aide-mémoire des troubles du langage et de la communication: L'orthophonie à tous les âges de la vie*. Dunod.
- Poirier, P., & Després, J. P. (2003). Obésité et maladies cardiovasculaires. *M/S: Médecine Sciences, 19*(10), 943-949.
- Portier, S. J., Van Galen, G. P., & Meulenbroek, R. G. (1990). Practice and the dynamics of handwriting performance: Evidence for a shift of motor programming load. *Journal of motor behavior, 22*(4), 474-492.
- Poulin-Dubois, D., & Graham, S. A. (1994). Infant categorization and early object word meaning. In A. Vyt, H. Bloch, M.H. Bornstein (Eds.), *Early child development in the French tradition. Contributions from Current Research* (pp. 207-225). Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Prasher, V. P. (1995). Overweight and obesity amongst Down's syndrome adults. *Journal of Intellectual Disability Research, 39*(5), 437-441.
- Preminger, F., Weiss, P. L. T., & Weintraub, N. (2004). Predicting occupational performance: Handwriting versus keyboarding. *American Journal of Occupational Therapy, 58*(2), 193-201.
- R Development Core Team (2008). R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. <http://www.R-project.org>.
- Racine, M. B., Majnemer, A., Shevell, M., & Snider, L. (2008). Handwriting performance in children with attention deficit hyperactivity disorder (ADHD). *Journal of Child Neurology, 23*(4), 399-406.
- Ravaud J.-F. (2001). Vers un modèle social du handicap : L'influence des organisations internationales et des mouvements des personnes handicapées. In Riedmatten De R., (Éd.), *Une nouvelle approche de la différence : Comment repenser le handicap* (pp. 55-68). Genève : Édition Médecine et Hygiène.
- Raven, J., Raven, J. C., & Court, J. H. (1998). *Manual for Raven's Progressive Matrices and Vocabulary Scales. Section 2: The Coloured Progressive Matrices*. Oxford: Oxford Psychologists Press/San Antonio, TX: The Psychological Corporation.

- Re, A. M., Pedron, M., & Cornoldi, C. (2007). Expressive writing difficulties in children described as exhibiting ADHD symptoms. *Journal of Learning Disabilities, 40*(3), 244-255.
- Rethoré, M-O., Bléhaut, H., De Kermadec S., Mircher, C., De Portzamparc, V., Ravel, A., & Toulas, J. (2005). *Trisomie 21. Guide à l'usage des familles et de leur entourage*. Paris : Bash
- Rigoldi, C., Galli, M., & Albertini, G. (2011). Gait development during lifespan in subjects with Down. *Research in developmental disabilities, 32*(1), 158-163.
- Rigoldi, C., Galli, M., Mainardi, L., Crivellini, M., & Albertini, G. (2011). Postural control in children, teenagers and adults with Down syndrome. *Research in developmental disabilities, 32*(1), 170-175.
- Robert, E., Pradat, P., & Laborier, J. C. (1997). Variations de prévalence de la trisomie 21 dans la région France/Centre-Est entre 1979 et 1993. *BEH, 9*, 35-6.
- Roberts, J. E., Price, J., & Malkin, C. (2007). Language and communication development in Down syndrome. *Mental retardation and developmental disabilities research reviews, 13*(1), 26-35.
- Roche, O. (2004). *Trisomie 21*. Encyclopédie Orphanet.
- Rondal, J. A. (1995). *Exceptional Language Development in Down Syndrome: Implications for the Cognition-Language Relationship*. Cambridge University Press.
- Rondal, J.-A. (2009). *Psycholinguistique du handicap mental*. Marseille: Solal.
- Rosenbaum, D. A. (1991). *Human motor control*. New York: Academic Press.
- Rosenblum, S. (2015). Do motor ability and handwriting kinematic measures predict organizational ability among children with Developmental Coordination Disorders? *Human movement science, 43*, 201-215.
- Rosenblum, S., Dvorkin, A. Y., & Weiss, P. L. (2006). Automatic segmentation as a tool for examining the handwriting process of children with dysgraphic and proficient handwriting. *Human movement science, 25*(4), 608-621.
- Rosenblum, S., & Livneh-Zirinski, M. (2008). Handwriting process and product characteristics of children diagnosed with developmental coordination disorder. *Human Movement Science, 27*(2), 200-214.
- Rosenblum, S., Parush, S., & Weiss, P. L. (2003a). Computerized temporal handwriting characteristics of proficient and non-proficient handwriters. *American Journal of Occupational Therapy, 57*(2), 129-138.
- Rosenblum, S., S. Parush & Weiss, P. L. (2003b). The In Air phenomenon: Temporal and spatial correlates of the handwriting process. *Perceptual and Motor Skills, 96*, 933-954.
- Rosenblum, S., Weiss, P. L., & Parush, S. (2003). Product and process evaluation of handwriting difficulties. *Educational Psychology Review, 15*(1), 41-81.
- Rosenblum, S., Weiss, P. L., & Parush, S. (2004). Handwriting evaluation for developmental dysgraphia: Process versus product. *Reading and writing, 17*(5), 433-458.
- Rouleau, B. (2007). *Beneton Movie GIF* (version 1.1.2.) [Logiciel]. http://www.benetonsoftware.com/Beneton_Movie_GIF.php?lang=fr
- Rousseau, T., Amar, E., Ferdynus, C., Thauvin-Robinet, C., Gouyon, J. B., & Sagot, P. (2010). Variations de prévalence de la trisomie 21 en population française entre 1978 et 2005. *Journal de Gynécologie Obstétrique et Biologie de la Reproduction, 39*(4), 290-296.
- Rubin, N., & Henderson, S.E. (1982). Two sides of the same coin: variations in teaching methods and failure to learn to write. *Special Education: Forward Trends, 9*, 17-24.
- Sage, I. H. (2010). *Écriture et processus psychomoteurs, cognitifs et conatifs chez les enfants âgés de 8 à 12 ans* (Thèse de doctorat). Université de Genève.
- Sage, I., Zesiger, P., & Garitte, C. (2009). Processus psychomoteurs et psychologiques influençant l'écriture chez des enfants âgés de 8 à 12 ans: étude fondée sur l'échelle d'évaluation rapide de l'écriture chez l'enfant (test BHK). *ANAE. Approche neuropsychologique des apprentissages chez l'enfant, (104-05)*, 384-390.
- Santamaria, M., & Albaret, J. M. (1996). Troubles graphomoteurs chez les enfants d'intelligence supérieure. *Evolutions Psychomotrices, 8*(33).

- Sausset, S., Lambert, E., Olive, T., & Larocque, D. (2012). Processing of syllables during handwriting: Effects of graphomotor constraints. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 65(10), 1872-1879.
- Savelsbergh, G. J., van der Kamp, J., & Davis, W. E. (2001). Perception-action coupling in grasping of children with Down syndrome. *Adapted Physical Activity Quarterly*, 18(4), 451-457.
- Schaefer, G. B., & Bodensteiner, J. B. (1992). Evaluation of the child with idiopathic mental retardation. *Pediatric Clinics of North America*, 39(4), 929-943.
- Schlienger, J. L., Luca, F., Vinzio, S., & Pradignac, A. (2009). Obésité et cancer. *La Revue de médecine interne*, 30(9), 776-782.
- Schmidt-Sidor, B., Wisniewski, K. E., Shepard, T. H., & Sersen, E. A. (1989). Brain growth in Down syndrome subjects 15 to 22 weeks of gestational age and birth to 60 months. *Clinical neuropathology*, 9(4), 181-190.
- Schneck, C. M., & Henderson, A. (1990). Descriptive Analysis of the Developmental Progression of Grip Position for Pencil and Crayon Control in Nondysfunctional Children. *American Journal of Occupational Therapy*, 44(10), 893-900.
- Schneider, K. A., Murray, C. W., Shaddock, R. D. & Meyers, D. G. (2006). Legibility of doctors' handwriting is as good (or bad) as everyone else's. *Quality & Safety in Health Care*, 15, 445.
- Schwellnus, H., Carnahan, H., Kushki, A., Polatajko, H., Missiuna, C., & Chau, T. (2012). Effect of pencil grasp on the speed and legibility of handwriting after a 10-minute copy task in Grade 4 children. *Australian Occupational Therapy Journal*, 59(3), 180-187.
- Selin, A. S. (2003). *Pencil grip: a descriptive model and four empirical studies*. Abo: Abo Akademi University Press.
- Sermier Dessemontet, R., & Morin, D. (2012). Les limites des tests d'intelligence et leurs implications pour le diagnostic de la déficience intellectuelle. *Revue québécoise de psychologie*, 1(33), 103-116.
- Seynhaeve, I., & Nader-Grosbois, N. (2005). Trajectoires développementales et particularités dysfonctionnelles de trois enfants à trisomie 21 en période sensori-motrice. *Revue francophone de la déficience intellectuelle*, 16(1-2), 137-159.
- Shields, N., & Dodd, K. (2004). A systematic review on the effects of exercise programmes designed to improve strength for people with Down syndrome. *Physical Therapy Reviews*, 9(2), 109-115.
- Shipe, D., Reisman, L., Chung, C.-Y., Darnell, A., & Kelly, S. (1968). The relationship between cytogenetic constitution, physical stigmata, and intelligence in Down's Syndrome. *American Journal of Mental Deficiency*, 72, 789-797.
- Sigman, M., & Ruskin, E. (1999). *Continuity and change in the social competence of children with autism, Down syndrome and developmental delays*. Monograph of the Society for Research in Child Development. Malden MA, USA: Blackwells.
- Simner, M. L. (1981). The grammar of action and children's printing. *Developmental Psychology*, 17(6), 866.
- Simon, D. A., Elliott, D. & Anson, J. G. (2003). Perceptual-motor behaviour in children with Down syndrome. In G. Savelsbergh, K. Davids, J. van der Kamp & S.J. Bennett (Eds.), *Development of movement co-ordination in children: Applications in the fields of ergonomics, health sciences and sport* (pp. 133-155). London: Routledge.
- Simon, D. A., Watson, C., & Elliott, D. (2005). Spatial coding for items of varying semantic value in adults with and without Down syndrome. *Journal on Developmental Disabilities*, 12, 63-72.
- Sloper, P., Cunningham, C., Turner, S., & Knussen, C. (1990). Factors related to the academic attainment of children with Down syndrome. *British Journal of Educational Psychology*, 60, 284-298.
- Smits-Engelsman, B. C., Niemeijer, A. S., & van Galen, G. P. (2001). Fine motor deficiencies in children diagnosed as DCD based on poor grapho-motor ability. *Human movement science*, 20, 161-182.
- Smits-Engelsman, B. C., van Galen, G. P., & Portier, S. J. (1994). Psychomotor aspects of poor handwriting in children. In M.L. Simner, W. Hulstijn & P.L. Girouard (Eds.), *Contemporary Issues in Forensic, Developmental, and Neurological Aspects of Handwriting*. Toronto : Association of Forensic Document Examiners.
- Smyth, M. M., & Silvers, G. (1987). Functions of vision in the control of handwriting. *Acta Psychologica*, 65, 47-64.

- Soppelsa, R., & Albaret, J. M. (2012). Evaluation de l'écriture chez l'adolescent : Le BHK Ado. *Les Entretiens de Bichat*, 66-77.
- Soppelsa, R., & Albaret, J.-M. (2004). La rééducation psychomotrice de la motricité manuelle, des praxies constructives et de la graphomotricité. In C. Billard, M. Touzin, J.-M. Albaret, P. Gillet & O. Revol (Eds.), *L'état des connaissances. Livret 5 : Fonctions non-verbales* (pp. 75-81). Paris : Signes éditions.
- Soppelsa, R., & Albaret, J.-M. (2013). *BHK Ado – Échelle d'évaluation rapide de l'écriture chez l'adolescent*. Paris : ECPA.
- Søvik, N., Arntzen, O., Samuelstuen, M., & Heggberget, M. (1994). Relations between linguistic wordgroups and writing. In C. Faure, P. Keuss, G. Lorette & A. Vinter (Eds.) *Advances in Handwriting and Drawing, A Multidisciplinary Approach* (pp. 231-246). Paris: Europia Press.
- Søvik, N., Arntzen, O., & Thygesen, R. (1987a). Relation of spelling and writing in learning disabilities. *Perceptual and Motor Skills*, 64(1), 219-236.
- Søvik, N., Arntzen, O., & Thygesen, R. (1987b). Writing characteristics of normal, dyslexic and dysgraphic children. *Journal of Human Movement Studies*, 13(4), 171-187.
- Stevens, A. C. (2008). The effects of typical and atypical grasps on endurance and fatigue in handwriting (Doctoral dissertation). Denton, TX. Texas Woman's University.
- Stott, D. H., Moyes, F. A., and Henderson, S. E. (1984). *Diagnosis and Remediation of Handwriting Problems*, Hayes Publishers, Burlington, ON.
- Strømme, P., & Hagberg, G. (2000). Aetiology in severe and mild mental retardation: a population-based study of Norwegian children. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 42(02), 76-86.
- Styles, M. E., Cole, T. J., Dennis, J., & Preece, M. A. (2002). New cross sectional stature, weight, and head circumference references for Down's syndrome in the UK and Republic of Ireland. *Archives of disease in childhood*, 87(2), 104-108.
- Taylor, H. G., & Heilman, K. M. (1980). Left-Hemisphere Motor Dominance in Righthanders. *Cortex*, 16(4), 587-603.
- Teulings, H.-L., & Schomaker, L.R. (1993). Invariant properties between stroke features in handwriting. *Acta psychologica*, 83, 69-88.
- Teulings, H.-L., Thomassen, A. J. W. M., & van Galen, G. P. (1986). Invariants in handwriting: The information contained in a motor program. In H.S.R. Kao, G.P. van Galen & R. Hoosain (Eds.), *Graphonomics: Contemporary research in handwriting* (pp. 305-315). Elsevier Science, North-Holland.
- Thomassen, A. J. W. M., & Teulings, H.-L. (1983). The development of handwriting. In M. Martlew (Ed.), *The psychology of written language* (pp. 179-213). New York: John Wiley.
- Thomassen, A. J. W. M., & Teulings, H.-L. (1985). Time, size and shape in handwriting: Exploring spatio-temporal relationships at different levels. In J.A. Michon & J.L. Jackson (Eds.), *Time, mind and behavior* (pp. 253-263). Heidelberg, Springer Verlag.
- Thombs, B., & Sugden, D. (1991). Manual skills in Down syndrome children ages 6 to 16 years. *Adapted Physical Activity Quarterly*, 8(3).
- Tjepkema, M. (2006). Obésité chez les adultes. *Rapports sur la santé*, 17(3), 9-26.
- Tourrette, C. (2014). *Évaluer les enfants avec déficiences ou troubles du développement (2ème édition)*. Paris: Dunod.
- Trenholm, B., & Miranda, P. (2006). Home and community literacy experiences of individuals with Down syndrome. *Down Syndrome Research and Practice*, 10(1), 30-40.
- Tsao, R., Fartoukh, M., & Barbier, M.-L. (2011). Handwriting in adults with Down syndrome. *Journal of Intellectual & Developmental Disability*, 36(1), 20-26.
- Tsao, R., & Kindelberger, C. (2009). Variability of cognitive development in children with Down syndrome: Relevance of good reasons for using the cluster procedure. *Research in Developmental Disabilities*, 30(3), 426-432.

- Tsao, R., Kindelberger, C., de Fréminville, B., Touraine, R. & Bussy, G. (2015). Variability of the Aging Process in Dementia-Free Adults with Down Syndrome. *American Journal of Intellectual and Developmental Disabilities, 120*, 3-15.
- Tsao, R., & Mellier, D. (2005). Étude des habiletés graphomotrices chez l'enfant et l'adulte porteurs de trisomie 21: approche développementale et comparative. *Neuropsychiatrie de l'enfance et de l'adolescence, 53*(8), 401-406.
- Tsao, R., Moy, E., & Tardif, C. (2014). Étude de l'écriture chez l'enfant et adulte porteurs de trisomie 21 : bilan et perspectives de recherche. *A.N.A.E. Approche Neuropsychologique Des Apprentissages Chez L'enfant, 26*(4), 412-419.
- Tsao, R., Moy, E., Velay, J.-L., Carvalho, N. & Tardif, C. (en révision). Handwriting Dynamics: Analysis of Handwriting Produced by Children and Adults with Down Syndrome. *American Journal on Intellectual and Developmental Disabilities*.
- Tsao, R., Velay, J.-L., Barbier, M.-L., & Gombert, A. (2012). Etude de l'écriture chez des adultes porteurs de trisomie 21. *Revue francophone de la déficience intellectuelle, 23*, 22-33.
- Tseng, M. H., & Cermak, S. A. (1993). The influence of ergonomic factors and perceptual-motor abilities on handwriting performance. *American Journal of Occupational Therapy, 47*(10), 919-926.
- Tseng, M. H., & Chow, S. M. (2000). Perceptual-motor function of school-age children with slow handwriting speed. *American Journal of Occupational Therapy, 54*(1), 83-88.
- Tseng, M. H., & Murray, E. A. (1994). Differences in perceptual-motor measures in children with good and poor handwriting. *OTJR: Occupation, Participation and Health, 14*(1), 19-36.
- Tucha, O., Mecklinger, L., Walitza, S., & Lange, K. W. (2006). Attention and movement execution during handwriting. *Human movement science, 25*(4), 536-552.
- Tudella, E., Pereira, K., Basso, R. P., & Savelsbergh, G. J. (2011). Description of the motor development of 3-12 month old infants with Down syndrome: The influence of the postural body position. *Research in developmental disabilities, 32*(5), 1514-1520.
- Turner, S., & Alborz, A. (2003). Academic attainments of children with Down's syndrome: A longitudinal study. *British Journal of Educational Psychology, 73*, 563-583.
- Turner, S., Alborz, A., & Gayle, V. (2008). Predictors of academic attainments of young people with Down's syndrome. *Journal of Intellectual Disability Research, 52*(5), 380-392.
- UK Growth Chart 2-18 years (2013). *Royal College of Paediatrics and Child Health, 1*(2).
- Ulrich, B. D., Ulrich, D. A., Angulo-Kinzler, R., & Chapman, D. D. (1997). Sensitivity of infants with and without Down syndrome to intrinsic dynamics. *Research Quarterly for Exercise and Sport, 68*(1), 10-19.
- Uyanik, M., Bumin, G. & Kayihan, H. (2003) Comparison of different therapy approaches in children with Down Syndrome. *Pediatrics International, 45*, 68-73.
- Vaginay, D. (1995). L'appropriation de la lecture-écriture chez le trisomique apprenant. In FAIT21 (Ed.), *Les actes des journées nationales et européennes sur la trisomie 21 : Trisomie 21 et Intégration*. Maubeuge.
- van Belle, J., van Hulst, B. M., & Durston, S. (2015). Developmental differences in intra-individual variability in children with ADHD and ASD. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, 56*(12), 1316-1326.
- van Doorn, R. R. A. & Keuss, P. J. G. (1992). The role of vision in the temporal and spatial control of handwriting, *Acta Psychologica, 81*, 269--286.
- van Doorn, R. R. A., & Keuss, P. J. G. (1993). Spatial invariance of handwriting - A matter of definition. *Reading & Writing, 5*, 281-296.
- van Galen, G. P. (1991). Handwriting: Issues for a psychomotor theory. *Human Movement Science, 10*, 165-191.
- van Galen, G. P., Portier, S. J., Smits-Engelmans, B. C. M., & Schomaker, L. R. B. (1993). Neuromotor noise and poor handwriting in children. *Acta Psychologica, 82*, 161-178.
- van Galen, G. P., & Teulings, H-L. (1983). The independent monitoring of form and scale factors in handwriting, *Acta Psychologica, 54*, 9--22.

- van Galen, G. P., Van Doorn, R. R., & Schomaker, L. R. (1990). Effects of motor programming on the power spectral density function of finger and wrist movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16(4), 755.
- van Hoorn, J. F., Maathuis, C. G., Peters, L. H., & Hadders-Algra, M. (2010). Handwriting, visuomotor integration, and neurological condition at school age. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 52(10), 941-947.
- van Sommers, P. (1984). *Drawing and cognition: Descriptive and experimental studies of graphic production processes*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Varuzza, C., De Rose, P., Vicari, S., & Menghini, D. (2015). Writing abilities in intellectual disabilities: A comparison between Down and Williams syndrome. *Research in developmental disabilities*, 37, 135-142.
- Vicari, S. (2001). Implicit versus explicit memory function in children with down & Williams syndrome. *Down syndrome research and practice*, 7, 35-40.
- Vicari, S. (2005). Profils mnésiques distincts chez des enfants atteints du Down ou du syndrome de Williams. *Enfance*, 3, 241-252.
- Vicari, S. (2006). Motor development and neuropsychological patterns in persons with Down syndrome. *Behavior genetics*, 36(3), 355-364.
- Vicari, S., Verucci, L., & Carlesimo, G. A. (2007). Implicit memory is independent from IQ and age but not from etiology: evidence from Down and Williams syndromes. *Journal of Intellectual Disability Research*, 51(12), 932-941.
- Vinter, S. (2008). Perceptions sensorielles, premières interactions : cadre pour une éducation précoce. In Lacombe D. & Brun V. (Eds.), *Trisomie 21, communication et insertion* (pp. 21-34). Issy-les-Moulineaux: Elsevier Masson.
- Vinter, A., & Chartrel, E. (2010). Effects of different types of learning on handwriting movements in young children. *Learning and Instruction*, 20(6), 476-486.
- Vinter, A., & Zesiger, P. (2007). L'écriture chez l'enfant: Apprentissage, troubles et évaluation. In S. Ionescu & A. Blanchet (Eds.), *Psychologie du Développement et de l'Éducation* (p. 327-351). Paris : PUF.
- Vinter, A., & Zesiger, P. (2008). L'activité d'écriture : Acquisition, évaluation et troubles. In J. Lautrey (Ed.), *Psychologie de Développement et de l'Éducation*. IED, Paris.
- Viviani, P. (1994). Les habiletés motrices. In M. Richelle, J. Requin, & M. Robert (Eds.), *Traité de psychologie expérimentale* (pp. 777-844). Paris: PUF.
- Viviani, P., & Schneider, R. (1991). A developmental study of the relation between geometry and kinematics in drawing movements. *Journal of experimental psychology : Human perception and performance*, 17, 198-218.
- Volman, M. J., van Schendel, B. M., & Jongmans, M. J. (2006). Handwriting difficulties in primary school children: A search for underlying mechanisms. *American Journal of Occupational Therapy*, 60, 451-460.
- Vuillerme, N., Marin, L., & Debû, B. (2001). Assessment of static postural control in teenagers with Down syndrome. *Adapted Physical Activity Quarterly*, 18(4), 417-433.
- Wallen, M., Bonney, M. A. & Lennox, L. (1996). *The handwriting speed test*. Adelaide, South Australia: Helios.
- Wang, P. P., & Bellugi, U. (1993). Williams syndrome, Down syndrome, and cognitive neuroscience. *American Journal of Diseases of Children*, 147(11), 1246-1251.
- Wang, P. P., & Bellugi, U. (1994). Evidence from two genetic syndromes for a dissociation between verbal and visual-spatial short-term memory. *Journal of clinical and experimental Neuropsychology*, 16(2), 317-322.
- Wang, P. P., Doherty, S., Hesselink, J. R., & Bellugi, U. (1992). Callosal morphology concurs with neurobehavioral and neuropathological findings in two neurodevelopmental disorders. *Archives of Neurology*, 49(4), 407-411.
- Wang, P. P., Doherty, S., Rourke, S. B., & Bellugi, U. (1995). Unique profile of visuo-perceptual skills in a genetic syndrome. *Brain and cognition*, 29(1), 54-65.
- Wann, J. P., & Kardirkamanathan, M. (1991). Variability in children's handwriting : Computer diagnosis of writing difficulties. In J. Wann, A.M. Wing & N. Sovik (Eds.), *The development of graphic skills* (pp. 223-236). Londres, Academic Press.

- Wann, J., & Nimmo-Smith, I. (1991). The control of pen pressure in handwriting: A subtle point. *Human Movement Science, 10*(2), 223-246.
- Ward, O.C. (1999). John Langdon Down: The Man and the Message. *Down Syndrome Research and Practice, 6*(1), 19-24.
- Weil, M. J., & Amundson, S. J. C. (1994). Relationship between visuomotor and handwriting skills of children in kindergarten. *American Journal of Occupational Therapy, 48*(11), 982-988.
- Weinstein, C. E., Hume, L. M., & Aussanaire, M. (2000). *Stratégies pour un apprentissage durable*. De Boeck Supérieur.
- Weintraub, N., & Graham, S. (2000). The Contribution of Gender, Orthographic, Finger Function, and Visual-Motor Processes to the Prediction of Handwriting Status. *OTJR: Occupation, Participation and Health, 20*(2), 121-140.
- Weiss, B., Weisz, J. R., & Bromfield, R. (1986). Performance of retarded and nonretarded persons on information-processing tasks: Further tests of the similar structure hypothesis. *Psychological Bulletin, 100*(2), 157.
- Weisz, J. R., & Yeates, K. O. (1981). Cognitive development in retarded and nonretarded persons: Piagetian tests of the similar structure hypothesis. *Psychological Bulletin, 90*(1), 153.
- Weisz, J., Yeates, K., & Zigler, E. (1982). Piagetian evidence and the developmental difference controversy. In E. Zigler & D. Balla (Eds.), *Mental retardation: The developmental-difference controversy* (pp. 213-276). Hillsdale, NJ: Erlbaum
- Whitman, T.L. (1990). Self-regulation and mental retardation. *American Journal on Mental Retardation, 94*(4), 347-362.
- Wishart, J.G. (1990). Early learning and development in infants and young children with Down's syndrome. In E. Chigier (Ed.), *Looking up at Down Syndrome* (pp. 149-162). London, England: Freund Publishing House LTD.
- Wisniewski, K. E. (1990). Down syndrome children often have brain with maturation delay, retardation of growth, and cortical dysgenesis. *American Journal of Medical Genetics, 37*(S7), 274-281.
- Wong, Y. J., & Whishaw, I. Q. (2004). Precision grasps of children and young and old adults: individual differences in digit contact strategy, purchase pattern, and digit posture. *Behavioural brain research, 154*(1), 113-123.
- Wood, S. N. (2006). *Generalized Additive Models: An Introduction with R*. Boca Raton, Florida: Chapman and Hall/CRC.
- Wright, C. D., & Wright, J. P. (1980). Handwriting: The Effectiveness of Copying from Moving versus Still Models. *Journal of Educational Research, 74*(2).
- Wuang, Y. P., Wang, C. C., Huang, M. H., & Su, C. Y. (2008). Profiles and cognitive predictors of motor functions among early school-age children with mild intellectual disabilities. *Journal of Intellectual Disability Research, 52*(12), 1048-1060.
- Yamagata, K. (2007). Differential emergence of representational systems: Drawings, letters, and numerals. *Cognitive development, 22*, 244-257.
- Yang, Y., Conners, F. A., & Merrill, E. C. (2014). Visuo-spatial ability in individuals with Down syndrome: Is it really a strength? *Research in developmental disabilities, 35*(7), 1473-1500.
- Yang, Q., Rasmussen, S. A., & Friedman, J. M. (2002). Mortality associated with Down's syndrome in the USA from 1983 to 1997: a population-based study. *The Lancet, 359*(9311), 1019-1025.
- Yeargin-Allxopp, M., Murphy, C. C., Cordero, J. F., Decoufle, P., & Hollowell, J. G. (1997). Reported biomedical causes and associated medical conditions for mental retardation among 10-year-old children, metropolitan Atlanta, 1985 to 1987. *Developmental Medicine & Child Neurology, 39*(3), 142-149.
- Zazzo, R. (1965). La notion d'hétérochronie dans le diagnostic de la débilité mentale. *Revue de Neuropsychiatrie Infantile, 4-5*, 241-246.

-
- Zazzo, R. (1973). Les débilés mentaux. In R. Reuchlin (Ed.), *Traité de psychologie appliquée. Tome 7 : La psychologie appliquée au diagnostic des handicaps et rééducation* (pp. 193-248). Paris: Presse Universitaire Française.
- Zazzo, R. (1979). *Les défibilités mentales*. Paris: A. Colin
- Zesiger, P. (1995). *Ecrire: Approches cognitive, neuropsychologique et développementale*. Paris, France: Presses Universitaires de France.
- Zesiger, P. (2000). Orthographe et écriture. In J.-A. Rondal & X. Seron (Eds.), *Troubles du langage: bases théoriques, diagnostic et rééducation* (pp.289-310). Sprimont, Belgique : Mardaga.
- Zesiger, P. (2003). Acquisition et troubles de l'écriture. *Enfance*, 1, 56-64.
- Zesiger, P., Deonna, T., & Mayor, C. (2000). L'acquisition de l'écriture. *Enfance*, 53(3), 295-304.
- Zickler, C. F., Morrow, J. D., & Bull, M. J. (1998). Infants with Down syndrome: A look at temperament. *Journal of Pediatric Health Care*, 12(3), 111-117.
- Zigler, E. (1969). Developmental versus difference theories of mental retardation and the problem of motivation. *American Journal of Mental Deficiency*, 73, 536-556.
- Zimmerman, D. W., & Zumbo, Bruno, D. (1993). Relative power of the Wilcoxon test, the Friedman test, and repeated-measures ANOVA on ranks. *Journal of Experimental Education*, 62, 75-86.
- Ziviani, J. (1984). Some elaborations on handwriting speed in 7- to 14-year-olds. *Perceptual and motor skills*, 58, 535-539.
- Ziviani, J., & Elkins, J. (1984). An Evaluation of Handwriting Performance. *Educational Review*, 36(3).
- Ziviani, J. M. & Wallen, M. (2006). The Development of Graphomotor Skills. In A. Henderson and C. Pehoski (Eds.), *Hand Function in the Child: Foundations for Remediation 2nd ed.* (pp. 217-236). Philadelphia, USA: Mosby Elsevier.

Annexe A - Questionnaire d'intérêt porté à l'écriture et son autoévaluation dans le groupe T21

QUESTIONNAIRE D'AUTOEVALUATION

A faire remplir par le participant

NOM :

Prénom :

Entoure la réponse pour chaque phrase :

	Jamais	Rarement	Parfois	Souvent	Tout le temps
J'aime bien l'école					
J'aime bien écrire					
J'écoute en classe					
J'écris vite					
J'aime bien lire					
Je fais des efforts pour mieux écrire					
J'ai une belle écriture					

Coche la réponse ou les réponses si tu es d'accord :

Quand j'écris... ... j'ai mal à la main

... j'ai mal au bras

... je dois m'arrêter souvent

... j'ai du mal à accélérer

... j'ai la main qui transpire

... j'ai la main qui tremble

Pour moi, écrire c'est... ... faire comme les grands

... ennuyeux, ça ne sert à rien

... pour l'école ou faire mes devoirs

... pour réfléchir

... pour donner des nouvelles aux amis ou la famille

Figure A1. Items de réponse composant le questionnaire distribué auprès des participants T21.

Tableau A1. Effectifs des réponses pour chaque item évaluant l'intérêt pour l'écriture et sur l'autoévaluation chez les participants T21.

Item	Fréquence				
	Jamais	Rarement	Parfois	Souvent	Tout le temps
J'aime bien écrire	1	0	4	5	9
J'ai une belle écriture	1	0	3	5	10
J'écris vite	1	1	4	6	7
Je fais des efforts pour mieux écrire	1	0	6	4	8

Tableau A2. Effectifs d'items cochés (Oui) ou non cochés (Non) sur le rôle de l'écriture d'après les participants T21.

Item	Réponse	
	Oui	Non
Donner des nouvelles aux amis ou à la famille	17	2
Réfléchir et apprendre	17	2
Faire comme les grands	17	2
Pour l'école, faire mes devoirs ou au travail	9	10
Ennuyeux, ça ne sert à rien	0	19

Tableau A3. Effectifs d'items cochés (Oui) ou non cochés (Non) sur les contraintes physiques rencontrées lors de l'écriture chez les participants T21.

Item	Réponse	
	Oui	Non
J'ai du mal à accélérer	9	10
J'ai la main qui tremble	9	10
Je dois m'arrêter souvent	7	12
J'ai la main qui transpire	6	13
J'ai mal au bras	3	16
J'ai mal à la main	1	18

Annexe B - Lettre d'information et formulaire de consentement



Etude de l'écriture chez des enfants et adultes porteurs de trisomie 21 : Approche développementale et comparative

Eloïse MOY (eloise.moy@etu.univ-amu.fr),

Etudiante en Doctorat de Psychologie du développement

Carole TARDIF (carole.tardif@univ-amu.fr)
Professeur de Psychologie et Psychopathologie
du Développement

Raphaele TSAO (raphaele.tsao@univ-amu.fr)
Maitre de conférences, Psychologue et
Vice-présidente Trisomie 21 Bouches-du-Rhône

Aix-en-Provence, le 17/01/2014,

Madame, Monsieur,

Par la présente, nous vous demandons l'autorisation de participation de votre enfant à la recherche intitulée «Etude de l'écriture chez des enfants et adultes porteurs de trisomie 21 : Approche développementale et comparative ».

Conformément à la loi, nous vous proposons de lire attentivement cette notice d'information qui a pour but de répondre aux questions que vous seriez susceptible de vous poser avant de faire part de votre décision.

❖ **Quel est l'objectif de la recherche ?**

Ce projet de thèse porte sur l'étude du développement du geste d'écriture chez l'enfant et l'adulte porteur de trisomie 21. Au travers de la loi de 2005, la société française s'est vue réaffirmée son champ d'investigation au sein de l'éducation et de l'insertion sociale et professionnelle des personnes en situation de handicap. Les capacités d'écriture constituent l'une des bases d'une intégration scolaire et communautaire réussie, c'est pourquoi ce projet de recherche représente un réel intérêt à réunir de nouvelles connaissances sur l'apprentissage de l'écriture. Ce projet fait suite à une précédente étude réalisée par Raphaele Tsao au sein du SAMSAH installé à Nice associé à Trisomie 21 France auprès d'adultes porteurs de trisomie 21. Il est donc intéressant de préciser l'ensemble des apprentissages acquis

Figure B1. Première page de la lettre d'information destinée aux titulaires de l'autorité parentale d'un participant T21.

au fil des âges pour pouvoir établir la diversité des processus en jeu dans l'acquisition de l'écriture. Ces résultats prodigueront alors des indices pertinents en vue d'une réévaluation et d'une nouvelle mise au point des outils mis à disposition pour l'apprentissage de l'écriture, aussi bien en milieu scolaire spécialisé que typique.

❖ **Quelle est la méthodologie de l'étude et comment se déroule l'expérimentation ?**

Afin de compléter au mieux ces données, nous sollicitons la participation de volontaires de tout âge. La personne doit avoir initié un minimum l'apprentissage de lettres pour pouvoir participer à l'expérimentation. L'ensemble des passations se fera de façon individuelle et sera décomposée en 5 séances, de 30 minutes chacune.

La méthodologie de cette recherche et son déroulement seront les suivants :

1) Le premier axe du projet vise à étudier les aspects de lisibilité et de qualité de l'écriture et d'en mesurer leur évolution au cours du développement. Différents outils de mesure seront utilisés :

- La NEPSY permet de réaliser un profil neuropsychologique de chaque participant. Dans le cadre de notre étude, nous nous intéresserons à 2 domaines de la NEPSY. Ainsi, à l'aide de plusieurs subtests (imitation de la position des mains, copie de figures, tracé de chemins), les fonctions sensorimotrices et les traitements visuospatiaux seront évalués.
- La présentation de matrices progressives colorées de Raven nous fournira un score global du niveau de fonctionnement cognitif. Le test se compose d'une série de figures abstraites. Il s'agit pour le participant de retrouver, parmi un éventail de figures, celle qui complète la série.
- La lisibilité et la qualité de l'écriture pour chaque participant seront évaluées à l'aide de l'échelle BHK. Ce test consiste en une tâche de copie de texte durant 5 min. L'évaluation sera réalisée selon 13 critères différents classés en fonction de la position spatiale de la lettre, sa forme ou la motricité fine. La vitesse d'écriture est estimée grâce au nombre de caractères écrits en 5 min.

2) Le second axe du projet s'attachera à analyser les propriétés spatiales, temporelles et cinématiques des mouvements produits lors de l'écriture afin de mesurer les caractéristiques du mouvement qui sous-tend l'acte d'écriture. Il sera alors proposé à chaque participant une tâche d'écriture de lettres cursives par le biais de tablettes graphiques. Ainsi, de nombreux indices pourront être récoltés, tels que des indices spatiaux, temporels (pause, durée), ou la pression exercée sur le stylo. L'intérêt majeur de ce type de procédure expérimentale est d'aller au-delà de l'analyse de la trace graphique afin d'extraire les mécanismes de programmation motrice et de contrôle du geste sous-jacents.

3) Enfin, l'impact des conditions d'apprentissage sera évalué dans une dernière partie en présentant sous différentes modalités (visuelle, verbale, visuo-verbale) les modèles d'écriture. Cette partie cherche à déterminer l'importance des consignes dans l'apprentissage de l'écriture chez les personnes porteuses de trisomie 21.

Figure B2. Seconde page de la lettre d'information destinée aux titulaires de l'autorité parentale d'un participant T21.

Les séances auront lieu au SESSAD/SAMSAH/SAVS auquel vous êtes rattachés ou à domicile et se composeront de 5 rendez-vous répartis sur 5 semaines. Les dates restent à déterminer selon les besoins et contraintes de chaque participant.

❖ **Diffusion des résultats de l'étude**

Un retour de l'ensemble des données récoltées sera fait durant l'année 2014. Il pourra prendre la forme d'un compte rendu par écrit ou faire l'objet d'une table ronde au sein du SESSAD/SAMSAH/SAVS. De plus, l'étude fera l'objet d'un article au sein de la revue Trisomie 21 France.

Si vous avez des questions, n'hésitez pas à en parler aux professionnels du service. Vous pouvez également me contacter directement à l'adresse eloise.moy@etu.univ-amu.fr. Lorsque vous aurez lu cette note d'information et obtenu les réponses aux questions que vous vous posez, il vous est proposé, si vous en êtes d'accord, de donner votre autorisation écrite en signant le formulaire de consentement préparé à cet effet.

En vous remerciant sincèrement pour votre collaboration,

Eloïse MOY
Doctorante en Psychologie du développement
Laboratoire PsyCLÉ EA 3273, Recherche en Psychologie de la Connaissance, du Langage et de l'Émotion
Aix-Marseille Université, 29 avenue Robert Schuman, 13621 Aix-en-Provence Cedex 1
E-mail : eloise.moy@etu.univ-amu.fr

Figure B3. Troisième page de la lettre d'information destinée aux titulaires de l'autorité parentale d'un participant T21.



**Etude de l'écriture chez des enfants et adultes porteurs de trisomie 21 :
Approche développementale et comparative**

Eloïse MOY (eloise.moy@etu.univ-amu.fr),

Etudiante en Doctorat de Psychologie du développement

Carole TARDIF (carole.tardif@univ-amu.fr)
Professeur de Psychologie et Psychopathologie
du Développement

Raphaele TSAO (raphaele.tsao@univ-amu.fr)
Maitre de conférences, Psychologue et
Vice-présidente Trisomie 21 Bouches-du-Rhône

Je soussigné: Mme, Mr

déclare accepter que mon enfant (Nom, prénom, date de naissance de l'enfant) :

(nom, prénom), né(e) le,

dont j'ai la charge légale, participe à la recherche intitulée : « Etude de l'écriture chez l'enfant et l'adulte porteurs de trisomie 21 : Approche développementale et comparative », organisée par Eloïse MOY, sous la direction de Carole TARDIF et Raphaele TSAO dans les conditions précisées ci-dessous.

J'ai bien reçu et lu les informations incluses dans la lettre d'information ci-jointe; j'ai pu poser toutes les questions que je souhaitais à Eloïse MOY et au personnel du service, et reçu des réponses adaptées. J'ai disposé d'un temps de réflexion suffisant entre le moment de l'information et celui du consentement.

Il m'a été précisé que :

- Je suis libre d'accepter ou de refuser, ainsi que d'interrompre à tout moment, sans avoir à me justifier, la participation de notre enfant à la recherche, et cet arrêt n'aura aucune conséquence sur la prise en charge de notre enfant.

- Les données qui concernent mon enfant resteront strictement confidentielles. Je n'autorise leur consultation que par des personnes qui collaborent avec Eloïse MOY.

Figure B4. Première page du formulaire de consentement destinée aux titulaires de l'autorité parentale d'un participant T21.

- Je pourrai à tout moment demander des informations complémentaires à Eloïse MOY, ou à l'un des investigateurs conjoints.

- La publication des résultats ne comportera aucun résultat individuel identifiant.

Les séances auront lieu au SESSAD/SAMSAH/SAVS auquel vous êtes rattachés ou à domicile et se composeront de 5 rendez-vous répartis sur 5 semaines. Merci de contacter Eloïse MOY par mail (eloise.moy@etu.univ-amu.fr) afin de convenir des dates.

Nom(s) et signature(s) du (des) représentant(s) légal (légaux) du participant
(Précédée de la mention : « Lu, compris et approuvé »)

Fait à, le

Nom et signature du participant (si possible)

Fait à, le

En l'absence d'autonomie de lecture et d'écriture de Mme/Mr....., la tierce personne ci-dessous identifiée, Mme/Mr....., totalement indépendante de l'investigateur et du promoteur, atteste avoir personnellement et fidèlement lu au représentant légal du participant la notice d'information et le présent formulaire de consentement et recueilli son accord pour signer ci-dessous en son nom.

Figure B5. Seconde page du formulaire de consentement destinée aux titulaires de l'autorité parentale d'un participant T21.

Annexe C - Résultats d'analyses complémentaires de l'étude 1

Tableau C1. Normalité des indices et homogénéité des variances entre les trois groupes.

	T21		AD		AC		F	p
	W	p	W	p	W	p		
Score global de qualité	0,87	***	0,87	***	0,91	*	8,41	***
1) Ecriture grande	0,85	**	0,85	**	0,46	***	8,80	***
2) Inclinaison de la marge	0,41	***	0,41	***	0,21	***	11,12	***
3) Lignes non planes	0,85	**	0,85	**	0,66	***	1,50	0,23
4) Mots serrés	0,80	***	0,80	***	0,34	***	19,08	***
5) Ecriture chaotique	0,77	***	0,77	***	0,64	***	16,37	***
6) Liens interrompus	0,73	***	0,73	***	0,87	**	0,11	0,90
7) Télescopages	0,37	***	0,37	***	0,39	***	0,27	0,77
8) Variations de la hauteur	0,68	***	0,68	***	0,32	***	32,82	***
9) Hauteur relative	0,86	**	0,86	**	0,40	***	21,78	***
10) Distorsion des lettres	0,74	***	0,74	***	0,44	***	17,38	***
11) Formes ambiguës	0,74	***	0,74	***	0,89	*	1,24	0,30
12) Lettres retouchées	0,76	***	0,76	***	0,47	***	6,28	**
13) Mauvaise trace	0,75	***	0,75	***	0,46	***	9,87	***
Vitesse	0,72	***	0,85	*	0,97	0,63	2,94	0,061

Note. *: $p < 0,05$; **: $p < 0,01$; ***: $p < 0,001$.

Tableau C2. Résultats portant sur la comparaison entre le groupe AD et le groupe AC pour chaque score obtenu.

Indice	Effet du groupe	<i>p</i>
Score global de qualité	AD > AC	< 0,001
1) Ecriture grande	AD = AC	0,16
2) Inclinaison de la marge	AD > AC	< 0,05
3) Lignes non planes	AD > AC	< 0,001
4) Mots serrés	AD = AC	0,10
5) Ecriture chaotique	AD = AC	0,10
6) Liens interrompus	AD = AC	0,81
7) Télescopages	AD = AC	0,91
8) Variations de la hauteur	AD > AC	< 0,01
9) Hauteur relative	AD = AC	0,22
10) Distorsion des lettres	AD = AC	0,68
11) Formes ambiguës	AD = AC	0,42
12) Lettres retouchées	AD > AC	< 0,05
13) Mauvaise trace	AD > AC	< 0,001
Vitesse	AD < AC	< 0,001
Coordination de la motricité fine	AD < AC	< 0,001
Intégration perceptivo-motrice	AD < AC	< 0,001
Contrôle visuo-moteur	AD < AC	< 0,001
Attention visuelle	AD < AC	< 0,001

Note. Plus le score global et le score obtenu à un critère sont bas, meilleure est la qualité d'écriture. La valeur de *p* correspond au test de Mann-Whitney lorsque l'effet du groupe est significatif d'après Kruskal-Wallis. AD : groupe au développement typique de même âge de développement ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique.

Tableau C3. Matrice de corrélation entre le niveau d'écriture (qualité et vitesse) et leurs facteurs potentiellement prédicteurs dans le groupe T21.

	Q	V	AD	AC	CMF	IPM	CVM	AV
Qualité	1,00							
Vitesse	-0,38	1,00						
Age de développement	-0,64*	0,24	1,00					
Age chronologique	-0,40	0,54	0,24	1,00				
Coordination de la motricité fine	-0,85***	0,27	0,68**	0,41	1,00			
Intégration perceptivo-motrice	-0,78***	0,30	0,76***	0,45	0,85***	1,00		
Contrôle visuo-moteur	-0,53	-0,08	0,62*	0,34	0,68**	0,72**	1,00	
Attention visuelle	-0,54	0,09	0,36	0,30	0,59*	0,45	0,33	1,00

Note. * : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$; *** : $p < 0,001$.

Tableau C4. Matrice de corrélation entre le niveau d'écriture (qualité et vitesse) et leurs facteurs potentiellement prédicteurs dans le groupe AD.

	Q	V	AC	CMF	IPM	CVM	AV
Qualité	1,00						
Vitesse	-0,53	1,00					
Age chronologique	-0,49	0,82	1,00				
Coordination de la motricité fine	0,09	0,46	0,21	1,00			
Intégration perceptivo-motrice	-0,32	0,54	0,57	0,61	1,00		
Contrôle visuo-moteur	-0,35	-0,01	-0,32	0,29	0,23	1,00	
Attention visuelle	0,64	-0,15	-0,34	0,06	-0,48	-0,16	1,00

Note. Toutes les valeurs de p sont non significatives.

Tableau C5. Matrice de corrélation entre le niveau d'écriture (qualité et vitesse) et leurs facteurs potentiellement prédicteurs dans le groupe AC.

	Q	V	AC	CMF	IPM	CVM	AV
Qualité	1,00						
Vitesse	-0,37	1,00					
Age chronologique	-0,28	0,52	1,00				
Coordination de la motricité fine	-0,18	-0,05	-0,11	1,00			
Intégration perceptivo-motrice	-0,36	0,39	0,16	0,30	1,00		
Contrôle visuo-moteur	-0,07	0,34	0,12	0,00	0,43	1,00	
Attention visuelle	-0,40	0,47	0,17	0,23	0,35	0,24	1,00

Note. Toutes les valeurs de p sont non significatives.

Tableau C6. Régressions linéaires multiples de la qualité et de la vitesse d'écriture dans le groupe T21.

Modèle	Facteurs prédicteurs de la qualité	AIC	$R^2_{adj.}$	F	p
1	AD, AC, G, P, CMF, IPM, CVM, AV	-16	0,62	5,75	**
2	AD, AC, G, CMF, IPM, CVM, AV	-18	0,64	6,92	***
3	AD, AC, G, CMF, IPM, CVM	-19	0,66	8,40	***
4	AD, AC, CMF, IPM, CVM	-21	0,67	10,49	***
5	AD, CMF, IPM, CVM	-23	0,69	13,70	***
6	IVM, CMF, CVM	-25	0,70	18,96	***
7	IVM, CMF	-26	0,70	28,07	***
8	CMF	-26	0,70	55,11	***

Modèle	Facteurs prédicteurs de la vitesse	AIC	$R^2_{adj.}$	F	p
1	AD, AC, G, P, CMF, IPM, CVM, AV	-76	0,25	1,89	0,14
2	AD, G, P, CMF, IPM, CVM, AV	-78	0,29	2,29	0,084
3	AD, G, P, CMF, CVM, AV	-79	0,32	2,74	0,050
4	AD, G, P, CMF, CVM	-81	0,65	3,32	*
5	AD, P, CMF, CVM	-82	0,36	4,15	*
6	AD, CMF, CVM	-82	0,35	4,95	*

Note. AD : âge de développement ; AC : âge chronologique ; G : genre ; P : préhension ; CMF : coordination de la motricité fine ; IPM : intégration perceptivo-motrice ; CVM : contrôle visuo-moteur ; AV : attention visuelle ; $R^2_{aj.}$: coefficient ajusté de détermination ; * : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$; *** : $p < 0,001$.

Tableau C7. Régressions linéaires multiples de la qualité et de la vitesse d'écriture dans le groupe AD.

Modèle	Facteurs prédictifs de la qualité	AIC	$R^2_{adj.}$	F	p
1	AC, G, P, CMF, IPM, CVM, AV	-22	0,83	7,94	0,058
2	AC, G, P, CMF, CVM, AV	-23	0,87	11,72	*
Modèle	Facteurs prédictifs de la vitesse	AIC	$R^2_{adj.}$	F	p
1	AC, G, P, CMF, IPM, CVM, AV	-46	0,84	8,63	0,052
2	AC, G, P, CMF, IPM, CVM	-47	0,87	12,38	*
3	AC, G, P, CMF, CVM	-49	0,89	17,4	**
4	AC, G, P, CMF	-50	0,90	23,31	***

Note. AD : âge de développement ; AC : âge chronologique ; G : genre ; P : préhension ; CMF : coordination de la motricité fine ; IPM : intégration perceptivo-motrice ; CVM : contrôle visuo-moteur ; AV : attention visuelle ; $R^2_{aj.}$: coefficient ajusté de détermination ; * : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$; *** : $p < 0,001$.

Tableau C8. Régressions linéaires multiples de la qualité et de la vitesse d'écriture dans le groupe AC.

Modèle	Facteurs prédictifs de la qualité	AIC	$R^2_{adj.}$	F	p
1	AC, G, P, CMF, IPM, CVM, AV	-51	0,15	1,60	0,21
2	AC, G, P, CMF, IPM, AV	-53	0,20	1,98	0,13
3	AC, G, P, CMF, IPM	-55	0,25	2,51	0,068
4	AC, G, P, IPM	-57	0,28	3,28	*
5	G, P, IPM	-58	0,29	4,20	*
6	G, P	-58	0,28	5,40	*
Modèle	Facteurs prédictifs de la vitesse	AIC	$R^2_{adj.}$	F	p
1	AC, G, P, CMF, IPM, CVM, AV	-39	0,46	3,82	*
2	AC, G, P, CMF, CVM, AV	-41	0,49	4,73	**
3	AC, G, P, CVM, AV	-43	0,52	5,94	**
4	AC, G, P, AV	-44	0,53	7,47	***

Note. AD : âge de développement ; AC : âge chronologique ; G : genre ; P : préhension ; CMF : coordination de la motricité fine ; IPM : intégration perceptivo-motrice ; CVM : contrôle visuo-moteur ; AV : attention visuelle ; $R^2_{aj.}$: coefficient ajusté de détermination ; * : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$; *** : $p < 0,001$.

Annexe D - Résultats d'analyses complémentaires de l'étude 2

Tableau D1. Normalité des indices et homogénéité des variances entre les trois groupes.

	T21		AD		AC		F	p
	W	p	W	p	W	p		
Nombre de tracés	0,59	***	0,63	***	0,32	***	277,8	***
ICV	0,64	***	0,73	***	0,26	***	105,63	***
Longueur totale	0,72	***	0,73	***	0,82	***	169,03	***
ICV	0,71	***	0,75	***	0,91	***	32,62	***
Durée des tracés	0,75	***	0,66	***	0,77	***	179,87	***
ICV	0,81	***	0,84	***	0,71	***	35,92	***
Durée des levers	0,46	***	0,12	***	0,17	***	31,63	***
ICV	0,64	***	0,71	***	0,24	***	55,21	***
Vitesse	0,72	***	0,77	***	0,91	***	0,76	0,47
ICV	0,86	***	0,91	***	0,84	***	33,94	***
Nombre de pauses	0,52	***	0,44	***	0,63	***	114,54	***
ICV	0,93	***	0,95	***	0,87	***	30,80	***
Durée des pauses	0,18	***	0,40	***	0,10	***	71,19	***
ICV	0,96	***	0,96	***	0,88	***	23,05	***
Pression	0,99	***	0,98	***	0,99	**	9,30	***
ICV	0,75	***	0,89	***	0,91	***	19,40	***

Note. ** : $p < 0,01$; *** : $p < 0,001$.

Tableau D2. Matrice de corrélation entre les indices et les caractéristiques individuelles dans le groupe T21.

	NT	L	DT	DL	V	NP	DP	P
Nombre de tracés	1,00							
Longueur	0,13*	1,00						
Durée des tracés	0,15**	0,30***	1,00					
Durée des levers	0,73***	0,09	0,23***	1,00				
Vitesse	-0,01	0,53***	-0,29***	-0,06	1,00			
Nombre de pauses	0,10	0,01	0,70***	0,20***	-0,27***	1,00		
Durée des pauses	0,03	0,03	0,65***	0,11	-0,14*	0,76***	1,00	
Pression	-0,26***	0,06	0,03	-0,24***	-0,16**	0,06	0,03	1,00
Âge de développement	-0,26***	-0,08	-0,07	-0,21***	0,13*	-0,08	-0,02	0,04
Âge chronologique	-0,15**	-0,22***	-0,11*	-0,16***	-0,02	-0,08	-0,07	-0,05

Note. * : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$; *** : $p < 0,001$.

Tableau D3. Matrice de corrélation entre les indices et les caractéristiques individuelles dans le groupe AD.

	NT	L	DT	DL	V	NP	DP	P
Nombre de tracés	1,00							
Longueur	0,17**	1,00						
Durée des tracés	0,43***	0,38***	1,00					
Durée des levers	0,50***	0,17**	0,46***	1,00				
Vitesse	-0,12	0,76***	-0,12	-0,05	1,00			
Nombre de pauses	0,41***	0,05	0,77***	0,40***	-0,25***	1,00		
Durée des pauses	0,35***	0,04	0,72***	0,37***	-0,24***	0,90***	1,00	
Pression	-0,11	-0,08	-0,02	0,01	-0,13	-0,04	-0,02	1,00
Âge chronologique	-0,24***	-0,56***	-0,32***	-0,09	-0,47***	-0,18***	-0,17***	0,18***

Note. ** : $p < 0,01$; *** : $p < 0,001$.

Tableau D4. Matrice de corrélation entre les indices et les caractéristiques individuelles dans le groupe AC.

	NT	L	DT	DL	V	NP	DP	P
Nombre de tracés	1,00							
Longueur	0,10	1,00						
Durée des tracés	0,07	0,69***	1,00					
Durée des levers	0,63***	0,12	0,14*	1,00				
Vitesse	0,09	0,70***	0,04	0,03	1,00			
Nombre de pauses	-0,05	0,04	0,37***	-0,02	-0,26***	1,00		
Durée des pauses	-0,01	0,12	0,45***	-0,01	-0,11	0,53***	1,00	
Pression	-0,02	0,24***	0,33***	0,02	-0,03	0,14*	0,09	1,00
Âge chronologique	0,05	-0,12*	-0,11	0,09	-0,10	0,01	0,04	-0,09

Note. * : $p < 0,05$; *** : $p < 0,001$.

Tableau D5. Matrice de corrélation entre la variabilité intraindividuelle des indices et les caractéristiques individuelles dans le groupe T21.

	ICV _{NT}	ICV _L	ICV _{DT}	ICV _{DL}	ICV _V	ICV _{NP}	ICV _{DP}	ICV _P
ICV du nombre de tracés	1,00							
ICV de la longueur	0,26***	1,00						
ICV de la durée des tracés	0,33***	0,68***	1,00					
ICV de la durée des levers	0,81***	0,18***	0,24***	1,00				
ICV de la vitesse	0,27***	0,67***	0,67***	0,25***	1,00			
ICV du nombre de pauses	0,09	0,10	0,24***	0,07	0,18***	1,00		
ICV de la durée des pauses	0,11	0,12	0,34***	0,09	0,29***	0,90***	1,00	
ICV de la pression	0,45***	0,30***	0,35***	0,26***	0,30***	0,22***	0,23***	1,00
Âge de développement	-0,17	-0,42	-0,23	0,13	-0,33	-0,29	-0,21	-0,43
Âge chronologique	-0,21	-0,30	-0,10	-0,08	-0,32	-0,08	-0,03	-0,34

Note. ICV : coefficient individuel de variation ; *** : $p < 0,001$.

Tableau D6. Matrice de corrélation entre la variabilité intraindividuelle des indices et les caractéristiques individuelles dans le groupe AD.

	ICV _{NT}	ICV _L	ICV _{DT}	ICV _{DL}	ICV _V	ICV _{NP}	ICV _{DP}	ICV _P
ICV du nombre de tracés	1,00							
ICV de la longueur	0,31***	1,00						
ICV de la durée des tracés	0,43***	0,49***	1,00					
ICV de la durée des levers	0,85***	0,24***	0,40***	1,00				
ICV de la vitesse	0,24***	0,56***	0,52***	0,21***	1,00			
ICV du nombre de pauses	0,03	0,02	0,15**	0,04	0,17**	1,00		
ICV de la durée des pauses	0,03	0,06	0,18***	0,06	0,25***	0,87***	1,00	
ICV de la pression	0,08	0,43	0,21***	0,03	0,53***	0,22***	0,25***	1,00
Âge chronologique	-0,02	-0,21	0,16	0,22	-0,35	0,04	0,06	-0,02

Note. ICV : coefficient individuel de variation ; ** : $p < 0,01$; *** : $p < 0,001$.

Tableau D7. Matrice de corrélation entre la variabilité intraindividuelle des indices et les caractéristiques individuelles dans le groupe AC.

	ICV _{NT}	ICV _L	ICV _{DT}	ICV _{DL}	ICV _V	ICV _{NP}	ICV _{DP}	ICV _P
ICV du nombre de tracés	1,00							
ICV de la longueur	0,22***	1,00						
ICV de la durée des tracés	0,16**	0,24***	1,00					
ICV de la durée des levers	0,76***	0,29***	0,27***	1,00				
ICV de la vitesse	0,16**	0,36***	0,73***	0,28***	1,00			
ICV du nombre de pauses	-0,01	0,05	0,14**	0,12	0,19***	1,00		
ICV de la durée des pauses	-0,03	0,04	0,23***	0,11	0,25***	0,97***	1,00	
ICV de la pression	0,32***	0,16**	0,11	0,09	0,06	0,0027	-0,02	1,00
Âge chronologique	-0,69	-0,58	0,003	-0,57	-0,29	0,42	0,35	-0,22

Note. ICV : coefficient individuel de variation ; ** : $p < 0,01$; *** : $p < 0,001$.

Tableau D8. Matrice de corrélation entre les indices et leur variabilité intraindividuelle dans le groupe T21.

	ICV _{NT}	ICV _L	ICV _{DT}	ICV _{DL}	ICV _V	ICV _{NP}	ICV _{DP}	ICV _P
Nombre de tracés	0,34***	0,19***	0,14**	0,24***	0,12	0,09	0,07	0,28***
Longueur	0,05	0,30***	0,25***	0,01	0,16**	0,08	0,09	0,06
Durée des tracés	-0,01	0,04	0,21***	-0,04	0,13*	-0,06	-0,04	-0,01
Durée des levers	0,25***	0,09	0,05	0,22***	0,05	-0,01	-0,02	0,16**
Vitesse	0,13*	0,19***	0,04	0,08	0,11	-0,01	-0,01	0,07
Nombre de pauses	0,06	0,05	0,18***	0,05	0,16**	-0,12	-0,09	0,06
Durée des pauses	0,02	0,02	0,19***	0,03	0,15**	-0,04	0,01	0,04
Pression	-0,29***	0,01	-0,0034	-0,13*	0,01	-0,07	-0,04	-0,50***

Note. ICV : coefficient individuel de variation ; * : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$; *** : $p < 0,001$.

Tableau D9. Matrice de corrélation entre les indices et leur variabilité intraindividuelle dans le groupe AD.

	ICV _{NT}	ICV _L	ICV _{DT}	ICV _{DL}	ICV _V	ICV _{NP}	ICV _{DP}	ICV _P
Nombre de tracés	0,38***	0,13	0,26***	0,25***	0,26***	0,00	0,06	0,03
Longueur	0,06	0,19***	0,04	-0,01	0,21***	0,08	0,12	0,08
Durée des tracés	0,31***	0,21***	0,28***	0,23***	0,28***	-0,01	-0,04	0,01
Durée des levers	0,18***	0,11	0,11	0,14*	0,10	0,00	0,02	-0,05
Vitesse	-0,17**	0,06	-0,10	-0,22***	0,06	0,14*	0,19***	0,10
Nombre de pauses	0,25***	0,12	0,24***	0,16**	0,21***	-0,06	-0,10	-0,02
Durée des pauses	0,24***	0,10	0,25***	0,15*	0,22***	-0,04	-0,06	-0,01
Pression	-0,02	-0,12	-0,14*	-0,03	-0,19***	-0,14*	-0,13	-0,44***

Note. ICV : coefficient individuel de variation ; * : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$; *** : $p < 0,001$.

Tableau D10. Matrice de corrélation entre les indices et leur variabilité intraindividuelle dans le groupe AC.

	ICV _{NT}	ICV _L	ICV _{DT}	ICV _{DL}	ICV _V	ICV _{NP}	ICV _{DP}	ICV _P
Nombre de tracés	0,25***	0,23***	0,15**	0,33***	0,16**	0,05	0,01	-0,03
Longueur	-0,09	-0,19***	0,20***	-0,04	0,11	-0,03	0,01	-0,24***
Durée des tracés	-0,03	-0,16***	0,37***	0,04	0,28***	0,04	0,14*	-0,20***
Durée des levers	0,17***	0,06	0,17***	0,30***	0,14*	0,08	0,06	-0,02
Vitesse	-0,08	-0,09	-0,05	-0,08	-0,10	-0,14*	-0,18***	-0,07
Nombre de pauses	-0,04	0,07	0,25***	0,0009	0,24***	-0,0017	0,12	-0,07
Durée des pauses	-0,0028	0,04	0,27***	-0,0009	0,22***	-0,01	0,07	-0,03
Pression	-0,15**	-0,12	0,11	-0,02	0,11	0,10	0,15**	-0,55***

Note. ICV : coefficient individuel de variation ; * : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$; *** : $p < 0,001$.

Tableau D11. Résultats portant sur la comparaison entre le groupe AD et le groupe AC pour chaque indice.

Indice	Effet du groupe	p
Nombre de tracés	AD > AC	< 0,001
Longueur totale	AD > AC	< 0,001
Durée totale des tracés	AD > AC	< 0,001
Durée totale des levers	AD > AC	< 0,001
Vitesse moyenne de tracé	AD < AC	< 0,001
Nombre de pauses	AD > AC	< 0,001
Durée des pauses	AD > AC	< 0,001
Pression	NS	-

Note. La valeur de p correspond au test post-hoc de Tukey lorsque l'effet du groupe est significatif. AC : groupe au développement typique de même âge chronologique ; AD : groupe au développement typique de même âge de développement ; NS : effet non significatif.

Tableau D12. Comparaison entre le groupe AD et le groupe AC pour la variation intraindividuelle de chaque indice.

Variation intraindividuelle	Effet du groupe	<i>p</i>
Nombre de tracés	AD > AC	< 0,001
Longueur totale	AD > AC	< 0,001
Durée totale des tracés	AD > AC	< 0,001
Durée totale des levers	AD > AC	< 0,001
Vitesse moyenne de tracé	AD > AC	< 0,001
Nombre de pauses	NS	-
Durée des pauses	NS	-
Pression	AD > AC	< 0,001

Note. La valeur de *p* correspond au test post-hoc de Tukey lorsque l'effet du groupe est significatif. AC : groupe au développement typique de même âge chronologique ; AD : groupe au développement typique de même âge de développement ; NS : effet non significatif.

Annexe E - Résultats d'analyses complémentaires de l'étude 3

Tableau E1. Normalité des indices et homogénéité des variances entre les modalités dans le groupe T21 (n=24).

	S		D		VS		VD		H		F	p
	W	p	W	p	W	p	W	p	W	p		
Score du point de départ	0,196	***	0,279	***	0,303	***	0,187	***	0,253	***	1,12	0,35
Score du sens de rotation	0,256	***	0,314	***	0,326	***	0,206	***	0,253	***	3,55	**
Nombre de tracés	0,373	***	0,453	***	0,587	***	0,566	***	0,548	***	6,53	***
Longueur	0,642	***	0,748	***	0,728	***	0,740	***	0,689	***	4,18	**
Score de similarité	0,956	***	0,920	***	0,941	***	0,943	***	0,939	***	1,64	0,16
Durée des tracés	0,821	***	0,849	***	0,851	***	0,796	***	0,893	***	3,57	**
Durée des levers	0,453	***	0,390	***	0,540	***	0,524	***	0,454	***	5,86	***
Vitesse	0,764	***	0,730	***	0,698	***	0,773	***	0,750	***	4,80	***
Nombre de pauses	0,653	***	0,497	***	0,675	***	0,764	***	0,701	***	1,24	0,29
Durée des pauses	0,264	***	0,191	***	0,301	***	0,432	***	0,310	***	10,53	***
Pression	0,988	***	0,987	***	0,988	***	0,986	***	0,988	***	7,63	***

Note. S : modalité statique ; D : modalité dynamique ; VS : modalité verbo-statique ; VD : modalité verbo-dynamique ; H : modalité haptique ; * : $p < 0,05$; *** : $p < 0,001$.

Tableau E2. Normalité des indices et homogénéité des variances entre les trois groupes.

	T21		AD		AC		F	p
	W	p	W	p	W	p		
Score du point de départ	0,027	***	0,048	***	0,033	***	3,54	*
Score du sens de rotation	0,14	***	0,083	***	0,055	***	3,57	*
Nombre de tracés	0,46	***	0,49	***	0,14	***	506,93	***
Longueur	0,72	***	0,65	***	0,87	***	65,48	***
Score de similarité	0,92	***	0,96	***	0,89	***	72,68	***
Durée des tracés	0,93	***	0,77	***	0,83	***	181,48	***
Durée des levers	0,41	***	0,11	***	0,081	***	65,62	***
Vitesse	0,68	***	0,78	***	0,77	***	0,74	***
Nombre de pauses	0,75	***	0,70	***	0,58	***	328,2	***
Durée des pauses	0,29	***	0,48	***	0,36	***	101,41	***
Pression	0,99	***	0,95	***	0,94	***	128,11	***

Note. * : $p < 0,05$; *** : $p < 0,001$.

Tableau E3. Matrice de corrélation entre les indices et les caractéristiques individuelles dans le groupe T21 (n=24).

	SPD	SSR	NT	L	DT	DL	V	NP	DP	P
Score du point de départ	1,00									
Score du sens de rotation	0,84***	1,00								
Nombre de tracés	-0,10***	-0,07***	1,00							
Longueur	-0,15***	-0,16***	0,23***	1,00						
Durée des tracés	0,01	0,00	0,18***	0,36***	1,00					
Durée des levers	-0,09***	-0,07***	0,54***	0,12***	0,16***	1,00				
Vitesse	-0,16***	-0,18***	0,09***	0,70***	-0,21***	0,03	1,00			
Nombre de pauses	0,03	0,01	0,14***	0,01	0,58***	0,17***	-0,28***	1,00		
Durée des pauses	0,00	-0,02	0,08***	0,06**	0,46***	0,13***	-0,14***	0,66***	1,00	
Pression	0,14***	0,12***	-0,34***	-0,13***	-0,08***	-0,18***	-0,11***	-0,04	0,01	1,00
Âge de développement	0,20***	0,20***	-0,20***	-0,15***	0,14***	-0,11***	-0,27***	0,01	0,01	0,15***
Âge chronologique	0,16***	0,18***	-0,08***	-0,28***	0,02	-0,07**	-0,26***	0,02	-0,03	0,02

Note. **: $p < 0,01$; ***: $p < 0,001$.

Tableau E4. Matrice de corrélation entre les indices et les caractéristiques individuelles dans le groupe T21 (n=11).

	SPD	SSR	NT	L	DT	DL	V	NP	DP	P
Score du point de départ	1,00									
Score du sens de rotation	0,07	1,00								
Nombre de tracés	-0,05	0,05	1,00							
Longueur	0,03	-0,03	0,01	1,00						
Durée des tracés	-0,03	-0,15***	0,14***	0,28***	1,00					
Durée des levers	-0,02	0,04	0,79***	-0,02	0,16***	1,00				
Vitesse	0,04	0,04	-0,08*	0,75***	-0,24***	-0,11***	1,00			
Nombre de pauses	-0,04	-0,12***	0,13***	-0,03	0,58***	0,16***	-0,28***	1,00		
Durée des pauses	-0,07	-0,11***	0,07	0,05	0,47***	0,05	-0,13***	0,55***	1,00	
Pression	0,02	0,01	-0,26***	0,20***	-0,04	-0,24***	0,21***	-0,10**	0,06	1,00
Âge de développement	0,06	0,06	-0,20***	-0,18***	-0,11***	-0,17***	-0,19***	-0,21***	-0,09**	0,17***
Âge chronologique	0,04	0,04	-0,04	-0,41***	-0,09**	-0,03	-0,36***	-0,14***	-0,07	-0,01

Note. *: $p < 0,05$; **: $p < 0,01$; ***: $p < 0,001$.

Tableau E5. Matrice de corrélation entre les indices et les caractéristiques individuelles dans le groupe AD (n=11).

	SPD	SSR	NT	L	DT	DL	V	NP	DP	P
Score du point de départ	1,00									
Score du sens de rotation	0,75***	1,00								
Nombre de tracés	-0,07	-0,08*	1,00							
Longueur	-0,06	-0,03	0,14***	1,00						
Durée des tracés	-0,02	-0,03	0,35***	0,57***	1,00					
Durée des levers	-0,02	-0,02	0,44***	0,21***	0,43***	1,00				
Vitesse	-0,03	0,01	-0,15***	0,50***	-0,22***	-0,06	1,00			
Nombre de pauses	0,06	0,04	0,29***	0,15***	0,62***	0,21***	-0,32***	1,00		
Durée des pauses	0,01	0,01	0,18***	0,15***	0,51***	0,11***	-0,23***	0,77***	1,00	
Pression	0,01	-0,01	-0,31***	0,11***	0,07	-0,0045	-0,02	-0,07	-0,05	1,00
Âge chronologique	0,01	0,06	-0,13***	-0,04	-0,18***	0,01	0,09**	-0,20***	-0,15***	0,17***

Note. * : $p < 0,05$; *** : $p < 0,001$.

Tableau E6. Matrice de corrélation entre les indices et les caractéristiques individuelles dans le groupe AC (n=11).

	SPD	SSR	NT	L	DT	DL	V	NP	DP	P
Score du point de départ	1,00									
Score du sens de rotation	0,85***	1,00								
Nombre de tracés	-0,04	-0,01	1,00							
Longueur	-0,03	-0,01	0,07	1,00						
Durée des tracés	0,01	-0,0039	0,18***	0,54***	1,00					
Durée des levers	-0,02	-0,0043	0,68***	0,04	0,10	1,00				
Vitesse	-0,04	-0,09	-0,06	0,31***	-0,33***	-0,04	1,00			
Nombre de pauses	0,21***	0,15***	0,10**	-0,05	0,46***	0,05	-0,35***	1,00		
Durée des pauses	0,11***	0,07	0,03	-0,07	0,39***	0,01	-0,28***	0,74***	1,00	
Pression	0,01	0,03	0,07	0,08*	0,25***	0,01	-0,35***	0,16***	0,06	1,00
Âge chronologique	0,004	0,008	0,10**	0,15***	-0,02	0,06	0,12***	0,05	0,01	0,22***

Note. * : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$; *** : $p < 0,001$.

Table des figures

Figure 1. Distribution du QI chez les personnes présentant une déficience intellectuelle de cause innée (Organic) ou acquise (Familial), d'après Iarocci et Petrill (2012).	10
Figure 2. Modèle de l'organisation cérébrale fonctionnelle chez les personnes au développement typique (haut) et chez les personnes T21 (bas). Illustration issue de Chua, Weeks et Elliott (1996).	26
Figure 3. Exemple du mot <i>lapin</i> écrit par un adulte expert (gauche) et un enfant dysgraphique (droite). Les graphiques représentent la vitesse de tracé au cours du temps dont une partie est zoomée (encadré) : en noir, vitesse filtrée à 10 Hz ; en gris, vitesse filtrée à 5 Hz. Les pics de vélocité sont représentés par l'étoile ou le point selon la courbe. Issu de Danna, Paz-Villagràn & Velay (2013).	49
Figure 4. Modèle d'Ellis & Young (1988), traduit et issu de Kaiser (2009, p.9).	55
Figure 5. Modèle de van Galen (1991), traduit et issu de Kaiser (2009, p.12).	57
Figure 6. Schéma représentant les types de connaissances (colonne de gauche), les composants impliqués dans l'apprentissage de l'écriture (colonne centrale) et les fonctions des afférences perceptives (colonne de droite). Issu de Zesiger (2003).	59
Figure 7. Exemples de positionnement de la main au-dessus (gauche) et en-dessous (droite) de la ligne d'écriture. Repéré à l'adresse : http://www.reeducation-ecriture.com	62
Figure 8. Exemples de prises en main du crayon par ordre développemental. Issu de Schneck & Henderson (1990).	63
Figure 9. Exemple d'exercice visuo-haptique proposés par Hillairet de Boisferon et al., (2007). Photographie repérée à l'adresse http://www.cndp.fr/bienlire/04-media/a-contribution.asp	72
Figure 10. Dispersion de l'âge chronologique et de l'âge de développement des 24 participants du groupe T21 de genre masculin (◆) et féminin (●).	91
Figure 11. Exemples de position de la main à reproduire avec la main dominante et la main non dominante. Issu du subtest « imitation de la position des mains » (NEPSY I, 2003).	99
Figure 12. Exemples de figures géométriques bi-dimensionnelles à recopier. Issu du subtest « copie de figures » (NEPSY I, 2003).	100
Figure 13. Exemple de chemin à tracer à l'aide d'un stylo. Issu du subtest « précision visuo-motrice » (NEPSY I, 2003).	100
Figure 14. Exemple de planche à parcourir afin de localiser un élément cible (l'image du chat). Issu du subtest « attention visuelle » (NEPSY I, 2003).	101
Figure 15. Exemples de copies de texte dans le test BHK. La première ligne correspond aux productions chez une fille du groupe T21 (âge dev. = 6 ans ; âge chrono. = 12 ans 10 mois ; à gauche) et un homme du groupe T21 (âge dev. = 7 ans 6 mois ; âge chrono. = 23 ans 10 mois ; à droite). La deuxième ligne correspond aux copies de texte de leurs pairs du groupe AD (âgés de 6 ans 1 mois et 7 ans 10 mois). La dernière ligne comporte les productions de leurs pairs du groupe AC (âgés de 12 ans 2 mois et 23 ans 10mois).	104
Figure 16. Score global moyen de qualité d'écriture évalué par le test BHK dans les trois groupes. Plus le score global est bas, meilleure est la qualité d'écriture. Les barres d'erreur verticales représentent l'écart-type. T21 : groupe T21 ; AD : groupe au développement typique de même âge de développement ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique. *** : $p < 0,001$; NS : non significatif.	105

Figure 17. Vitesse moyenne d'écriture évaluée par le test BHK dans les trois groupes. Les barres d'erreur verticales représentent l'écart-type. T21 : groupe T21 ; AD : groupe au développement typique de même âge de développement ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique. *** : $p < 0,001$; NS : non significatif. _____	107
Figure 18. Modèles des lettres faciles (<i>a, e, s</i>) et difficiles (<i>b, f, g</i>) en écriture cursive. _____	118
Figure 19. Dispositif expérimental du point de vue du participant. Le modèle est présenté à l'écran de l'ordinateur, puis le participant trace la lettre à l'aide du stylet sur une feuille vierge fixée sur la tablette graphique. Chaque tracé de lettre est occulté par un cache avant de réaliser la lettre suivante. _____	119
Figure 20. Présentation du logiciel Ecriture Suite (Gilhodes & Velay, 2012) d'acquisition et de traitement de l'écriture enregistrée à l'aide d'une tablette graphique. Dans le tableau de gauche, chaque ligne correspond à un tracé ou un lever. L'image de droite indique grâce à un code visuel les différents tracés (en couleur) et les levers (en gris). Les deux graphes en-dessous présentent l'évolution temporelle de la pression et de la vitesse (mm/s). _____	120
Figure 21. Nombre moyen de tracés pour les lettres faciles et difficiles dans les trois groupes. Les barres d'erreur verticales représentent l'erreur standard. T21 : groupe T21 ; AD : groupe au développement typique de même âge de développement ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique. * : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$; NS : non significatif. _____	125
Figure 22. Durée moyenne des levers pour les lettres faciles et difficiles dans les trois groupes. Les barres d'erreur verticales représentent l'erreur standard. T21 : groupe T21 ; AD : groupe au développement typique de même âge de développement ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique. * : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$; NS : non significatif. _____	129
Figure 23. Exemple de 4 images composant le tracé graduel de la lettre e. _____	141
Figure 24. Lettres en mousse à suivre du doigt dans la modalité haptique. _____	142
Figure 25. Illustration des indices de trajectoire pour les scores de point de départ (à gauche) et du sens de rotation (à droite) pour la lettre <i>a</i> . D'après la présentation de la lettre, le point de départ (point clair) doit être dans la partie supérieure droite de la lettre, délimitée par le diamètre de la boucle (ligne pointillée) et le sens de rotation doit être antihoraire. _____	143
Figure 26. Score du sens de rotation en fonction des modalités de présentation dans les trois groupes. Les barres d'erreur verticales représentent l'erreur standard. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique. ** : $p < 0,01$; NS : non significatif. _____	156
Figure 27. Nombre de tracés pour réaliser une lettre facile en fonction des modalités de présentation dans les trois groupes. Les barres d'erreur verticales représentent l'erreur standard. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique. * : $p < 0,05$; NS : non significatif. _____	158
Figure 28. Longueur totale d'une lettre en fonction des modalités de présentation dans les trois groupes. Les barres d'erreur verticales représentent l'erreur standard. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique. * : $p < 0,05$; *** : $p < 0,001$; NS : non significatif. _____	159
Figure 29. Score de similarité spatiale en fonction des modalités de présentation dans les trois groupes. Les barres d'erreur verticales représentent l'erreur standard. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique. *** : $p < 0,001$; NS : non significatif. _____	160
Figure 30. Durée des tracés en fonction des modalités de présentation dans les trois groupes. Les barres d'erreur verticales représentent l'erreur standard. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique. ** : $p < 0,01$; *** : $p < 0,001$; NS : non significatif. _____	162
Figure 31. Vitesse de tracé en fonction des modalités de présentation dans les trois groupes. Les barres d'erreur verticales représentent l'erreur standard. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique. * : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$; *** : $p < 0,001$; NS : non significatif. _____	164
Figure 32. Nombre de pauses en fonction des modalités de présentation dans les trois groupes. Les barres d'erreur verticales représentent l'erreur standard. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique. * : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$; NS : non significatif. _____	166

Figure 33. Durée des pauses en fonction des modalités de présentation dans les trois groupes. Les barres d'erreur verticales représentent l'erreur standard. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique. * : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$; NS : non significatif.	167
Figure 34. Pression exercée sur la feuille en fonction des modalités de présentation dans les trois groupes. Les barres d'erreur verticales représentent l'erreur standard. T21 : groupe porteur de trisomie 21 ; AC : groupe au développement typique de même âge chronologique. * : $p < 0,05$; NS : non significatif.	168
Figure A1. Items de réponse composant le questionnaire distribué auprès des participants T21.	215
Figure B1. Première page de la lettre d'information destinée aux titulaires de l'autorité parentale d'un participant T21.	217
Figure B2. Seconde page de la lettre d'information destinée aux titulaires de l'autorité parentale d'un participant T21.	218
Figure B3. Troisième page de la lettre d'information destinée aux titulaires de l'autorité parentale d'un participant T21.	219
Figure B4. Première page du formulaire de consentement destinée aux titulaires de l'autorité parentale d'un participant T21.	220
Figure B5. Seconde page du formulaire de consentement destinée aux titulaires de l'autorité parentale d'un participant T21.	221

Table des tableaux

Tableau 1. Différents niveaux de sévérité de la déficience intellectuelle d'après le CIM-10 (OMS, 1993) et le DSM-IV-TR (APA, 2000).	13
Tableau 2. Différents niveaux de sévérité de la déficience intellectuelle d'après le DSM-5 (APA, 2015).	14
Tableau 3. Les grandes étapes du développement psychomoteur chez le jeune enfant au développement typique et l'enfant porteur de trisomie 21.	22
Tableau 4. Facteurs qualitatifs des 13 critères du BHK, d'après Sage (2010).	44
Tableau 5. Genre, âge de développement et âge chronologique des 24 participants T21, et âge chronologique des participants du groupe AD et du groupe AC.	92
Tableau 6. Caractéristiques du groupe T21 et des 2 groupes typiques AD et AC.	93
Tableau 7. Exemples de tenue du crayon en position immature, intermédiaire et mature. Issu du subtest « précision visuo-motrice » (NEPSY I, 2003).	99
Tableau 8. Indices mesurés dans l'étude 1 afin d'évaluer la qualité, la vitesse d'écriture et les facteurs prédictifs portant sur les caractéristiques individuelles, sur la tenue du stylo et sur le traitement perceptivo-moteur.	102
Tableau 9. Scores obtenus aux 13 critères du test BHK dans les trois groupes.	106
Tableau 10. Effectifs des participants des trois groupes selon la catégorie du genre, de la préférence manuelle et de la tenue du stylo.	108
Tableau 11. Niveau du traitement perceptivo-moteur selon quatre domaines d'évaluation dans les trois groupes.	108
Tableau 12. Récapitulatif des résultats sur la qualité et la vitesse d'écriture de l'étude 1.	112
Tableau 13. Récapitulatif des résultats sur les facteurs prédictifs de la qualité et de la vitesse d'écriture de l'étude 1.	114
Tableau 14. Choix des lettres faciles et difficiles selon leur rang de facilité motrice chez l'enfant de 5 à 8 ans (Jolly, Huron & Gentaz, 2014) et de fréquence française (New, Pallier, Ferrand & Matos, 2001).	118
Tableau 15. Indices mesurées dans l'étude 2 afin d'évaluer la spatialité, la temporalité, la cinématique et la force graphique du tracé de lettres.	121
Tableau 16. Coefficients de détermination des modèles linéaires à effets mixtes pour chaque indice et chaque variabilité intraindividuelle.	123
Tableau 17. Moyenne et écart-type des indices de spatialité et de leur variabilité intraindividuelle dans les trois groupes selon la complexité de la lettre.	124
Tableau 18. Moyenne et écart-type des indices de temporalité et de leur variabilité intraindividuelle dans les trois groupes selon la complexité de la lettre.	127
Tableau 19. Moyenne et écart-type des indices cinématiques et de leur variabilité intraindividuelle dans les trois groupes selon la complexité de la lettre.	130
Tableau 20. Moyenne et écart-type de l'indice de force graphique et de la variabilité intraindividuelle dans les trois groupes selon la complexité de la lettre.	133
Tableau 21. Récapitulatif des résultats sur les indices du tracé de lettres de l'étude 2.	136
Tableau 22. Récapitulatif des résultats sur la variation intraindividuelle des indices de l'étude 2.	137
Tableau 23. Caractéristiques du groupe T21 et des 2 groupes typiques AD et AC comparés sur l'impact des modalités de présentation de l'étude 3.	140

Tableau 24. Indices mesurées dans l'étude 3 pour évaluer la trajectoire, la spatialité, la temporalité, la cinématique et la force graphique du tracé. _____	144
Tableau 25. Coefficients de détermination des modèles linéaires à effets mixtes pour chaque indice. _____	146
Tableau 26. Moyenne et écart-type des indices de trajectoire selon la modalité de présentation dans le groupe T21. _____	147
Tableau 27. Moyenne et écart-type des indices de spatialité selon la modalité de présentation dans le groupe T21. _____	148
Tableau 28. Moyenne et écart-type des indices de temporalité selon la modalité de présentation dans le groupe T21. _____	150
Tableau 29. Moyenne et écart-type des indices de cinématique selon la modalité de présentation dans le groupe T21. _____	151
Tableau 30. Moyenne et écart-type de l'indice de force graphique selon la modalité de présentation dans le groupe T21. _____	153
Tableau 31. Récapitulatif des résultats de l'étude 3 pour le groupe T21. _____	154
Tableau 32. Moyenne et écart-type des indices de trajectoire dans les trois groupes selon la modalité de présentation. _____	155
Tableau 33. Moyenne et écart-type des indices de spatialité dans les trois groupes selon la modalité de présentation. _____	157
Tableau 34. Moyenne et écart-type des indices de temporalité dans les trois groupes selon la modalité de présentation. _____	161
Tableau 35. Moyenne et écart-type des indices de cinématique dans les trois groupes selon la modalité de présentation. _____	163
Tableau 36. Moyenne et écart-type de l'indice de force graphique dans les trois groupes selon la modalité de présentation. _____	167
Tableau 37. Récapitulatif des résultats de l'étude 3 pour les groupes T21, AD et AC. _____	169
Tableau A1. Effectifs des réponses pour chaque item évaluant l'intérêt pour l'écriture et sur l'autoévaluation chez les participants T21. _____	216
Tableau A2. Effectifs d'items cochés (Oui) ou non cochés (Non) sur le rôle de l'écriture d'après les participants T21. _____	216
Tableau A3. Effectifs d'items cochés (Oui) ou non cochés (Non) sur les contraintes physiques rencontrées lors de l'écriture chez les participants T21. _____	216
Tableau C1. Normalité des indices et homogénéité des variances entre les trois groupes. _____	222
Tableau C2. Résultats portant sur la comparaison entre le groupe AD et le groupe AC pour chaque score obtenu. _____	223
Tableau C3. Matrice de corrélation entre le niveau d'écriture (qualité et vitesse) et leurs facteurs potentiellement prédicteurs dans le groupe T21. _____	223
Tableau C4. Matrice de corrélation entre le niveau d'écriture (qualité et vitesse) et leurs facteurs potentiellement prédicteurs dans le groupe AD. _____	224
Tableau C5. Matrice de corrélation entre le niveau d'écriture (qualité et vitesse) et leurs facteurs potentiellement prédicteurs dans le groupe AC. _____	224
Tableau C6. Régressions linéaires multiples de la qualité et de la vitesse d'écriture dans le groupe T21. _____	224
Tableau C7. Régressions linéaires multiples de la qualité et de la vitesse d'écriture dans le groupe AD. _____	225
Tableau C8. Régressions linéaires multiples de la qualité et de la vitesse d'écriture dans le groupe AC. _____	225
Tableau D1. Normalité des indices et homogénéité des variances entre les trois groupes. _____	226
Tableau D2. Matrice de corrélation entre les indices et les caractéristiques individuelles dans le groupe T21. _____	226
Tableau D3. Matrice de corrélation entre les indices et les caractéristiques individuelles dans le groupe AD. _____	227
Tableau D4. Matrice de corrélation entre les indices et les caractéristiques individuelles dans le groupe AC. _____	227
Tableau D5. Matrice de corrélation entre la variabilité intraindividuelle des indices et les caractéristiques individuelles dans le groupe T21. _____	227
Tableau D6. Matrice de corrélation entre la variabilité intraindividuelle des indices et les caractéristiques individuelles dans le groupe AD. _____	228
Tableau D7. Matrice de corrélation entre la variabilité intraindividuelle des indices et les caractéristiques individuelles dans le groupe AC. _____	228
Tableau D8. Matrice de corrélation entre les indices et leur variabilité intraindividuelle dans le groupe T21. _____	228
Tableau D9. Matrice de corrélation entre les indices et leur variabilité intraindividuelle dans le groupe AD. _____	229
Tableau D10. Matrice de corrélation entre les indices et leur variabilité intraindividuelle dans le groupe AC. _____	229

Tableau D11. Résultats portant sur la comparaison entre le groupe AD et le groupe AC pour chaque indice. _____	229
Tableau D12. Comparaison entre le groupe AD et le groupe AC pour la variation intraindividuelle de chaque indice. _____	230
Tableau E1. Normalité des indices et homogénéité des variances entre les modalités dans le groupe T21 (n=24). _____	231
Tableau E2. Normalité des indices et homogénéité des variances entre les trois groupes. _____	231
Tableau E3. Matrice de corrélation entre les indices et les caractéristiques individuelles dans le groupe T21 (n=24). _____	232
Tableau E4. Matrice de corrélation entre les indices et les caractéristiques individuelles dans le groupe T21 (n=11). _____	232
Tableau E5. Matrice de corrélation entre les indices et les caractéristiques individuelles dans le groupe AD (n=11). _____	233
Tableau E6. Matrice de corrélation entre les indices et les caractéristiques individuelles dans le groupe AC (n=11). _____	233