HAL
open science

Etude de l'automatisation des mouvements d'écriture chez l'enfant de 6 à 10 ans

Laurence Seraphin-Thibon

To cite this version:

Laurence Seraphin-Thibon. Etude de l'automatisation des mouvements d'écriture chez l'enfant de 6 à 10 ans. Psychologie. Université Grenoble Alpes, 2018. Français. NNT : 2018GREAS040 . tel-02408944

HAL Id: tel-02408944

https://theses.hal.science/tel-02408944v1

Submitted on 13 Dec 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Communauté
UNIVERSITÉ Grenoble Alpes

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE LA COMMUNAUTE UNIVERSITE GRENOBLE ALPES

Spécialité : **PCN – Sciences cognitives, psychologie et neurocognition**

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Laurence SÉRAPHIN-THIBON

Thèse dirigée par **Mme Sonia Kandel**, Professeure, Université Grenoble-Alpes, GIPSA-lab (CNRS UMR 5216)

préparée au sein du **Laboratoire GIPSA-lab, Grenoble Images Parole Signal Automatique**

dans **l'École Doctorale EDISCE Ingénierie pour la Santé, la Cognition et l'Environnement**

Étude de l'automatisation des mouvements d'écriture chez les enfants de 6 à 10 ans

Thèse soutenue publiquement le **mardi 4 décembre 2018**, devant le jury composé de :

Mme Marie-Line Bosse
Professeure, Université Grenoble-Alpes, LPNC (CNRS UMR 5105), présidente du jury.

Mme Marina Laganaro
Professeure, Université de Genève, FAPSE, rapporteure.

Mr Thierry Olive
Directeur de recherche, CERCA (CNRS UMR 7295) / Université de Poitiers, rapporteur.

Mr Jean-Luc Velay
Chargé de recherche, LNC (CNRS UMR 7291) / Université Aix-Marseille, examinateur.

Mr Pascal Zesiger
Professeur, Université de Genève, FAPSE, examinateur.

Résumé

Chez l'adulte, la production écrite est une activité motrice automatisée. L'écriture est fluide et rapide car la production de chaque lettre repose sur l'activation préalable d'une mémoire procédurale connue sous le terme « programme moteur » ou « carte sensori-motrice ». Nous nous sommes attachés à comprendre comment s'élaborent ces programmes moteurs au cours de l'apprentissage de l'écriture. Nous avons étudié comment l'écriture des enfants évoluait d'une programmation trait par trait à une programmation lettre à lettre. Dans toutes nos études nous avons enregistré les mouvements d'écriture des enfants à l'aide d'une tablette digitalisante. Dans la première expérience, 98 enfants de 6 à 9 ans devaient produire des lettres de complexité variable, dépendant de leur nombre de *strokes*[1]. Les résultats ont indiqué qu'à 6 et 7 ans, la durée du mouvement, la dysfluence et la trajectoire augmentaient avec le nombre de strokes de la lettre. Chaque allographe était produit par l'activation du premier stroke, puis du deuxième stroke et ainsi de suite jusqu'à la réalisation de la lettre complète. Le nombre de strokes des lettres affectait beaucoup moins la production des enfants plus âgés. Les enfants regroupaient la programmation de ces strokes en *chunks*[2], qui augmentaient en taille progressivement pour aboutir, à la fin du processus d'automatisation, à une production lettre à lettre. L'analyse a révélé que les premiers automatismes se stabilisaient aux alentours de 8 ans. Toutefois, certaines lettres restaient représentées en chunks même chez les enfants les plus âgés. La nature du stroke à produire semblait affecter également la mise en place des automatismes. Ainsi, une autre expérience a été réalisée pour étudier l'impact de la production des strokes nécessitant des mouvements de rotation, indispensables à la production de traits courbés (e.g., pour la lettre *o*), et des mouvements de pointage nécessaires pour positionner l'outil scripteur après leur lever (e.g., pour mettre le point sur le *i*). Nous avons demandé à 108 enfants âgés de 6 à 10 ans d'écrire des séquences de lettres majuscules variant en termes de mouvements de pointage et de rotation. Les résultats ont indiqué que les pointages requerraient un compromis entre les durées des mouvements sur la feuille et en l'air. Les mouvements de rotation impliquaient une réduction de l'écart entre les vitesses maximales et minimales. Le respect d'un *tempo* de l'écriture semble gouverner ces stratégies compensatoires qui sont spécifiques au type

[1] Dans ce document nous privilégierons le terme *stroke* plutôt que « trait » car le terme en anglais intègre la notion de dynamique du geste.

[2] Le terme de *chunk* fait généralement référence à une seule unité construite à partir de plusieurs éléments plus petits (Gobet, Lloyd-Kelly & Lane, 2016)

de mouvement. Au niveau développemental, la présence de paliers dans les données cinématiques, laisse à penser que la majeure partie de l'évolution se situe dans la période 6-8 ans, et précède une phase de stabilisation entre 8 et 10 ans caractérisant le début de l'automatisation des mouvements d'écriture. Notre travail met ainsi en évidence que plus l'enfant grandit et pratique l'écriture, plus il/elle est capable de programmer des chunks d'informations plus importantes. Or, cette augmentation en taille de la mémoire procédurale n'est pas seulement quantitative, elle s'accompagne d'une gestion différentielle en fonction du type de stroke à réaliser. Le contenu du programme moteur ne se limiterait donc pas à des informations sur la forme, l'ordre et la direction des strokes mais détiendrait également des informations permettant la mise en place de stratégies cinématiques compensatoires pour des gestes spécifiques comme ceux de rotation et de pointage. Les programmes moteurs s'élaborent pendant le processus d'apprentissage, qui s'étale sur la période 6-7 ans. À partir de 8 ans, ces acquisitions commencent à s'automatiser avec la pratique et l'augmentation des capacités cognitives, attentionnelles et mnésiques. L'automatisation de l'écriture semble être acquise pour la plupart des lettres entre 9 et 10 ans, et devient alors un outil de communication langagière. Les implications de ces résultats sont directement applicables en milieu scolaire.

Mots clés : Écriture, enfant, automatisation, mouvement, programme moteur

Abstract

Written production is an automated motor activity for adults. Writing is smooth and fast because letter production relies on the prior activation of a procedural memory known as “motor program” or “sensori-motor map”. Our investigation focused on how motor programs develop during writing acquisition. We examined how writing evolved from stroke-to-stroke programming to letter-to-letter programming. In all our studies we recorded the children's writing movements with a digitizer. In the first experiment, 98 children aged 6 to 9 had to write letters of varying numbers of strokes. The results indicated that at ages 6-7, movement duration, dysfluency and trajectory increased with the letter’s number of strokes. The letters were produced by the activation of the first stroke, then the second stroke, and so on until the completion of the whole letter. The number of strokes affected much less the productions of the older children. They assembled the strokes into chunks, which gradually increased in size, until they could write, at the end of the automation process, with a letter-to-letter programming strategy. The analysis revealed that the first automatisms stabilized at age 8. However, some letters remained represented in chunks even among the older children. Specific types of strokes affected the stabilization of letter automation. We thus carried out another experiment to examine the impact of the rotation strokes that are necessary for the production of curved lines (e.g., to produce letter *o*) and the pointing movements that position the pen after a lift (e.g., to produce the dot on letter *i*). In the experiment, 108 children aged 6 to 10 wrote sequences of upper-case letters varying in pointing and rotation movements. The results indicated that the production of rotation movements required a speed trade-off to decrease differences between maximum and minimum velocities. Pointing movements required a duration trade-off between the movements executed on the sheet and in the air. There seems to be a sort of *tempo* for letter production that modulates letter production. This requires compensatory strategies that are cognitively demanding. At the developmental level, the kinematic data suggests that most of the learning process takes place between ages 6 to 8. Then there is stabilization phase that marks the beginning of writing automation. It evolves between ages 9 and 10. Our work thus revealed that as the child practices writing, the motor programs code increasingly bigger information chunks. This quantitative increase in procedural memory is also accompanied by qualitative information for certain types of strokes that require specific processing. Therefore, the content of motor programs is not limited to information about letter shape, stroke order and direction. Motor programs also code information on compensatory kinematic strategies for rotation and

pointing movements. These motor programs are elaborated during the learning process between ages 6 to 7. At around age 8, with practice and the increase of cognitive, attentional and memory skills, they start to stabilize and become automated. At ages 9-10, writing is automated for most letters and becomes a linguistic communicational tool. The implications of these results are directly applicable in schools for the improvement of pedagogical tools in teaching writing.

Keywords: Handwriting, children, automation, movement, motor program

Note

Cette thèse doctorale est présentée sous forme d'article. Les références bibliographiques sont les suivantes :

Séraphin Thibon, L., Gerber, S. & Kandel, S. (2018). The elaboration of motor programs for the automation of letter production. *Acta Psychologica*, 182, pp. 200-211. doi.org/10.1016/j.actpsy.2017.12.001

Séraphin Thibon, L., Gerber, S. & Kandel, S. (in press). Analyzing variability in upper-case letter production in adults. In C. Perret & T. Olive (eds.). *Writing Words: Theoretical and methodological advances in word production research*. Studies in Writing Series. NL: Brill Editions.

Séraphin Thibon, L., Barbier, G., Vilain, C., Sawallis, T.R., Gerber, S. & Kandel, S. (2018, publié en ligne). Investigating how children produce rotation and pointing movements when they learn to write letters. *Human Movement Science*. doi.org/10.1016/j.humov.2018.04.008

Remerciements

J’adresse mes plus profonds remerciements à Sonia Kandel, ma directrice de thèse, qui bien au-delà de la transmission du savoir, m’a accompagnée dans ce parcours atypique, avec écoute et bienveillance. Sa rigueur scientifique, son professionnalisme et sa disponibilité m’ont permis de faire aboutir ce projet, tout en préservant ma part de liberté. Un grand merci Sonia !

Je tiens à remercier Madame Marina Laganaro, Professeure à l’Université de Genève, ainsi que Monsieur Thierry Olive, Directeur de recherche au CeRCA / Université de Poitiers, de l’honneur qu’ils m’ont fait en acceptant d’être les rapporteurs de cette thèse.

J’exprime ma gratitude envers Madame Marie-Line Bosse, Professeure à l’Université Grenoble-Alpes ; Monsieur Pascal Zesiger, Professeur à l’Université de Genève et Monsieur Jean-Luc Velay, Chargé de recherche CNRS au LNC / Université d’Aix-Marseille, qui ont accepté d’être les examinateurs de ce travail.

Je remercie les membres du laboratoire GIPSA-lab qui ont participé à la réflexion sur mon travail au cours de ces années, notamment Coriandre Vilain, Silvain Gerber et Guillaume Barbier.

Merci également à Thomas Sawallis pour son aide et à Manon Riffard pour sa compagnie précieuse au début de cette aventure.

Je remercie les enfants des écoles pour leur participation, toujours teintée de joie et de bonne humeur.

Enfin, je remercie mon cher époux, Laurent, de son soutien indéfectible au cours de ces années de reprise d’études et de doctorat.

Je ne pourrai terminer ces remerciements sans garder une pensée toute particulière pour Fanny et Louis, mes deux enfants qui, avec la pétulance de la jeunesse, ont toujours été très enthousiastes vis-à-vis de mes travaux.

Table des matières

Table des matières 11
INTRODUCTION 15
PARTIE THÉORIQUE 19
CHAPITRE 1 L'écriture 21
1.1 Historique 21
1.2 Modélisation de l'écriture 25
1.3 Le programme moteur 31
CHAPITRE 2 Production de l'écriture et dynamique développementale 43
2.1 Le contrôle moteur dans la production de l'écriture 43
2.2 Mouvements de pointage et de rotation 46
2.3 Développement moteur 49
2.4 Du graphisme à l'écriture 56
CHAPITRE 3 L'automatisation 59
3.1 Les stratégies de contrôle 59
3.2 Les indicateurs de l'automatisation 60
3.3 L'anticipation motrice 67
PRÉSENTATION DU TRAVAIL DE DOCTORAT 75
PARTIE EXPÉRIMENTALE 77
CHAPITRE 4 Méthodologie 79
4.1 Analyse de l'écriture chez l'enfant 79
4.2 Analyse des données 80
CHAPITRE 5 Étude 1 - Élaboration des programmes moteurs dans l'automatisation de la production des lettres 87
CHAPITRE 6 Étude 2 - Analyse de variabilité de la production des lettres majuscules chez l'adulte 101
CHAPITRE 7 Étude 3 - Comment les enfants produisent-ils des mouvements de pointage et de rotation quand ils/elles apprennent à écrire les lettres ? 121
DISCUSSION GÉNÉRALE 139
CHAPITRE 8 Discussion, limites et perspectives 141

8.1 Étude 1 : Étude de l'évolution de la taille des programmes moteurs des lettres 141

8.2 Étude 2 : Étude descriptive de la production de lettres majuscules chez l'adulte 145

8.3 Étude 3 : Étude des mouvements de rotation et de pointage en écriture 146

8.4 L'inhibition, un autre indicateur d'automatisation ? 150

CONCLUSION 153

RÉFÉRENCES 157

ANNEXE 1 – Agrément du CERNI 179

ANNEXE 2 – Convention d'accueil 181

ANNEXE 3 – Lettre d'information aux familles 185

Épigraphe

« L’écriture est la peinture de la voix, plus elle est ressemblante, meilleure elle est. »

François Marie Arouet, dit Voltaire (Dictionnaire philosophique, 1771)

INTRODUCTION

De nos jours, l'activité d'écriture manuscrite est un outil culturel essentiel à la communication, à la mémorisation et à la transmission d'information malgré l'avènement de l'écriture tapuscrite. Écrire des notes, remplir un formulaire, ou encore établir une liste de courses, fait partie du quotidien de notre société. À l'école, l'enfant passe la majeure partie de sa journée scolaire dans des tâches impliquant l'écriture manuscrite. C'est pourquoi ce travail de thèse revêt une importance majeure au niveau pédagogique et sociétal. Il est, en effet, essentiel de comprendre les mécanismes qui permettent à l'enfant, la mise en place de cet outil indispensable.

L'écriture engage à la fois des processus cognitifs de nature centrale comme la gestion des contenus sémantiques, la syntaxe et l'orthographe, mais aussi des processus périphériques responsables de la réalisation du mouvement et de l'utilisation conjointe des muscles de la main et des doigts afin de tracer des lettres. Contrairement à la parole, l'acquisition de ces mécanismes centraux et périphériques requièrent bien plus que le bain linguistique. L'acquisition du langage écrit nécessite un apprentissage formel, long et coûteux dispensé, en France, à partir de la première année d'école élémentaire. Au début de cet apprentissage, le geste est lent et dysfluent. L'effort que les jeunes apprentis scripteurs dispensent pour produire la forme et la taille correcte de chaque lettre accapare la grande majorité de leurs ressources attentionnelles et mnésiques. Progressivement, au cours du développement, l'écriture devient plus fluide et plus rapide. Chez les scripteurs experts, l'écriture est régulière, stable et automatisée. L'effort pour produire la trace écrite est réduit. Les processus attentionnels et mnésiques sont principalement dévoués aux processus rédactionnels et orthographiques. L'enregistrement des mouvements d'écriture à l'aide d'une tablette digitalisante fournit des données cinématiques qui nous renseignent indirectement sur les coûts cognitifs de cet acte graphique.

Notre étude s'est intéressée aux aspects grapho-moteurs de l'écriture chez les enfants de 6 à 10 ans. Nous avons cherché à comprendre comment se mettent en place les mécanismes d'automatisation de l'écriture au cours du développement. Les facteurs impliqués dans l'automatisation de l'écriture sont multiples. Nous avons focalisé notre attention sur l'élaboration des programmes moteurs des lettres car il s'agit d'une étape essentielle à la production de l'écriture. En effet, les programmes moteurs constituent une mémoire procédurale qui détermine la manière dont les mouvements de la main seront réalisés pour

produire une lettre. Ils sont stockés en mémoire à long terme et récupérés lors de la production des gestes. Nous supposons que les programmes moteurs s'enrichissent avec la pratique et la maturation neuro-musculaire. De la taille d'un trait au début de l'apprentissage, il passerait à la taille de la lettre entière chez l'adulte (Teulings, Thomassen & Van Galen, 1983). Dans notre première étude, nous nous nous sommes attachés à comprendre quelles sont les différentes étapes, au cours du développement, de cet accroissement de taille du programme moteur. D'autre part, l'écriture manuscrite est le fruit d'une succession de signes graphiques requérant des mouvements spécifiques et il semble que certains gestes soient plus coûteux que d'autres. Notre travail a cherché à mesurer l'impact de deux types de mouvements d'écriture que nos observations en milieu scolaire font apparaître comme étant plus « difficiles » : les mouvements de rotation qui permettent la réalisation de traits courbés comme dans la lettre *o* et les mouvements de pointage qui sont effectués pour mettre la barre au *t*.

L'intérêt de cette thèse réside dans l'approfondissement de la connaissance que nous avons des aspects cognitifs de l'écriture et elle ouvre la voie à tout un champ d'application pédagogique et de remédiation en matière d'écriture manuscrite. Ce manuscrit doctoral constitue une thèse dite « sur articles » car nos expériences ont déjà été publiées dans des revues internationales spécialisées et une est sous presse comme chapitre d'ouvrage. La première partie de ce manuscrit se consacre à un état de l'art des travaux sur l'écriture avec un premier chapitre décrivant notre objet d'étude. Nous présentons une revue des études qui investiguent directement ou indirectement comment l'enfant élabore les programmes moteurs pour produire des lettres. Le deuxième chapitre concerne les travaux sur le développement moteur car il est indispensable à l'acquisition des mouvements d'écriture. Nous ciblons plus spécifiquement les différentes composantes en interaction avec la production de la trace écrite comme le repérage spatial ou encore la coordination oculo-motrice, puis nous évoquons la transition entre le dessin et l'écriture. Enfin, nous définissons, dans le troisième chapitre, les indicateurs qui nous ont semblés pertinents pour l'étude des processus d'automatisation du geste d'écriture.

La partie expérimentale, qui constitue la deuxième partie de ce manuscrit, est structurée en quatre chapitres, dont trois que nous présentons sous forme d'articles. Le chapitre 4 détaille les aspects méthodologiques suivis dans le cadre de nos expérimentations. Le chapitre 5 expose l'article dont l'objectif était d'approcher le processus d'automatisation de l'écriture à travers l'élaboration des programmes moteurs des lettres. Notre étude visait à rendre compte du processus développemental qui permet l'augmentation de la taille des programmes moteurs des lettres. Le chapitre 6 présente une étude méthodologique déclinant le geste d'écriture en une

succession de traits et de levers de stylo. Cette étude nous a conduit à mieux caractériser chacune des lettres de l'alphabet en termes de strokes[3] afin de contrôler le plus possible le matériel expérimental de la dernière étude. Enfin, le chapitre 7 présente une étude approchant l'automatisation de l'écriture à travers la gestion de mouvements d'écriture complexes, comme les gestes de rotation et de pointage, qui sont cognitivement coûteux. Le chapitre 8 est consacré à la discussion des résultats de notre travail expérimental. Ce manuscrit s'achève par une conclusion où nous envisageons des perspectives de recherche en vue d'un approfondissement de connaissances issues de nos études et de nos réflexions ainsi que quelques orientations pédagogiques en matière d'enseignement de l'écriture.

[3] Dans ce document nous privilégierons le terme *stroke* plutôt que « trait » car le terme en anglais intègre la notion de dynamique du geste.

PARTIE THÉORIQUE

Cette partie présente une revue des différentes études visant à mieux comprendre comment s'opère la production de l'écriture chez l'enfant en développement ainsi que sur les étapes qui mènent à son automatisation. Nous abordons les principaux modèles sur le processus d'écriture. Puis nous nous concentrons sur la nature et la taille des programmes moteurs, nécessaires à la production des lettres chez l'enfant. Tout d'abord, voyons en quoi historiquement, l'écriture a été une découverte aux implications multiples y compris encore dans notre quotidien.

CHAPITRE 1

L'écriture

1.1 Historique

De nos jours, l'écriture nous semble si familière que nous ne nous émerveillons plus de son existence. Elle berce notre enfance à l'école et fait partie de notre quotidien. Or, cette invention a fait basculer nos civilisations dans l'histoire. L'homme avait trouvé un moyen pérenne de conserver sa mémoire. Ce fut en premier lieu par ce que l'on nomme les proto-écritures (Figure 1.1, à gauche), tels les signes accolés aux représentations de l'art rupestre et les premiers pictogrammes, que l'homme inscrivit sa connaissance qu'il avait du monde sur des supports comme l'os ou la roche (Robinson, 1995).

Figure 1.1 À gauche, bison de la grotte de Marsoulas et proto écriture (France). À droite, la lettre *A* de l'alphabet latin dérivé de la première lettre de l'alphabet phénicien (aleph) elle-même dérivée du signe hiéroglyphique représentant la tête de bœuf (Robinson, 1995).

Les premiers signes tracés étaient le plus souvent à caractères répétitifs (Schmandt-Bessart, 1996, 2007). L'intention de communiquer, de garder une trace en mémoire des informations socialement et culturellement importantes, a été déterminante. Ces premières traces furent le substrat à l'émergence des premières écritures. Le regroupement des populations en système organisé autour d'institutions politiques et religieuses a joué un rôle fondamental dans le développement d'une fonctionnalité accrue de l'écriture. Ainsi, les formes figuratives, cédèrent la place à des systèmes plus symboliques, comme par exemple les logogrammes de Mésopotamie (3300 av J.-C.), permettant les transactions commerciales et la comptabilité des possessions. Le geste d'écriture était alors réservé aux experts, apanage de scribes, formés à l'utilisation de calames. Ce bambou, taillé en coin sur une extrémité et en équerre sur l'autre, laissait des empreintes sur des tablettes d'argile que l'on faisait ensuite sécher.

Petit à petit, ces systèmes se complexifient, et l'on voit apparaître les premières conversions de sons en signes abstraits par les Akkadiens (2000 av J.-C.). Les caractères tracés ne correspondent plus à des symboles représentant uniquement des concepts et des idées mais commencent à intégrer la forme sonore des mots parlés. Les tablettes d'argiles ne sont plus de simples listes comptables mais des supports de textes administratifs, législatifs, religieux ou mythiques. Progressivement, par une longue pratique graphique, la différentiation phonétique se fit plus fine et on attribua un signe particulier au son commun. Il semble que l'alphabet phénicien, sous l'influence de l'alphabet égyptien, soit l'ancêtre des alphabets européen et asiatique. Ainsi le *A* de l'alphabet latin et le *alpha* du grec dérivent de la première lettre de l'alphabet phénicien (*aleph*) qui est une altération du signe hiéroglyphique représentant une tête de bœuf (Figure 1.1, à droite). Sur l'origine de l'ordre de l'alphabet, nous ne savons cependant que peu de choses. Une des hypothèses avancées serait que l'ordre de l'alphabet coïnciderait avec la fréquence de sons utilisés (Robinson, 1995). Parallèlement, les outils, comme les supports, se sont modifiés au cours des âges. La plume a supplanté le calame et le papyrus l'argile ; chaque adaptation fut la conséquence de l'apprentissage d'une nouvelle technique. La plume, glissant plus vite sur le papyrus, les lettres commencent à se lier les unes aux autres et donnent naissance à l'écriture cursive (du latin « *currere* », courir), que nous nommons aussi écriture « liée » ou « en attaché » ; elle apparait à la fin du XIVème siècle. Aujourd'hui, le papier est le support d'écriture le plus utilisé et le stylographe privilégié est sans doute le stylo-bille, accepté dans les écoles à partir des années 1965. L'écriture courante enseignée dans les institutions françaises est du type lié.

1.1.1 Importance de l'écriture

Il est certain qu'aujourd'hui encore savoir écrire est un gage d'inclusion sociale. Malgré l'avènement de tablettes tactiles et autres écritures numériques, l'écriture est en de nombreuses occasions toujours très utilisée. En connaître les secrets nous lie au monde qui nous entoure. L'écriture a une fonction culturelle fondamentale car savoir écrire, c'est aussi savoir communiquer : on partage alors sa pensée, on transmet des informations, on garde en mémoire des impressions. L'écriture est un outil relationnel car écrire c'est aussi divulguer, exprimer une identité. Nous avons une écriture qui nous est propre et qui est le reflet de notre propre individualité. Enfin, la fonction instrumentale de l'écriture en fait un outil particulièrement puissant. Elle transcrit la parole ou la pensée sur un support et garde pérenne, dans le temps et dans l'espace, le message ainsi transcrit. Liliane Lurçat (1988) définit cinq fonctions à l'écrit : l'écrit est une activité individuelle, un moyen d'expression, une acculturation, un moyen

d'élaboration du sens et un moyen de communication. À l'école, les enfants passent environ 50% de leur temps sur des tâches requérant le papier et le crayon dont une forte proportion en tâches d'écriture (Amundson & Weil, 1996 ; Marr, Windsor & Cermak, 2001 ; Marr, Cermak, Cohn & Henderson, 2003 ; McHale & Cermak, 1992 ; Santangelo & Graham, 2016).

1.1.2 Qu'est-ce que l'écriture ?

Le dictionnaire Le Nouveau Petit Robert (p.832) définit l'écriture, dans sa première acceptation, comme « la représentation de la parole et de la pensée par des signes graphiques conventionnels destinés à durer ». Celle proposée par le Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales (CNRTL) dans sa deuxième acceptation, définit le mot *écriture* comme : « action d'écrire ». L'écriture se définit donc, à la fois par des processus de représentation langagière mais aussi par une activité motrice. Toute production écrite est le résultat préalable d'un traitement cognitif de haut niveau. Les mots vus, entendus, énoncés en langage intérieur, ou même sous forme d'image, sont traités et convertis en langage écrit. Non seulement l'écriture mobilise de grandes ressources attentionnelles (Halsband & Lange, 2006 ; Kao, Mak & Lam, 1986 ; McCutchen, 1996 ; Olive & Kellogg, 2002 ; Ransdell & Levy, 1996 ; Scardamalia & Bereiter, 1986) mais elle recrute les circuits neuronaux impliqués dans la perception des lettres (James & Engelhardt, 2012) ce qui semble lié à l'acquisition de l'orthographe ou à celle de la composition de texte (Abbott, Berninger, & Fayol, 2010 ; Berninger & Alsdorf, 1989 ; Fayol & Miret, 2005 ; Graham, Berninger, Abbott, Abbott, & Whitaker, 1997 ; Medwell, Strand, & Wray, 2007 ; Pontart et al., 2013 ; Puranik & Al Otaiba, 2012). Dans leur étude de 1999, Jones et Christensen ont cherché à mesurer les relations qu'entretiennent, les habiletés en écriture manuscrite avec les capacités d'intégration des informations motrices des lettres chez des enfants de 6 à 7 ans. Ils ont également voulu savoir s'il existait un lien entre performance en écriture et génération de texte. Leurs observations ont révélé que l'effet d'un entraînement supplémentaire à l'écriture chez des enfants en difficultés engendrait une amélioration, non seulement en termes d'intégration motrice, mais aussi en matière de composition des phrases. L'amélioration peut aussi s'observer dans la production de textes (Berninger, Whitaker, Feng, Swanson, & Abbott, 1996 ; Jones & Christensen, 1999) ou encore en reconnaissance des lettres où elle est meilleure lorsque l'apprentissage de l'écriture s'est effectué avec la main (Velay, Longcamp & Zerbato-Poudou, 2004).

L'écriture est à la fois une activité impliquant des traitements abstraits de haut niveau, permettant la transcription d'un code oral à un code écrit, mais aussi une activité motrice

générant une action, un mouvement. Nous nous attacherons principalement, au travers de cette thèse doctorale, aux processus moteurs de l'activité écrite.

1.1.3 La production de l'écriture

La production de l'écriture a été souvent approchée à travers les aspects qualitatifs et/ou quantitatifs de la trace produite, le produit formel de l'écriture (Albaret & Santamaria, 1996 ; Danna, Velay & Albaret, 2016 ; Henderson, 1987 ; Rosenblum, Parush, & Weiss, 2003 ; Rosenblum, Weiss, & Parush, 2004). Les approches qualitatives utilisent des échelles de jugement permettant de différencier certains aspects des productions, comme la tenue sur la ligne ou encore la régularité du tracé. L'analyse quantitative se focalise principalement sur les paramètres dynamiques de la production du mouvement graphique. Un des précurseurs de l'analyse cinématique de l'écriture fut Freeman (1914). Il utilisait un kymographe (Figure 1.2). Il s'agit d'un instrument servant à l'enregistrement graphique des mouvements. Cet appareil est formé d'un stylet relié à un membre du corps dont on étudie le fonctionnement et il inscrit les variations dynamiques sur un tambour vertical en rotation (Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales, 2012). Freeman comparait les enregistrements du déplacement de la pointe du stylo de l'écriture d'adultes à ceux d'une dizaine d'enfants de 9 à 15 ans. Il concluait à une absence de rythme et d'automaticité chez l'enfant, s'accompagnant d'une écriture irrégulière.

Figure 1.2. Kymographe vertical de Zimmermann (1907).

Depuis l'avènement des tablettes digitales dans les années 1980, la production de l'écriture peut être évaluée sur de nombreux autres aspects dynamiques de l'écriture, analysant

ainsi le processus lui-même (Charles, Soppelsa, & Albaret, 2003). L'enregistrement des données permet d'obtenir, outre les mesures de nature spatiale et géométrique, des informations sur toute une série de mesures cinématiques comme la vitesse du mouvement avec ses accélérations et décélérations ainsi que son évolution au cours du temps, la durée du geste sur la feuille et en l'air, ou encore la pression du stylo sur la surface d'écriture. Nous reviendrons en détail sur ces aspects dans le chapitre consacré à la présentation méthodologique. Au regard des observations comportementales sur tablette graphique, des modèles permettant de rendre compte des principes organisateurs de la production écrite ont été proposés.

1.2 Modélisation de l'écriture

L'apport des psychologues et des neuropsychologues a permis, grâce à l'étude comportementale d'individus avec et sans lésion cérébrale, d'étoffer notre compréhension des processus d'écriture. Les premiers modèles de l'écriture ont été basés sur des données neuropsychologiques issues de patients cérébrolésés. Margolin (1984) ainsi que Baxter et Warrington (1986) ont décrit les comportements de patients éprouvant des difficultés à produire les mouvements nécessaires à l'écriture des lettres d'un mot, mais qui par ailleurs présentaient des performances correctes dans l'épellation de ce dernier. Dans cette perspective, Ellis (1988) a tenté d'expliquer les différentes étapes de la production écrite de mots isolés et a proposé un modèle de production de l'écriture experte chez l'adulte en tenant compte à la fois des observations des productions de patients et des erreurs de production chez les individus normo-scripteurs (Figure 1.3).

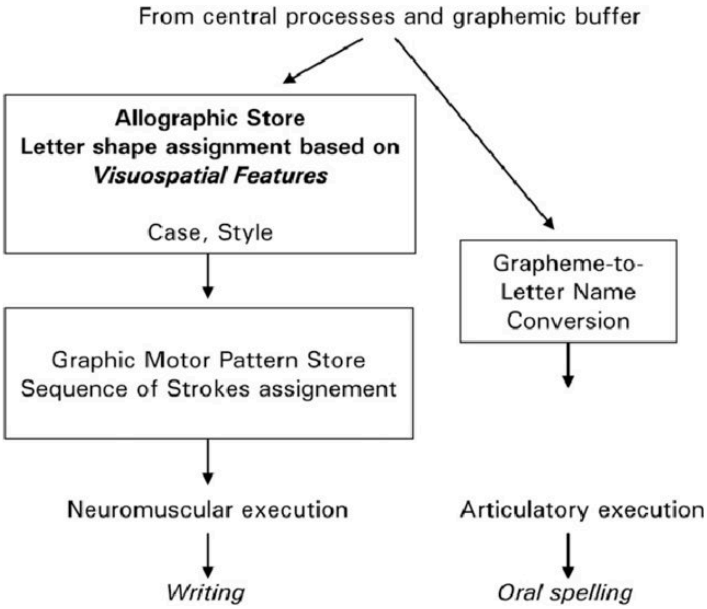

Figure 1.3. Architecture fonctionnelle des processus périphériques de l'écriture selon Ellis (1988). Tiré de Di Pietro, Schnider & Ptak (2011).

Le modèle de Ellis (1988) suppose que les processus centraux permettant la récupération de l'orthographe précèdent les traitements de nature périphérique. Cette supposition est basée sur les données d'études de cas mettant en évidence une dissociation entre les processus orthographiques – qui reposent sur des traitements de nature lexicale et de conversion graphophonologique – et les processus périphériques (Caramazza, Miceli, Villa, & Romani, 1987 ; Rapp, Epstein, & Tainturier, 2002). La séquence de lettres récupérée à l'issue des processus orthographiques est stockée temporairement dans le *buffer*[4] graphémique et fournit l'input pour les traitements de bas niveau. La production de l'écriture implique des processus périphériques différents à ceux de l'épellation. Lors de l'écriture manuscrite, le niveau allographique détermine les aspects géométriques des lettres et intervient lors de la sélection de la forme des lettres, du type d'écriture (script ou cursif) ou encore de la casse (majuscule ou minuscule). Ce niveau de traitement permettra d'attribuer une représentation spatiale à chaque lettre de la séquence à écrire, qui sera transmis au niveau de traitement inférieur. Le niveau des patterns[5] moteurs serait le responsable de la récupération des représentations motrices qui déterminent les séquences de strokes à réaliser pour produire chaque lettre. Ces informations permettraient l'exécution neuromusculaire destinée à la mise en mouvement des formes des lettres.

S'appuyant sur le modèle d'Ellis pour les processus périphériques et sur le modèle de production orale de Levelt (1989) pour les modules en relation avec les aspects linguistiques,

[4] Mémoire de travail (Caramazza, Miceli, Villa & Romani, 1987)
[5] Schèmes moteurs

Van Galen (1991) a proposé un modèle de l'écriture qui fait encore actuellement référence en matière de production écrite chez l'adulte. Nous décrirons ci-dessous les différents modules qui composent ce modèle en nous attachant particulièrement aux composantes périphériques car elles sont directement en rapport avec le travail présenté dans cette thèse.

1.2.1 Modèle de production de l'écriture de Van Galen (1991)

Pour Van Galen (1991), le mouvement d'écriture serait le résultat d'une transmission aux muscles effecteurs des différentes caractéristiques du mouvement à réaliser. Il conçoit un modèle de l'écriture faisant intervenir une série de modules de traitement organisés selon une architecture hiérarchique de type *top-bottom* (du central vers la périphérie) (Figure 1.4, colonne de gauche).

Les trois premiers modules à être activés décrivent les traitements centraux : activation d'intentions, rappel sémantique et construction syntaxique. Ils font référence à des traitements communs à tous les mouvements linguistiques, tels que la production de la parole, la dactylographie et l'écriture. L'écriture se distingue du langage oral à partir du module orthographique. Dans ce module sont stockés les mots dont nous connaissons l'orthographe. L'intention d'écrire un mot activera la séquence de lettres qui compose ce mot. C'est cette séquence de lettres qui sera l'input[6] fourni au module de traitement suivant. Les trois derniers modules décrivent les processus périphériques, que Van Galen a appelé la sélection des allographes, le contrôle de la taille et l'ajustement musculaire. Les informations sont traitées dans chaque module de façon indépendante et simultanée, et sont stockées dans des tampons de stockage (buffer ; Figure 1.4, colonne de droite). Ceux-ci exposent les catégories d'éléments stockés dans les différents types de mémoire. Ce contenu sera maintenu actif le temps nécessaire aux traitements des différents modules. Les informations, ainsi conservées, sont transmises au module inférieur de façon sérielle. La taille de l'unité traitée diminue selon le niveau hiérarchique : c'est au niveau le plus périphérique que la taille de l'unité de traitement est la plus petite (Figure 1.4, colonne centrale).

[6] L'entrée

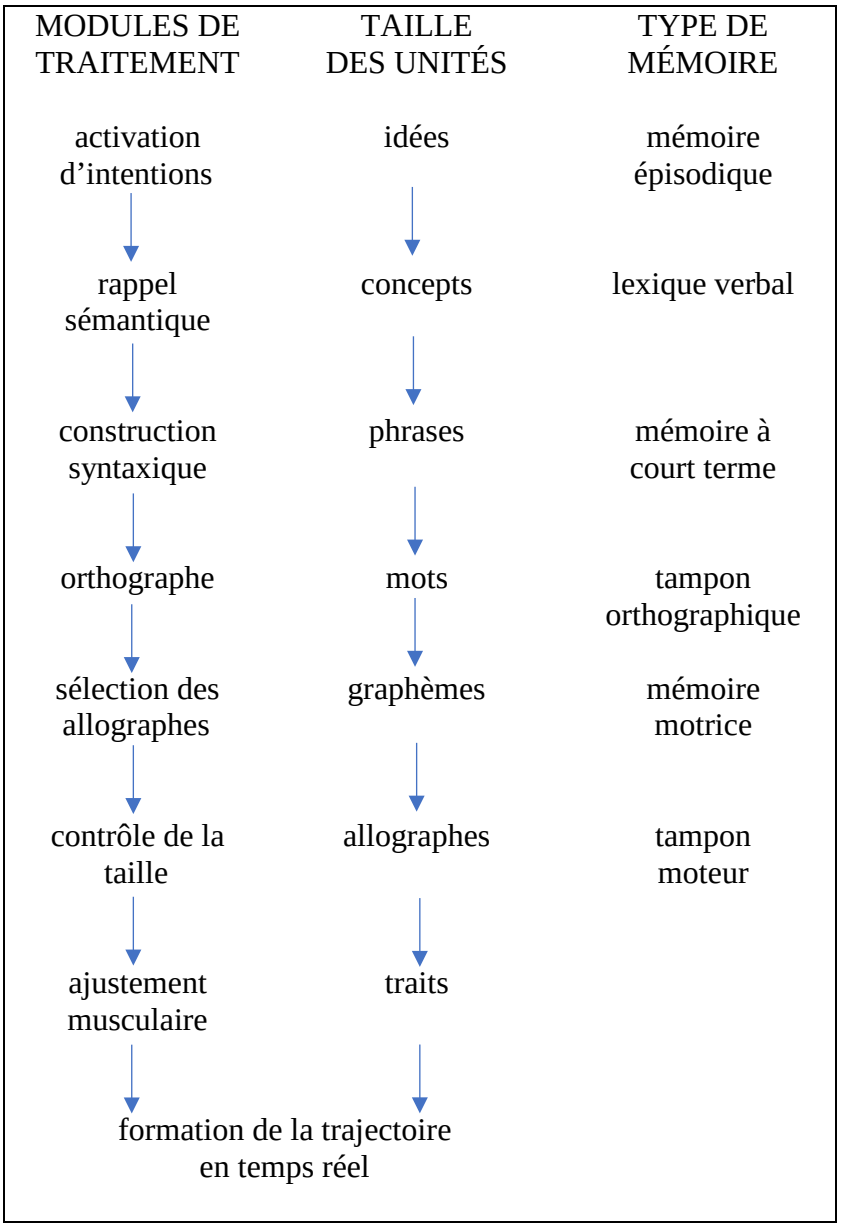

Figure 1.4. Le modèle d'écriture manuscrite de Van Galen (1991). Tiré de Zesiger (1995).

Nous focaliserons notre attention sur les dernières étapes du modèle, celles en rapport avec le contrôle moteur, car notre étude porte plus précisément sur le développement du contrôle moteur de la production de lettres. Le module allographique récupère du module orthographique des informations sur la séquence exacte des lettres à écrire. Chaque lettre peut prendre des formes différentes et c'est au niveau de ce module que l'allographe correspondant à chaque lettre sera sélectionné. Une fois l'allographe défini, son programme moteur peut être activé. À chaque allographe correspond un programme moteur, stocké sous forme de codes spatiaux ainsi que d'informations de nature cinématique, comme l'ordre et la direction des traits à réaliser. Cette représentation, basée sur le type d'écriture (majuscule, minuscule, script, cursif)

est alors récupérée dans la « mémoire motrice ». Le module inférieur, dit de « contrôle de la taille », se charge de gérer la taille de la lettre mais aussi sa vitesse et la force d'exécution. Cette étape permet l'ajustement aux contraintes environnementales –e.g., les supports de l'écrit– et au contexte d'écriture –e.g., l'enchaînement des lettres. En d'autres termes, cette étape adapte le mouvement d'écriture, comme par exemple écrire en grande taille sur un tableau ou en plus petit sur une feuille. Enfin, le dernier module concerne l'étape de traitement permettant la mobilisation des muscles agonistes et antagonistes nécessaires au tracé d'écriture. Ce processus est également à l'œuvre dans d'autres tâches de motricité fine comme le dessin.

Si ce modèle décrit une écriture adulte automatisée du type *top-bottom*, il n'intègre pas les retours visuels et sensori-moteurs, qui vont de la périphérie au cortex, du type *bottom-up*, comme cela est décrit dans l'étude de Smyth et Silvers (1987). Van Galen (1991) les considère comme une condition naturelle mais pas strictement nécessaire à la production de l'écriture. Il s'agit là d'une des limitations de ce modèle. Notons également que ce modèle décrit l'écriture automatisée chez l'adulte, mais ne considère pas les aspects développementaux. Les premiers écrits de l'enfant sont souvent lents et progressent selon une méthode d'essai et d'erreur. La trace écrite est le fruit de l'activation de systèmes de contrôles visuels et sensori-moteurs qui corrigent à postériori les tracés. L'enfant va adopter progressivement un système de contrôle dit « en boucle ouverte », lui permettant ainsi le contrôle de la trace à produire de façon proactive. Malgré ces limitations, cette conception de l'écriture reste néanmoins le modèle de référence pour des nombreuses études sur la production écrite. Il a même été utilisé comme base pour intégrer des aspects psycholinguistiques comme les traitements syllabiques et morphologiques (Kandel, Peereman, Grosjaques, & Fayol, 2011 ; Quémart & Lambert, 2017).

Le modèle de Van Galen (1991) a également été revisité par Planton et Kandel (2017) pour rendre compte des processus impliqués lors de la production de tâches différentes comme l'écriture, l'épellation ou encore l'écriture tapuscrite pour des tâches d'écriture sous dictée et de dénomination d'images (Figure 1.5). Il est important de noter que des études plus récentes ont proposé une nouvelle terminologie pour le « *buffer* graphémique » ou « tampon orthographique » du modèle de Van Galen (1991). Le terme de « mémoire de travail orthographique » semble être plus approprié à un niveau descriptif (Costa, Fischer-Baum, Capasso, Miceli & Rapp, 2011). Par ailleurs, au niveau périphérique, le module « contrôle de la taille » ne semble pas contrôler uniquement la taille de l'allographe sélectionné mais aussi d'autres paramètres.

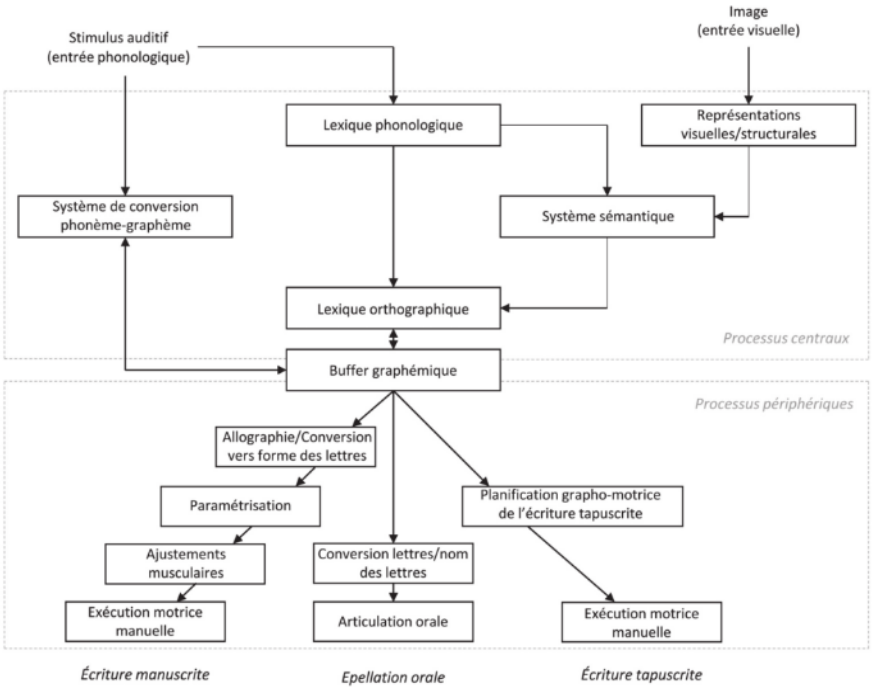

Figure 1.5. Processus centraux et périphériques de la production écrite (écriture sous dictée - entrée phonologique, ou dénomination écrite d'image - entrée visuelle) présentés dans Planton et Kandel (2017).

Ce module se caractériserait plus comme « une définition des paramètres locaux » comme le suggèrent Kandel, Lassus-Sangosse, Grosjacques et Perret (2017). Enfin, une fois l'ajustement musculaire établi, ce n'est pas seulement une trajectoire qui est réalisée mais plutôt « une production du mouvement ». Ainsi, ce modèle permet de prendre en compte la spécificité de la production d'écriture chez les adultes.

Signalons enfin que toutes ces conceptions de la production écrite suggèrent que les processus orthographiques sont terminés quand les composantes motrices de l'écriture s'activent. Or, certaines études indiquent que les processus orthographiques continuent à se dérouler pendant la réalisation des mouvements d'écriture (Afonso, Álvarez, & Kandel, 2015 ; Afonso, Suárez-Coalla & Cuetos, 2015 ; Buchwald & Falconer, 2014 ; Kandel, Peereman, & Ghimenton, 2013, 2014 ; Lambert, Alamargot, Larocque, & Caporossi, 2011 ; Lambert, Sausset, & Rigalleau, 2015 ; Roux, McKeeff, Grosjacques, Afonso, & Kandel, 2013 ; Sausset, Lambert, Olive, & Larocque, 2012). Nous ne nous attarderons pas sur les relations entre orthographe et motricité car ce travail de thèse porte sur les aspects qui concernent les modules moteurs. Nous nous attacherons particulièrement à comprendre la production motrice de l'écriture sous ses aspects périphériques uniquement, tout en sachant qu'il existe des interactions entre les composantes orthographiques et motrices. Nous allons donc consacrer le reste de cette revue de la littérature aux aspects directement en rapport avec le contrôle moteur.

1.3 Le programme moteur

Le corps humain est un corps en mouvement. Respirer, déglutir sont autant de mouvements que l'on fait sans conscience, de façon automatique. La nature intentionnelle de l'écriture en fait un mouvement à part. Mais l'intention ne suffit pas, il faut qu'elle soit suivie d'une série de processus préparatoires qui vont s'activer de façon coordonnée et permettront la réalisation du geste d'écriture. La phase préparatoire du geste démarre par l'activation du programme moteur de la lettre à tracer. Les paragraphes ci-dessous visent à fournir des informations permettant de mieux saisir la notion de programme moteur. Ceci est fondamental pour l'objectif de notre travail car un geste d'écriture ne peut se réaliser qu'au travers de l'élaboration progressive de programmes moteurs spécifiques à chaque allographe.

La notion de programme moteur est issue des théories du contrôle moteur. Un des premiers auteurs à introduire cette idée fut Karl Lashley (1951). Il supposait que dans la production de la parole comme dans toutes les activités motrices, l'initiation du geste serait précédée d'une pré-sélection des séries d'actes à réaliser ainsi que d'une pré-activation des informations concernant leur organisation temporelle. Bien que le terme de programme moteur n'ait pas été mentionné par Lashley, ces travaux ont été à l'origine de toute une série d'études relatives d'une part à la planification motrice et d'autre part au contrôle du mouvement. La planification et la programmation d'un mouvement seraient initiées au niveau du système nerveux central et dirigées, via le système nerveux périphérique, aux muscles des effecteurs. La planification motrice aurait pour but de générer une organisation temporelle de l'action. La programmation établirait l'organisation motrice et spatiale du geste (Mazeau & Pouhet, 2014). Une vingtaine d'année après les travaux de Lashley, Keele (1968) développait l'idée d'une activation préalable d'informations sur l'organisation du mouvement. Il proposait le concept de programme moteur comme étant « un ensemble de commandes musculaires structurées avant qu'une séquence motrice ne soit déclenchée, ce qui permet à toute la séquence d'être exécutée sans l'influence d'un retour d'information périphérique » (p. 387). Toutes les commandes motrices seraient stockées en mémoire mais Keele ne spécifie pas quelle serait la modalité de stockage. Par ailleurs, ce concept de programme moteur ne présente pas d'explication sur les capacités à générer un mouvement dans une tâche nouvelle dont le programme moteur ne serait pas en stocké en mémoire. Cette conception ne tient pas compte non plus du fait que la structure du mouvement reste identique quel que soit l'effecteur.

Pour arriver à une conception plus précise du programme moteur, Schmidt propose en 1975, sa « théorie des schémas », puis le principe des Programmes Moteurs Généralisés

(PMG ; Schmidt, Zelaznik, Hawkins, Frank & Quinn, 1979). Les programmes moteurs seraient mémorisés en différentes classes de mouvements. Ils permettraient de stocker un nombre plus restreint de patterns moteurs, selon certaines composantes stables, ne se spécifiant qu'en fonction des contraintes environnementales. Ces composantes seraient au nombre de trois. Elles régiraient d'une part, l'ordre des séquences de mouvements ; les forces relative et absolue dans lesquelles les muscles sont contraints et, d'autre part, les relations temporelles entre les contractions. Ainsi, un même PMG serait activé lors d'un lancer de balle et lors d'un service au tennis. Seuls les paramètres d'ajustement, comme la vitesse, la trajectoire, la durée du mouvement ou encore la sélection des effecteurs permettraient l'adaptation du mouvement en fonction du contexte. Ce modèle répond en partie à la problématique du stockage du modèle de Keele ainsi qu'au processus d'apprentissage de nouveaux gestes. Il y aurait alors transfert d'un PMG similaire et transposition au nouveau contexte en adaptant les paramètres d'ajustement. On retiendrait quatre types d'information : les informations relatives aux conditions initiales environnementales, les paramètres inscrits dans le PMG, le résultat du mouvement produit ainsi que toutes les informations sensori-motrices issues de la réalisation du mouvement.

Schmidt a défini deux types de schémas indispensables à la réalisation d'un mouvement. Dans un premier temps, le recours aux informations stockées mettrait en relation les paramètres inscrits dans le PMG et les conditions initiales. Le résultat obtenu déclencherait le mouvement. Il s'agit du schéma de rappel. Puis, un schéma de reconnaissance permettrait la mise en relation des conditions initiales et des paramètres du PMG mais aussi l'intégration des informations sensorielles. Ce dernier permettrait la correction des erreurs en donnant des réponses ajustées. Ainsi, les mouvements rapides, très balistiques, n'utiliseraient que le schéma de rappel, alors que le schéma de reconnaissance serait nécessaire pour les mouvements plus lents, en plus du schéma de rappel. Plus tard, Viviani (1994) est revenu à la notion de programme moteur et a fourni une définition un peu plus fine. Il considère le programme moteur comme « une structure abstraite, stockée dans le cortex, correspondant à un geste particulier, qui spécifie les rapports topologiques et séquentiels entre ses composantes » (p. 785). Puis en 2003, Keele, Ivry, Mayr, Hazeltine et Heuer reprennent ces concepts et rebondissent sur la définition du programme moteur : « Typiquement, une séquence est représentée en interne sous la forme d'une série d'actions, organisées hiérarchiquement » (p. 332). De façon récurrente, les études sur la production de l'écriture manuscrite font référence à cette notion car elles partent du principe que la réalisation d'une lettre requiert l'activation préalable d'une représentation motrice de la séquence de mouvements à exécuter pour la tracer.

1.3.1 La taille des programmes moteurs

Plusieurs auteurs ont tenté de mieux comprendre le contenu des programmes moteurs utilisés lors de la production de l'écriture. Teulings, Thomassen et Van Galen (1983) ont été parmi les premiers à se questionner sur la quantité d'éléments stockés dans le programme moteur et les processus qui permettaient leur récupération. Ils ont conduit une expérience qui avait pour objectif de déterminer si, chez l'adulte, la taille de l'unité de traitement était le stroke ou la lettre entière. Ils ont comparé la production des strokes de 16 digrammes (séquences de deux lettres composées des combinaisons des lettres *e*, *u*, *j*, *n* ; Figure 1.6).

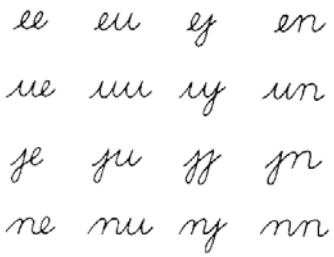

Figure 1.6. Les paires de lettres utilisées dans l'expérience de Teulings et al. (1983).

Ils ont construit leur matériel expérimental en supposant que si l'unité de traitement était la lettre, alors la production des paires de lettres identiques devrait être facilitée par rapport à celle des autres paires, car produire une deuxième lettre identique impliquerait la mise en mouvement d'un programme moteur déjà activé. Ceci a été confirmé par les résultats, qui ont indiqué que la latence pour produire le digramme *ee*, par exemple, était plus courte que celle des digrammes *eu*, *ej* et *en*. Selon les auteurs, pour *ee* le programme moteur de la lettre *e* a été activé et appliqué deux fois. Pour les autres digrammes, deux programmes différents ont dû être activés, ce qui expliquerait l'augmentation du temps de réaction. Les auteurs suggèrent que les programmes moteurs des lettres reposent sur des unités de traitement de l'ordre de la lettre complète. Cette hypothèse a été confortée par les travaux de Meulenbroek et Van Galen (1989) chez l'enfant de 8 à 12 ans. Ils ont comparé la production de strokes constitutifs des lettres cursives elles-mêmes (strokes intra-lettres) avec celle de strokes de connexion qui lient les lettres les unes aux autres (strokes inter-lettres). Les résultats ont révélé des durées de mouvement plus longues pour les strokes inter-lettre que pour les strokes intra-lettres. De plus, les gestes des enfants étaient plus dysfluents lorsqu'ils produisaient les strokes de connexion que les autres strokes. Ceci appuyait l'idée que l'unité de traitement pour l'écriture cursive était la lettre dès 8 ans.

Pour approfondir les connaissances sur les informations traitées lors de la planification des mouvements d'écriture, Van Mier et Hulstjin (1993) ont mesuré l'effet de la longueur et de la complexité du mouvement sur la latence. Des sujets adultes devaient copier plusieurs fois des séquences de lettres de différentes longueurs, ainsi que des dessins non familiers de complexité variable en nombre de strokes (Figure 1.7).

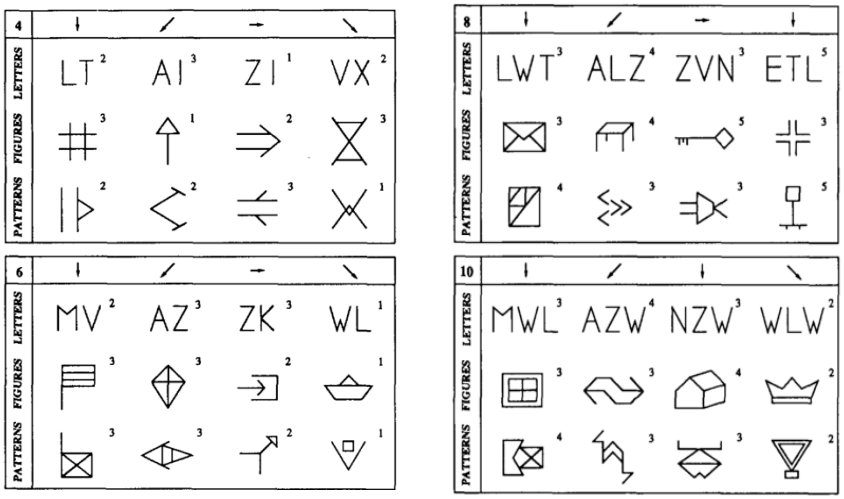

Figure 1.7. Les 48 stimuli utilisés dans l'expérience de Van Mier & Hulstjin (1993). Les stimuli ont été présentés aux participants un à un. Le chiffre dans le coin de la partie supérieure gauche de chaque boîte représente le nombre de strokes, le chiffre à droite de chaque stimulus représente le nombre de mouvements de lever de stylo. Les flèches dans la ligne de la partie supérieure de chaque case indiquent la direction du premier stroke de chaque stimulus.

Les résultats ont révélé que les latences pour produire les dessins ont été impactées par le nombre de strokes à tracer, alors que les latences pour produire les lettres étaient influencées par le nombre de lettres dans la séquence plutôt que par le nombre de strokes. Cette étude fournit ainsi des données empiriques suggérant que l'unité de traitement des mouvements d'écriture était la lettre.

L'idée selon laquelle l'unité de traitement dans la production écrite est la lettre n'a pas fait l'unanimité pendant une certaine période. Quelques chercheurs pensaient que le stroke était l'unité de base des programmes moteurs. Dans l'expérience de Stelmach, Mullins et Teulings (1984), des adultes devaient reproduire, après un signal auditif, des figures qui augmentaient progressivement en nombre de segments (Figure 1.8). Ces figures étaient composées d'un à cinq segments (expérience 2) et d'une à trois guirlandes (expérience 3).

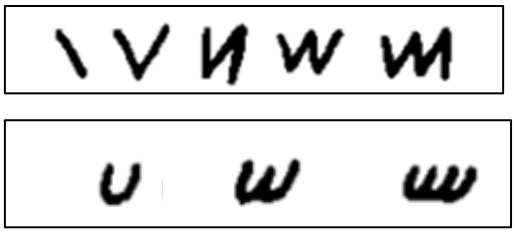

Figure 1.8. Stimuli utilisés dans l'étude de Stelmach et al. (1984). En haut : figures composées d'un à cinq segments, présentées individuellement dans l'expérience 2. En bas : figures composées d'une à trois guirlandes, présentées individuellement dans l'expérience 3.

Les résultats de l'expérience 2 ont montré une progression linéaire du temps de réaction avec l'augmentation du nombre de traits à produire. En revanche, dans l'expérience 3 aucune différence du temps de réaction n'a été constatée entre les productions. Sur la base de ses résultats, les auteurs ont suggéré que la taille de l'unité de programmation de l'écriture était plus petite qu'une lettre, supposant que cette unité était de l'ordre du stroke. Les résultats de l'étude 3 restent toutefois sujets à caution compte tenu qu'ils sont basés sur une absence de différences.

Des études postérieures ont mis cependant en évidence que le stroke en tant qu'unité de traitement était fortement influencé par la nature des tâches et des stimuli utilisés dans la manipulation expérimentale (Hulstijn & Van Galen, 1988 ; Portier, Van Galen, & Meulenbroek, 1990 ; Van der Plaats &Van Galen, 1991). Il est probable que les variations des mesures enregistrées soient dues à la complexité des lettres, à la connaissance des tracés à produire, à la vitesse du mouvement ou encore au contexte dans lequel est écrit la lettre. Actuellement, il est admis que l'unité de traitement du programme moteur pour l'écriture est la lettre (Zesiger, 1995). Chez l'enfant, elle serait de l'ordre du trait en début d'apprentissage et passerait progressivement à la lettre entière avec la pratique et le développement cognitif et neuro-musculaire (Lambert & Espéret, 2002 ; Zesiger, 1995). Nous reviendrons sur la notion de taille d'unité de traitement dans le contexte particulier de l'enfant en développement dans notre première étude. Dans les paragraphes suivants nous présentons des recherches qui ont permis d'approfondir nos connaissances en matière de contenu du programme moteur.

1.3.2 Les invariants spatio-temporels de l'écriture

La notion de programme moteur est essentielle pour la compréhension de la production écrite aussi parce qu'elle permet d'expliquer un certain nombre de régularités. En effet, pour tracer une lettre nous activons le programme moteur correspondant à l'allographe de la lettre stocké en mémoire et nous adaptons notre geste en fonction des contraintes spatio-temporelles

de la situation dans laquelle nous souhaitons réaliser son écriture. Viviani et Terzuolo (1980, 1983) ont par exemple mis en évidence que les caractéristiques spatiales globales de l'écriture étaient conservées quelles que soient la vitesse d'exécution et la taille de la production du geste. Ce phénomène est dû à l'activation préalable d'un programme moteur qui guide la production motrice indépendamment de la situation d'exécution. D'autres auteurs ont également observé une sorte « d'équivalence motrice » lors de la production de l'écriture (Berstein, 1967 ; Wright, 1990) indépendamment du membre utilisé pour la réaliser (main dominante ou non-dominante, bouche, pied ; Raibert, 1977) (Figure 1.9).

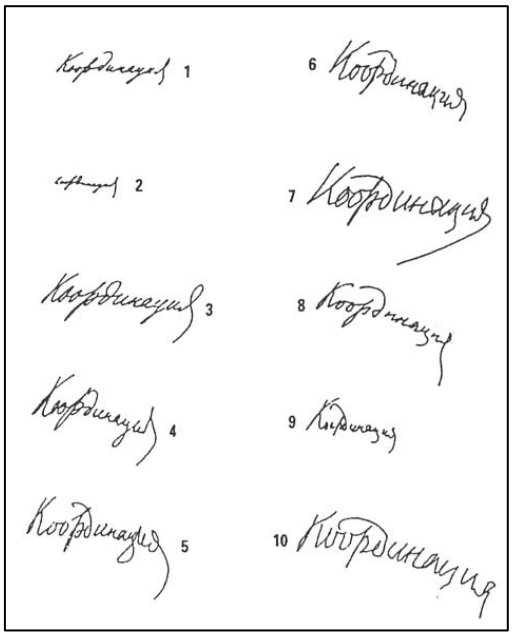

Figure 1.9. Mot « coordination » en russe écrit par Bernstein (1967) en tenant le stylo avec les doigts de la main droite (1 : taille normale ; 2 : petite taille), en bloquant les doigts (3), en attachant le stylo au-dessus du poignet (4), au coude (5), à l'épaule (6), au gros orteil du pied droit (7), en serrant le stylo entre les dents (8), en le tenant avec la main gauche (9), attaché au gros orteil du pied gauche (10).

Les relations entre les traits qui forment les lettres présentent souvent des régularités spatiales et temporelles qui ne sont pas altérées lorsque les membres et les contextes d'écriture changent. Elles sont connues sous les termes d'homothétie spatiale (Teulings & Schomaker, 1993) et d'homothétie temporelle (Viviani & Terzuolo, 1980, 1983), respectivement. La version temporelle de l'homothétie serait à un degré moindre d'invariance que la version spatiale (Teulings, Thomassen, & Van Galen, 1986). Ces homothéties gouvernent la tendance à l'isochronie présente dans l'écriture (Fitts, 1954 ; Viviani & Terzuolo, 1980, 1983). Écrire une lettre de taille plus grande que la normale ne fait pas varier sa durée par rapport à une lettre de taille plus petite. La vitesse s'ajuste à la longueur du tracé à effectuer. Ce principe

d'isochronie s'exprime par la variation conjointe entre la longueur du tracé et la vitesse, mais à condition que la taille de l'écriture reste relativement petite (Greer & Green, 1983 ; Thomassen & Teulings, 1985 ; Wing, 1980 ; Wright, 1990, 1993).

Une autre source d'invariance, que l'on connaît depuis Binet et Courtier (1893), fait référence au fait que la vitesse du mouvement varie en fonction du rayon de courbure de la trajectoire à tracer. Il s'agirait d'une relation très robuste que l'on peut observer dans la plupart des gestes d'écriture ou encore de dessin. Lacquaniti, Terzuolo et Viviani (1983) ont mesuré expérimentalement cette observation et ont modélisé mathématiquement les relations qui la régissent. Elle est connue sous le nom de la Loi de puissance 2/3. Il s'agit d'une règle qui met en relation la vitesse tangentielle et le rayon de la courbure du tracé. Cela en fait un invariant de la trajectoire incontournable et a conduit les auteurs à conclure que les programmes moteurs auraient intégré cet invariant pour maintenir l'isogonie (co-variation entre rayon de courbure et vitesse). Mais ce principe est à nuancer notamment pour l'écriture (Thomassen & Teulings, 1985). En effet, il semblerait que la loi de puissance 2/3 ne serait pas conservée lors de la production de traits de tailles différentes, ce qui est le cas dans l'écriture (Thomassen & Teulings, 1985 ; Teulings, Thomassen, & Van Galen, 1986). Chez l'enfant, dont l'écriture est très dysfluente en début d'apprentissage, l'isogonie ne serait réellement fonctionnelle qu'à partir de l'âge de 13 ans (Viviani & Schneider, 1991). Toutefois, la simple observation des mouvements d'écriture chez l'enfant permet de constater qu'ils ralentissent lors de la production de lettres composées de traits courbés. Ceci est un point très important pour ce travail, puisque nous allons étudier le développement des mouvements de rotation nécessaires au tracé des lettres présentant des traits courbés (e.g., lors de la production de la lettre *o*).

La Loi de puissance 2/3 modélise les relations entre vitesse et courbure du tracé alors qu'une autre régularité, connue comme la Loi de Fitts modélise le mouvement humain de pointage. Les mouvements de pointage dans l'écriture sont très fréquents : par exemple, pour produire la barre du *t* ou pour mettre les signes diacritiques. Dans cette thèse nous avons également abordé le développement des mouvements de pointage. Fitts (1954) a conçu une tâche de production motrice qui intégrait deux difficultés : l'éloignement de la cible à atteindre et sa taille. Des participants adultes devaient relier, plusieurs fois, leur point de départ et la cible le plus rapidement possible. Les résultats ont mis en évidence que le taux d'erreur à l'atteinte de la cible était d'autant plus important que la cible était éloignée et de petite taille. En d'autres termes, plus on va vite et loin pour atteindre une cible petite, plus on perd en précision. Toujours chez les adultes, Smits-Engelsman, van Galen et Duysens (2002) ont constaté, dans le cadre de

tâches impliquant la loi de Fitt, que les mouvements de pointage, constitués de répétitions successives d'un même pattern de gestes, ont des index de performance (ratio entre un index de difficulté et le temps de déplacement) deux fois supérieurs à ceux des mouvements de pointage discrets pour lesquels il y a un début et une fin discernable.

Dans le domaine de l'écriture, Smits-Engelsman, Sugden et Duysens (2006) se sont posé la question de savoir si, comme les adultes, les enfants présentaient un avantage dans l'exécution de tâches cycliques par rapport à l'exécution de tâches discrètes comme le pointage. Dans cette étude, les enfants de 6 à 10 ans ont tracé des droites entre deux cibles dont on faisait varier l'éloignement ainsi que leurs diamètres. Dans une condition que les auteurs ont appelée « discrète », les enfants devaient produire, 20 fois de suite, une droite entre deux cibles après un signal sonore. Dans la condition dite « cyclique », les enfants devaient tracer le plus précisément et le plus vite possible 20 aller-retours entre les cibles (Figure 1.10).

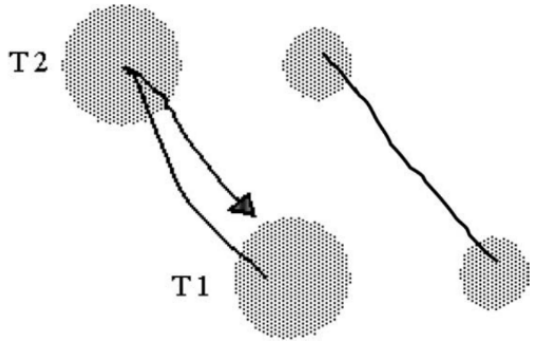

Figure 1.10. Deux agencements de deux cibles en gris, opposées en diagonale, avec une distance inter-cible de 2,5 cm et deux largeurs de cibles (0,88 et 0,44 cm), qui ont conduit respectivement à deux indices de difficulté de 2,51 et 3,51. Les participants devaient tracer des droites (comme le montre l'exemple de droite) entre les deux cibles. Dans la condition « tâche discrète », les enfants traçaient une droite, puis attendaient le signal sonore pour tracer la suivante en retour et ainsi de suite 20 fois. Dans la condition « tâche cyclique » les enfants traçaient des aller et retour entre les cibles sur un intervalle de 20s (comme le montre l'exemple de gauche). (Smits-Engelsman,et al., 2006).

Les résultats chez les enfants ont montré que les mouvements cycliques offraient un meilleur compromis vitesse/précision que les mouvements discrets. Les mouvements cycliques ont été tracés avec un indice de performance supérieur, plus rapidement et de façon plus balistique que les mouvements de pointage discrets. En conclusion, les auteurs ont indiqué que les enfants montraient, de façon similaire aux adultes, un avantage à tracer des mouvements cycliques par rapport aux mouvements discrets.

1.3.3 La grammaire de l'action

En général, les régularités décrites dans les paragraphes précédents ne sont pas enseignées de manière explicite lors de l'acquisition de l'écriture. Elles sont intégrées par l'enfant implicitement avec la pratique de l'écriture. D'autres régularités sont, en revanche, explicitées clairement et constituent l'initiation de l'enfant au geste du tracé de lettres. Plusieurs auteurs en font référence sous le terme « grammaire de l'action ». Ainsi, le programme moteur intégrerait ces règles qui définissent souvent l'ordre et la direction des mouvements du tracé.

Goodnow et Levine (1973) se sont intéressées aux règles qui régissaient les séquences de mouvements dans la production de patterns de formes rectilignes chez des enfants aux États Unis (Figure 1.11).

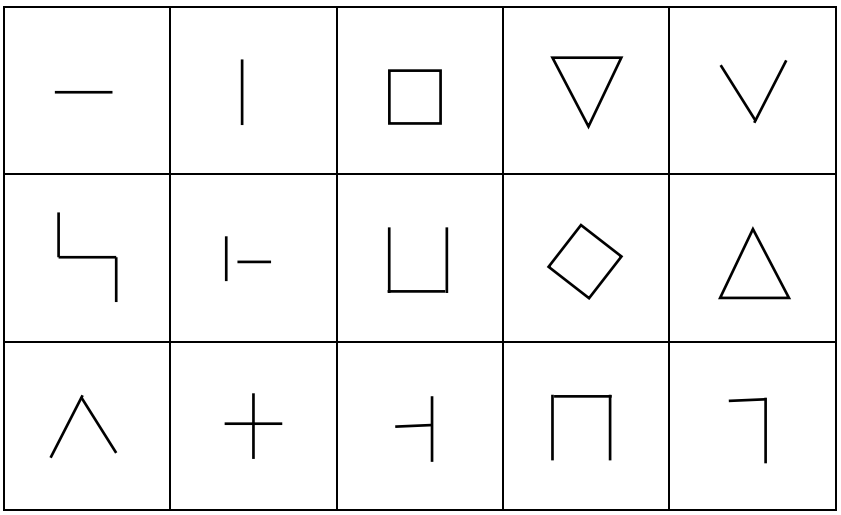

Figure 1.11. Les 15 figures à reproduire dans l'étude de Goodnow et Levine (1973).

Ces auteures ont décrit les stratégies préférentielles utilisées pour produire ces patterns, en relevant sept principes, qu'ils établirent comme des « règles » ayant un caractère général et prévalent. Les deux premiers principes concernaient la localisation du point de départ des tracés. De façon récurrente, les enfants avaient tendance à positionner la pointe de leur crayon sur un point, le plus en haut et le plus à gauche d'une feuille. Les deux principes suivants concernaient l'ordre dans lequel les enfants produisaient les premiers traits d'une figure. Le plus souvent, ils/elles commençaient par tracer la ligne droite et, quand il fallait dessiner des figures avec sommet, par l'oblique de gauche. Les trois derniers principes concernaient la progression générale. Les enfants progressaient de gauche à droite pour toutes les horizontales, de haut en bas pour toutes les verticales et enfin, le dernier principe indiquait une préférence à lever le moins de fois possible le crayon.

En 1976, Ninio et Lieblich ont investigué les stratégies mises en œuvre par des enfants de quatre ans dans la reproduction de dessins de figures composées de deux lignes, une verticale et une horizontale (lettre *T* orientée de différentes façons). Le choix des stratégies dépendait des préférences d'ordre développemental. D'une part, il est apparu qu'une progression linéaire de bas en haut avait été majoritairement choisie. D'autre part, les enfants les plus jeunes (4 ans,1 mois), ont eu tendance à élaborer la figure en trois traits. Ils/elles ont tracé la ligne verticale, puis ont accolé les deux traits de part et d'autre du point de jonction commun. Les enfants les plus âgés (4 ans, 8 mois) ont tracé la figure en deux traits, le deuxième trait ne commençant pas au point de jonction. Ces enfants ont ainsi sélectionné le point de départ du trait horizontal légèrement déporté par rapport au somment du segment le plus long afin qu'il passe par le point de jonction, comme le font les adultes.

Plus tard, Simner (1981) s'est penché sur la grammaire de l'action en se focalisant sur la production de l'écriture, chez des enfants de 5 à 8 ans. Les enfants ont eu à reproduire les 26 lettres en majuscule et en minuscule d'imprimerie ainsi que les chiffres de 1 à 9. L'analyse des productions a montré que les enfants étaient sensibles à la grammaire de l'action qui leur avait été enseignée à l'école, notamment en matière de point de départ et de règles de progression. Les enfants de 5 ans étaient le plus sensibles à ces deux règles, mais en grandissant, et sous l'influence d'une instruction formelle à l'école de l'écriture des lettres et des chiffres, certaines règles n'étaient plus respectées dans tous les cas. Les auteurs ont suggéré que les enfants avaient tendance à appréhender la forme en son entier puis, ils/elles traçaient le premier stroke en choisissant celui qui sera le moins couteux en termes d'effort, en dépit d'une règle de production explicite différente.

L'ordre de production de traits a été également étudié par Thomassen, Meulenbroek et Tibosch (1991), notamment dans la production de séquences de traits horizontaux et verticaux chez des adultes dans des figures géométriques. Ils ont décrit cinq règles suivies par 88% des participants : ne pas lever le stylo, partir de la gauche, soulever la pointe du stylo pour le repositionner sur le segment préalablement dessiné, commencer par les verticales et commencer par le haut. Ils ont souligné l'importance d'une hiérarchie de règles qui détermine l'utilisation prioritaire de certaines règles par rapport à d'autres. Vinter (1994) a testé la sensibilité de cette hiérarchie de règles graphiques chez des enfants de 4 à 9 ans et chez des adultes. Les participants devaient reproduire deux droites jointes, selon huit agencements différents (Figure 1.12).

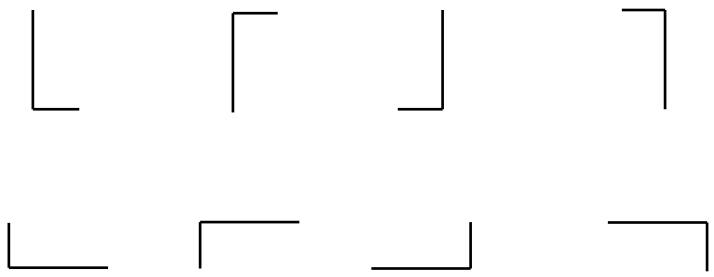

Figure 1.12. Items présentés selon huit agencements différents (Vinter, 1994).

Les résultats de cette étude ont permis de dégager deux conclusions. D'une part, l'utilisation d'une règle ou pas, est conditionnée par le pattern demandé. D'autre part, la hiérarchie des règles dépend de l'âge des enfants. Le mouvement dominant chez les enfants les plus âgés est de commencer par le haut. Il ne l'est pas chez les plus jeunes, ni chez les adultes.

Des règles de production écrite ont été également mises en évidence par Van Sommers (1984) dans le tracé de cercle. Il a constaté l'existence d'une relation entre le point de départ du tracé et le sens de rotation dans la production du cercle : le principe d'initialisation et de rotation du tracé circulaire (Start Rotation Principle, ou SRP). Au cours du développement, la règle du tracé des cercles va changer. Le point de départ du tracé en bas du cercle va migrer au profit d'un départ de tracé en haut du cercle. Ce changement va conduire à une inversion du sens de progression du tracé. En se plaçant dans un référentiel du type cadran horaire, si le début du tracé se situe au-dessus de l'axe reliant 11 heures à 5 heures alors, le mouvement circulaire généré sera de sens anti-horaire. Si le début du tracé se situe au-dessous de l'axe reliant 11 heures à 5 heures, alors le mouvement circulaire généré sera de sens horaire. Ce principe du SRP est suivi à 75% par les enfants de moins de 5 ans et à 100% par les enfants de 9 ans (Meulenbroek, Vinter, & Mounoud, 1993).

Quelle est la source de ces règles de production ? Selon Meulenbroek et al. (1993), le besoin de contrôle visuel sur le tracé à produire conduit tout naturellement les enfants à opter par un début de tracé et un sens de rotation anti-horaire. En effet, la rotation horaire gêne la vision du point final. Les enfants opteraient par un début de tracé en haut avec sens anti-horaire afin de permettre un feed-back efficace et confortable sur le tracé à produire. Les auteurs expliquent le choix de cette stratégie par le principe dit de « stabilité du point final ». On peut aussi interpréter ce type de comportement comme une transposition des règles d'écriture aux activités de dessin. En effet, dans le style d'écriture cursif enseigné dans les écoles françaises, les lettres à boucles montantes ainsi que les lettres rondes sont toutes exécutées dans le sens anti-horaire. Précédemment l'étude de Goodnow, Friedman, Bernbaum et Lehman (1973) avait

déjà mis en exergue que le changement de sens de rotation de cercle n'était visible que dans le contexte d'un apprentissage de l'alphabet latin. Ce n'est pas le cas chez les enfants qui apprennent à écrire en hébreu, c'est-à-dire de droite à gauche. Il semble toutefois que les règles de production écrite de lettres cursives aient été générées en fonction des capacités naturelles à produire des mouvements. Ainsi, le mouvement d'écriture s'inscrirait aisément dans le contexte des contraintes articulaires du mouvement humain (Dounskaia, Van Gemmert, & Stelmach, 2000). La grammaire de l'action spécifierait donc des préférences également présentes pour les tracés d'écriture.

CHAPITRE 2
Production de l'écriture et dynamique développementale

Le développement de certaines capacités, comme la locomotion ou encore la coordination oculo-manuelle, est inné et s'acquiert de manière implicite. L'écriture en revanche, est un apprentissage qui ne peut s'effectuer sans un contexte formel d'enseignement explicite. C'est un processus lent, long et laborieux. Il prend naissance dans des tâches de dessin et de graphisme, et il va, tout au long de la scolarité, acquérir ses lettres de noblesse. Cet apprentissage est, par ailleurs, intimement lié au développement moteur (Chartrel & Vinter, 2004). Nous passerons donc en revue les principaux aspects liés au contrôle moteur de l'écriture pour finir ce chapitre en présentant le développement de l'écriture dans un contexte de maturation motrice générale.

2.1 Le contrôle moteur dans la production de l'écriture

L'écriture fait l'objet d'une localisation cérébrale spécifique, située au niveau cortical dans le gyrus frontal supérieur gauche (Figure 2.2 ; pour une revue de questions voir Planton & Kandel, 2017). Roux et al. (2009) l'ont appelée la Graphemic Motor Frontal Area (GMFA) et elle est distincte de la région corticale responsable de la gestion de la motricité de la main. En effet, la stimulation électrique directe de cette zone altèrerait la production d'écriture tout en préservant les mouvements de la main. Par ailleurs, au travers d'une expérience en IRMf[7], ces mêmes auteurs ont pu mettre en évidence une activation de la GMFA dans l'hémisphère gauche, similaire chez les gauchers et les droitiers. Planton, Jucla, Roux et Démonet (2013) ont comparé 18 études sur la production écrite réalisées selon différents types de techniques d'imagerie fonctionnelle (voir aussi Purcell, Turkeltaub, Eden & Rapp, 2011). Elles révèlent l'implication de 12 aires corticales et sous-corticales dans les tâches d'écriture (Figure 2.1). D'un point de vue cortical, des études récentes en neuro-imagerie ont permis également de distinguer les aires dédiées au dessin de celles mobilisées pour l'écriture. Les tâches de dessin activeraient de façon bilatérale les hémisphères cérébraux, les tâches d'écriture activeraient plus spécifiquement la zone frontale localisée au niveau de la GMFA (Planton, Longcamp, Péran, Démonet, Jucla, 2017).

[7] Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle

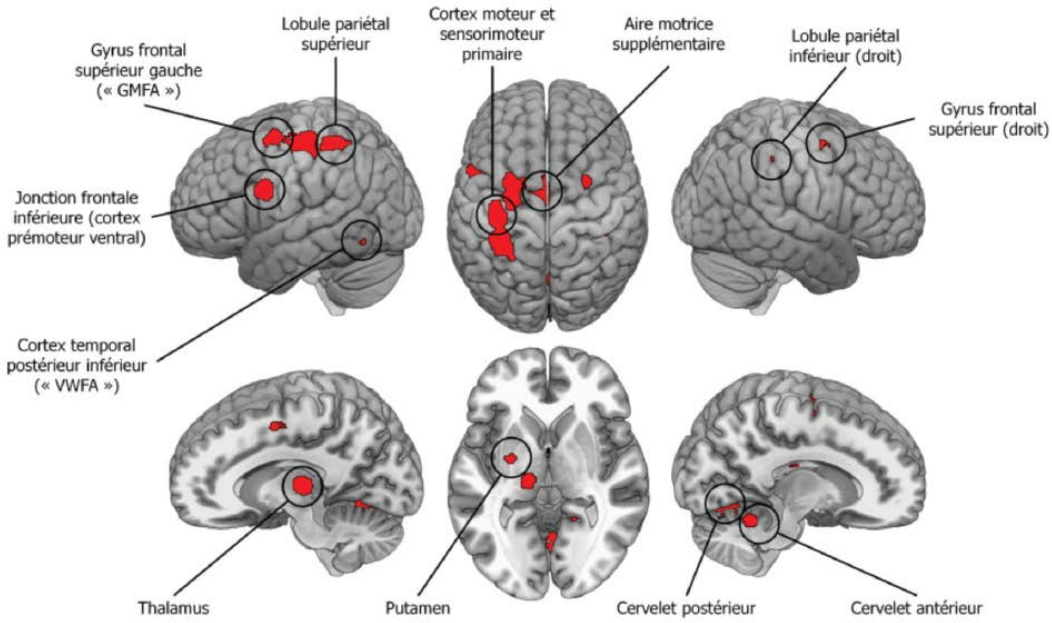

Figure 2.1. Réseau de l'écriture manuscrite identifiée par Planton et al. (2013). Tiré de Planton & Kandel (2017).

L'acte d'écriture est un acte moteur impliquant de nombreux segments corporels. Ainsi l'épaule, l'avant-bras, et le tronc participent en concert à cet acte de motricité fine (Lacquaniti, Ferrigno, Pedotti, Soechting, & Terzuolo, 1987 ; Schillings, Meulenbroek, & Thomassen, 1996 ; Van Emmerik & Newell 1989, 1990), le poignet, la main, les doigts sont responsables principalement de la trace sur le support (Teulings, Thomassen, & Maarse, 1989). Chaque articulation dispose d'un nombre défini de mouvements biomécaniques possibles. Le nombre de configurations qu'il est possible d'actionner grâce aux articulations (que ce soit les articulations des doigts, du poignet, du bras ou tout autre articulation du corps humain) définissent ce que l'on nomme le nombre de degrés de liberté. Bernstein (1967) a été un des précurseurs à l'étude de l'apprentissage moteur. Il proposa un schéma évolutif des différentes étapes d'un apprentissage moteur. Au début d'un apprentissage, l'ensemble des degrés de liberté est gelé et l'organisation articulaire fonctionne comme un bloc. Peu à peu, par l'entraînement, une exploration de ces degrés de liberté va permettre une meilleure coordination articulatoire. Enfin, l'individu expert ajustera la mobilisation économique des degrés de liberté afin de produire un geste efficace et optimal. Ainsi, les articulations entre les phalanges des doigts ne disposent que d'un seul degré de liberté (flexion/extension (F/E)). L'articulation du pouce en compte trois (F/E, abduction/adduction (Ab/Ad) et rotation (R) de la première phalange), celle du poignet deux (F/E, Ab/Ad), celle de l'épaule trois (F/E, Ab/Ad, R) et celle du coude deux (F/E, R) (voir quelques exemples en Figure 2.2).

Figure 2.2. Les différentes articulations de la main. D'après Chick (2015).

Van Emmerick et Newell (1989) ont répertorié 26 degrés de liberté disponibles pour le système effecteur de l'écriture et jusqu'à 43 muscles mobilisés par le bras. Mais, selon Teulings (1996) ce nombre peut être réduit à deux : un degré de liberté regroupant les mouvements de flexion-extension des articulations des doigts de la main, et un autre correspondant à la rotation de la main autour du poignet. Selon la direction du tracé effectué, la mobilisation des segments corporels impliqués va différer selon leurs caractéristiques biomécaniques. Ainsi, les doigts auront tendance à participer aux tracés nécessitant leurs flexions extensions simultanées et le poignet, aux rotations de la main. En d'autres termes, doigts et poignet se mobilisent dans la plupart des gestes d'écriture, l'avant-bras, le bras et l'épaule se mobilisent dans les gestes relatifs aux déplacements de l'outil scripteur sur la ligne d'écriture ou encore les retours à la ligne.

Comme dans toute activité motrice, c'est par l'apprentissage que la maîtrise du geste s'effectue. Petit à petit, l'individu va contrôler, libérer puis exploiter les degrés de liberté mobilisables afin d'atteindre un mode de fonctionnement automatique et moins coûteux (Bernstein, 1967 ; Vereijken & Bongaardt, 1998). Dans le cadre de l'écriture, les enfants auront tendance, dans un premier temps, à « geler » la totalité des degrés de liberté à disposition. Les doigts, la main, voire le bras, ne feront qu'un bloc et, peu à peu, avec l'entraînement, les articulations se délieront. Les scripteurs experts ne mobiliseront alors, que les articulations justes nécessaires.

La libération progressive des degrés de libertés des articulations semble suivre le développement céphalo-caudal et proximo-distal (Newell, Kugler, Van Emmerik, & McDonald, 1989). Ces composantes qui permettent la mise en mouvement du poignet et des doigts ont été étudiées au niveau de leur influence sur l'écriture (Burton, Pick, Holmes, & Teulings, 1990 ; Maarse & Thomassen, 1983 ; Pick & Teulings, 1983 ; Plamondon & Lamarche, 1986 ; Schomaker & Plamondon, 1990 ; Thomassen & Teulings, 1983 ; Thomassen, Meulenbroek, & Lelivelt, 1994). Selon Dounskaia et al. (2000), il semblerait que les

caractéristiques morpho-cinétiques des lettres soient ajustées aux composantes bio-mécaniques du complexe doigts/main/poignet afin que le geste d'écriture cursif soit le plus aisé possible. Selon la forme des lettres, les segments corporels mobilisés seront différenciés. La forme de chacune des lettres, quant à elle, est déterminée par une organisation spatiale normée, qui rend chacune d'elles unique. En effet, malgré la taille relativement petite de ce type de trace et la vitesse élevée de cet acte moteur, chaque lettre se différencie d'une autre (Van Emmerick et al., 1989). Chez les adultes en général, l'écriture cursive suit un rythme dont la fréquence s'étend de trois à six Hertz, ce qui correspond à six à douze changements d'orientation de tracé en une seconde (Rigal, Abi Nader, Bolduc & Chevalier, 2009).

Les mouvements d'écriture constituent à eux seuls une catégorie spécifique. Ils sont intégrés à une classe de mouvements séquentiels, à l'intermédiaire entre les mouvements discontinus et les mouvements continus (Schmidt, 1988). Teulings (1996) les compare à des traits de dactylographie exécutés en une succession d'actions discrètes ayant l'apparence d'un mouvement continu puisque exécuté à un taux proche de 10 strokes par seconde. Les mouvements d'écriture sont à la fois produits dans le plan bi-dimensionnel mais aussi dans un troisième axe, celui dans l'espace. Pour passer d'un mot à l'autre ou encore revenir à la ligne, la pointe du stylo doit s'élever. L'écriture en cursive est en effet ponctuée par des mouvements discrets, identifiables, définis par un début et une fin, parmi lesquels certains mouvements sont exécutés en l'air. Ainsi, les lettres cursives sont formées par des mouvements coordonnant des juxtapositions de courbes, boucles, traits, cercles, mais d'autres mouvements, comme ceux permettant de tracer les barres aux *t* ou encore de positionner les accentuations, viennent rompre la rythmique du mouvement d'écriture. Notons également que l'écriture en majuscule d'imprimerie met en jeu de manière plus fréquente ces mouvements discrets. Elle est constituée de segments de droite juxtaposés (i.e. *A*, *N*) et de quelques lettres avec courbes (i.e. *O*, *C*). Le tracé de lettres en majuscules d'imprimerie nécessite des mouvements de pointage intra-lettre (le *H* par exemple en implique deux : pour tracer la droite verticale de droite et pour tracer la barre horizontale), des mouvements de rotation sans aucun lever de stylo (comme pour le *O*) et des mouvements sans lever de stylo, ni rotation (comme le *V* par exemple).

2.2 Mouvements de pointage et de rotation

Les mouvements de pointage de l'écriture –i.e., le lever de la pointe du stylo pour la replacer dans une position non contiguë– peuvent être considérés comme des mouvements d'atteinte d'une cible. Woodworth (1899) distinguait déjà deux phases dans la réalisation d'un

mouvement d'atteinte : une première phase rapide, dite de transport, viserait à amener la main à proximité de la cible ; puis une deuxième phase, dite d'approche, consisterait à ajuster la main pour atteindre la cible avec précision. Cette approche est également décrite dans l'étude de Desmurget et Grafton (2000) qui mettent en avant le fait que les différentes informations sensori-motrices permettent une estimation de la position de la main en cours de déplacement, afin d'élaborer une adaptation du mouvement préalablement initié, vers la position finale de la cible. Des études, comme celles de Sarlegna et al. (2004), et Saunders et Knill (2005), ont montré que l'ajustement de la trajectoire de mouvement rapide comme ceux de pointage était possible grâce à la transmission des informations visuelles de la main. Or, il est important de signaler que pour tracer par exemple un point sur le *i*, la cible n'est pas concrètement matérialisée et donc pas visible. Il faut que l'on « imagine » la localisation du point bien au-dessus du *i* pour pouvoir le tracer correctement et donc exercer une coordination entre le regard et la main (Figure 2.3).

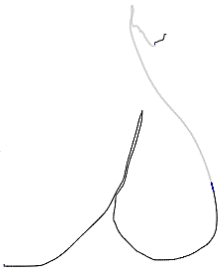

Figure 2.3. Exemple de la lettre *i*, tracée par un enfant de 6 ans. En noir le tracé sur la feuille, en grisé le mouvement en l'air.

Dans une étude relative au rôle du contrôle de la vision dans des tâches d'écriture, Smyth et al. (1987) ont demandé à des adultes d'écrire des phrases en cursive dans différentes conditions de vision de la main (avec ou sans) et de tâches de perturbation (répétition d'une syllabe ou comptage). Les mesures de l'orientation sur la page et du nombre et type d'erreurs sur la production des lettres ont été analysées. En ce qui concerne les lettres composées de mouvements de pointage, l'absence de vision a contribué à augmenter les erreurs. Les barres aux *t* étaient soit omises, soit placées sans contact avec la canne verticale du *t*. Il en est de même avec le point du *i* qui était plus souvent omis. Les auteurs ont conclu que l'absence de vision impactait non seulement, l'arrangement spatial sur la ligne, mais aussi l'imposition des points sur le *i* et des barres aux *t*. La tâche secondaire a surtout perturbé la correction des erreurs.

Un autre type de mouvement est également récurent dans la production de l'écriture : le mouvement de rotation. Les mouvements de rotation sont essentiels dans des tâches d'écriture car ils permettent la réalisation de trait courbés (Exner, 1989). Ainsi, des lettres cursives comme des *l*, des *a*, des *n* et des lettres comme des *Q*, *O*, *U* en majuscules sont des lettres impliquant des mouvements de rotation. S'ils sont, certes, différents des mouvements manipulatoires d'objets, ils restent intimement liés aux capacités manipulatoires fines (Feder & Majnemer, 2007). Ces mouvements de rotation sont définis lors des tâches de manipulation avec la main, selon deux types : la rotation simple produite quand le pouce est en opposition aux autres doigts et agissent pour faire pivoter un objet de moins de 180°, et la rotation complexe permettant la rotation à plus de 180° par un mouvement actif du pouce et une différenciation entre les autres doigts (Exner, 1995 ; Visser, Nel, de Vries, Klopper, Olën & van Coller, 2014).

Bien que les enfants puissent avoir l'occasion de relever la pointe du crayon vers le haut pour la redescendre vers le bas pour écrire (notamment dans les mouvements de pointage), les observations cliniques de Cornhill et Case-Smith (1996) indiquent que la rotation simple est la plus utilisée dans le cadre de l'écriture. La manipulation du stylo doit permettre, toutefois, des tracés de 180° et la différentiation des doigts fournit l'agilité nécessaire pour le faire. Selon le sens dans lequel elles sont produites, les mouvements de rotation sont de sens horaire ou de sens anti-horaire. Van Sommers (1984) avait constaté que si le point de départ du tracé d'un cercle migrait de bas en son sommet, alors le sens de rotation se trouvait inversé (voir section 1.3.3). D'un sens horaire si le point de départ est en bas, il passe en sens anti-horaire si le point de départ est en haut. En 1993, Meulenbroek et al. ont voulu étudier les règles de production qui gouvernent le tracé de cercles. Les enfants devaient reproduire des cercles de différents diamètres, soit en série, soit de façon aléatoire (Figure 2.4).

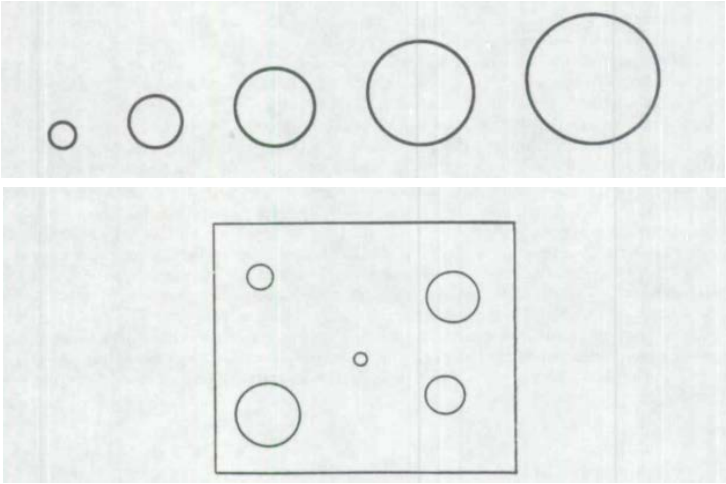

Figure 2.4. Modèle de tâche en série (en haut) et de tâche en aléatoire (en bas) (Meulenbroek et al., 1993).

Les auteurs ont observé que le principe liant le début de tracé et le sens de rotation, était présent chez les jeunes enfants et devenait prégnant avec l'âge. Ce principe a été testé aussi, et constaté présent, chez des enfants présentant un retard mental, même si quelques décalages dans le temps ont pu être mesurés (Detable & Vinter, 2003).

Les mouvements de pointage et de rotation semblent poser des difficultés importantes aux enfants lors de l'apprentissage de l'écriture. Pour cette raison, nous avons porté une attention particulière à ces types de mouvements dans notre troisième étude (Chapitre 7). La compréhension des processus qui permettent l'automatisation de l'écriture en général, et des gestes de pointage et de rotation, ne peut se faire que dans une perspective de maturation générale de l'enfant. Il s'agit de tenir compte du développement des fonctions cognitives mais aussi d'observer l'évolution des capacités neuro-musculaires de l'enfant. La motricité globale qui permet, entre autres, la tenue d'une posture corporelle adéquate à l'activité d'écriture, nécessite la coordination de grands muscles, alors que la motricité fine impliquée dans le contrôle des doigts lorsque l'enfant trace les lettres avec un instrument scripteur, mobilise plutôt des muscles de taille plus réduite tels que ceux de la main ou des doigts.

2.3 Développement moteur

Le développement moteur est en interaction continue avec le développement sensoriel, émotionnel, cognitif, et social. Le nourrisson va peu à peu contrôler les muscles de son corps, exécuter des mouvements volontaires et les réflexes archaïques vont disparaître conjointement au développement du système nerveux central. Il s'agit de ce qu'on nomme la Loi de différentiation. Cette loi fait état du principe selon lequel l'évolution est progressive du plus

simple au plus compliqué. Thelen, Fisher, et Rideley Johson (1984) énoncent que les réflexes de marche ne disparaissent pas totalement, ils sont encore présents quand l'enfant est sur le dos ou encore dans l'eau. Selon ces auteurs, le développement moteur est sous dépendance de la maturation cérébrale mais aussi de l'impact de l'environnement. L'influence de l'environnement et la motivation de l'enfant à atteindre une cible, induiraient le développement d'habiletés variables. Signalons également que les progrès ne sont pas tous continus. La maturation est faite de progressions rapides, mais aussi d'arrêts, voire de régressions, mais tend toujours vers le perfectionnement. Le passage par les différentes étapes du développement peut aussi varier d'un enfant à l'autre (Rigal, 2003). C'est la Loi de variabilité.

La maturation du système cérébral est assurée par la myélinisation des axones ainsi que par la synapto-génèse (i.e., le développement des connections entre les neurones), tous deux responsables de l'évolution du contrôle moteur. La myélinisation est progressive temporellement mais aussi spatialement (Conel 1939, 1947 ; Rabinowicz, 1980). En effet, la myélinisation des régions corticales contrôlant les membres supérieurs et de la tête précède celle des régions impliquées dans le contrôle des membres inférieurs, de même que la myélinisation des régions proximales (proches de la moelle épinière) précède celle des régions distales (les plus éloignées de la moelle épinière). Le développement moteur subirait la double influence du développement céphalo-caudal (du cerveau aux membres inférieurs) et proximo-distal (Coghill, 1929) (Figure 2.5). Ce principe est appelé la Loi de succession. Les développements céphalo-caudal et proximo-distal permettent la coordination visuo-manuelle lors des mouvements de préhension d'objets et une manipulation de plus en plus précise. L'enfant commencera à réaliser des activités impliquant une motricité de plus en plus fine comme attacher un bouton, faire ses lacets, dévisser un bouchon, mais aussi saisir un crayon et apprendre à le manipuler dans l'espace.

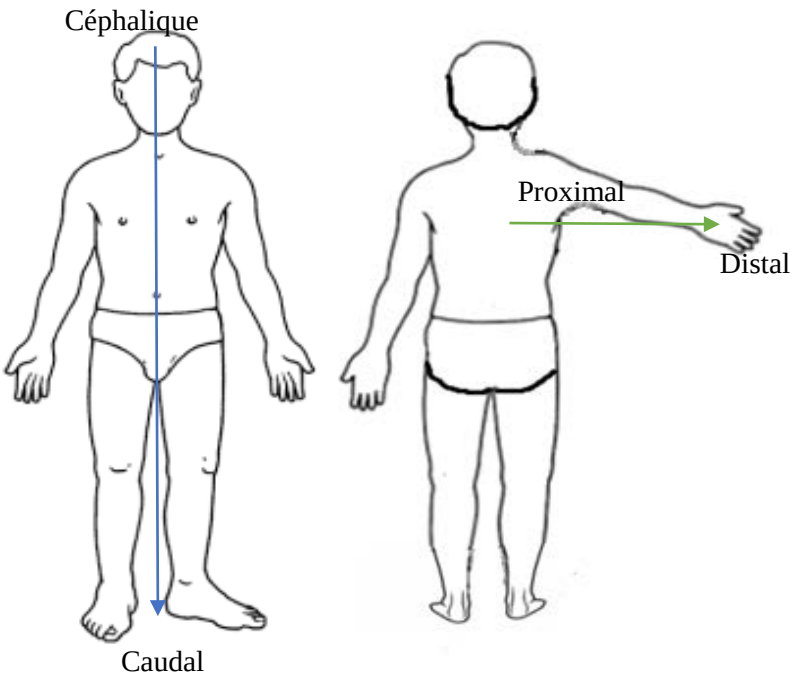

Figure 2.5. Schéma de représentation du développement céphalo-caudal (à gauche) et proximo-distal (à droite).

Le développement des fonctions motrices s'étend au-delà de l'adolescence (Miller et al., 2012). Sous les contraintes de ces lois de l'évolution motrice et des processus visuels et proprioceptifs, on pourra observer une progression du développement moteur de l'enfant qui peu à peu établira une coordination motrice afin de produire un mouvement adapté (Rivière, 2004). L'activité motrice sera alors stabilisatrice, locomotrice ou encore manipulatoire (Rigal, 2003). On peut nommer se tenir en équilibre, se lever, s'assoir, se plier comme conduites posturales stabilisatrices ; ramper, marcher, courir comme permettant la locomotion ; et manipuler, attraper, saisir, comme activités manipulatoires. L'activité manipulatoire, principalement dédiée à la main et aux doigts, est souvent intégrée dans ce que l'on nomme la motricité fine.

Le développement moteur est donc un processus qui découle de transformations motrices quantitatives et qualitatives. Chez l'enfant, le développement de la motricité globale lui permet une mobilisation coordonnée des grands muscles lui assurant l'équilibre et la mobilité. Les actions de ramper, sauter, marcher, courir lui sont alors possibles grâce au redressement du buste et à la libération des appuis des membres supérieurs. Le développement moteur, et notamment celui de la posture, est marqué par des différences inter-individuelles et par des discontinuités ; il est loin d'être linéaire et monotone (Hadders-Algra, Brogen, & Forssberg, 1997 ; Van der Fits, Otten, Klip, Van Eykern, & Hadders-Algra, 1999). C'est dans une perspective de développement de la motricité globale que s'intègre l'évolution de la

motricité fine impliquée dans la production écrite. La coordination main-œil se renforce au profit de l'exploitation des possibilités de saisie, de manipulation et d'utilisation d'objets. La manipulation d'un crayon ou d'un stylo, dans une dynamique d'écriture, est un comportement moteur spécifique à la motricité fine. L'enfant explore et développe sa motricité fine et acquiert progressivement la dextérité nécessaire à l'écriture des lettres.

2.3.1 Développement moteur et tenue de l'outil scripteur

Avec la maturation neuro-musculaire, les enfants vont peu à peu dissocier les segments des membres supérieurs, leur facilitant, alors, une utilisation plus fluide de l'épaule (vers un an), du bras et de l'avant-bras (vers deux ans et demi) puis de la main et enfin des doigts. Cette évolution au niveau physique conduira à la mise en place d'habilités qui gagneront progressivement en dextérité. Ainsi, vers l'âge de 6 mois, le nourrisson ne peut faire que des préhensions globales. Entre 8 et 10 mois, l'index se délie. Vers 9 mois, la prise entre l'index et la base du pouce (la pince inférieure) devient possible. Vers 1 an, l'enfant utilise la pince supérieure (entre la partie distale du pouce et l'index), ce qui rend la prise plus fine. Vers 18 mois, il/elle peut manger seul en utilisant une cuillère. Vers deux ans, il/elle commence à tenir des crayons et à exécuter des traits (Ferland, 2005). Avec la pratique d'activités graphiques et le développement neuro-musculaire, l'enfant maîtrisera de plus en plus la préhension de l'outil scripteur. Certains auteurs situent la maturation suffisante pour entrer dans l'apprentissage formel de l'écriture, aux alentours de 6 ans (Auzias & Ajuriaguerra, 1986).

Rosenbloom et Horton (1971) ont étudié le développement de la tenue de l'outil scripteur vers la prise dynamique tripode (Wynn-Parry, 1966) chez des enfants de 1 an et demi à 7 ans. Il s'agit d'une posture des doigts dans laquelle le crayon repose sur l'extrémité distale du majeur tout en étant contrôlé par la pulpe du pouce et de l'index (Figure 2.6). Ces chercheurs caractérisent trois étapes développementales : la préhension palmaire où la main s'enroule autour de l'objet, la prise tripode statique dans laquelle seule la tenue est acquise mais pas les mouvements associés aux doigts et enfin la prise tripode dynamique dans laquelle les doigts fonctionnent de façon coordonnée.

Figure 2.6. Prise tripode.

Schneck et Handerson (1990) ont mesuré, chez des enfants de 3 à 7 ans, le pourcentage d'utilisation mature de la position dynamique tripode (voir Figure 2.7). Ils concluent que 48% des enfants les plus jeunes utilisent une préhension dynamique tripode alors que c'est le cas pour 90% des plus âgés. Par ailleurs, ils considèrent également la préhension tripode latérale comme mature –i.e., crayon positionné contre le côté radial du majeur avec la pulpe de l'index sur le dessus du crayon, la pulpe du pouce sur le côté de l'index, les quatrième et cinquième doigts fléchis– au même titre que la préhension dynamique tripode. Ces auteurs suggèrent que le choix de la prise serait à comprendre en termes de force et de précision. La prise palmaire permet un maintien optimum de l'objet alors que la prise digitale permet une manipulation plus précise (Elliott & Connolly, 1984). La prise tripode dynamique continue à évoluer avec l'âge. C'est ce que Ziviani (1983) a mis en lumière avec son étude sur des enfants de 7 à 14 ans par l'analyse des photographies des différentes préhensions du crayon. Il conclut que seules deux postures ne changent pas avec l'âge : l'opposition de la pulpe du pouce à celles des autres doigts ainsi que le nombre de doigts en contact avec le crayon. Il note cependant que pour les enfants de moins de 10 et ans demi, la phalange distale de l'index opère une flexion de plus de 90°, alors que pour les enfants au-delà de cet âge, la flexion est de moins de 90°.

La tenue correcte du crayon ou du stylo constitue une préoccupation quotidienne dans le cadre scolaire. Il est, de manière traditionnelle, suggéré que la prise tripode offrirait une meilleure coordination des articulations des phalanges (Benbow, Hanft, & Marsh, 1992) et réduirait la fatigue musculaire (Tseng & Cermak, 1993). Schwellnus et al. (2012) ont mesuré la lisibilité de l'écriture et l'effort perçu en fonction des différentes prises de stylo chez des enfants de 9-10 ans, avant et après dix minutes d'une tâche de copie. Il semblerait que la prise dynamique quadripode, prise identique à la prise dynamique tripode avec l'ajout de l'annulaire sur le corps du stylo, et la prise latérale quadripode, identique à la prise latérale tripode (ajout de l'annulaire sur le corps du stylo) identifiée par Dennis et Swinth (2001), n'affectent pas la qualité de l'écriture et n'influence pas significativement l'effort perçu. Il apparait donc que les

prises dynamiques tripode et quadripode et les prises latérales tripode et quadripode s'ajoutent aux postures matures identifiées par Tseng (1998) pour lesquelles aucune différence n'a été révélée quant à la fréquence de production et la lisibilité (Koziatek & Powell, 2003 ; Sassoon, Nimmo-Smith, & Wing, 1986 ; Ziviani & Elkins, 1986).

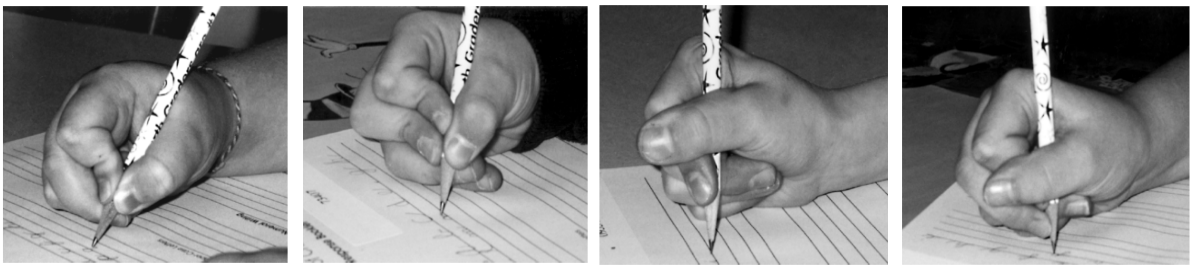

Figure 2.7. De gauche à droite : Prise dynamique tripode, prise dynamique quadripode, prise latérale tripode (Tseng, 1998) et prise latérale quadripode (Dennis & Swinth, 2001).

Dans le cadre de toutes les prises matures, la pointe du crayon n'est jamais obstruée par le positionnement d'un doigt, permettant alors une visibilité totale du tracé et de la feuille. Cette localisation spatiale de la main sur la feuille, et des doigts, autour de l'outil scripteur, participe alors au contrôle du mouvement. Il est donc crucial que le système visuel soit mature et efficace.

2.3.2 Le développement sensori-moteur

Dans la production de l'écriture, la vision guide la localisation de la main, le positionnement des doigts sur le crayon et la trace écrite sur la feuille. Elle permet, entre autres, l'agencement des lettres les unes par rapport aux autres et les mots sur la ligne. Ce sont les expériences visuelles qui permettront au futur enfant d'établir les connexions neuronales nécessaires pour que les processus visuels soient opérationnels et contribuent au bon déroulement du mouvement d'écriture (Bullinger, 2004 ; Graven, 2004 ; Hubel, 1994).

La vision est en interaction avec la motricité globale de l'enfant. En effet, elle participe à l'initiation du mouvement tout en maintenant l'équilibre postural et influence les capacités oculo-motrices (Bullinger, 2004). Ainsi les capacités de fixation, de poursuite oculaire, de discrimination spatiale, par exemple, interagissent et s'élaborent en harmonie avec le développement moteur général de l'enfant (Niessen, 2000). La liaison visuo-manuelle permet au bébé de suivre sa main du regard afin d'assurer le pointage d'un objet. Par ces gestes de pointage, l'enfant va construire son langage (Bates, Benigni, Brethertom, Camaiomi & Volterra, 1979 ; Cabrejo Parra, 1992). Au-delà des fonctions déictiques du pointage, il est

nécessaire pour l'enfant de cibler au plus juste l'objet pour le distinguer de son environnement (Bruner, 1983) et pour se faire comprendre. Les mouvements de l'œil, comme ceux de la main, sont alors conjointement programmés en fonction des données spatio-temporelles de la cible afin d'assurer une cohérence du geste moteur à exécuter (praxies visuo-spatiales). Une bonne intégration visuo-motrice, combinant perception visuelle (pour l'identification de la lettre à copier et son orientation) et contrôle visuel (pour permettre l'écriture entre les lignes), est corrélée à la qualité de l'écriture dans de nombreuses études (Cornhill et al., 1996 ; Karlsdottir & Stefansonn, 2002 ; Weil, Cunningham, & Amundson 1994).

Processus visuels et moteurs sont donc intimement liées et en interdépendance dans des nombreuses activités et la production de l'écriture n'y échappe pas (Bergson, 1939 ; Husserl, 1907). L'enfant va alors, petit à petit, analyser son action, son résultat, et appliquer de nouvelles stratégies plus efficaces (Rigal, 1996). Ce sont toutes les données sensorielles plurimodales qui vont donner corps à une représentation sensori-motrice spécifique. Longcamp, Anton, Roth et Velay (2003) ont réalisé une étude en IRMf, dans laquelle ils ont observé que la simple présentation visuelle d'une lettre activait les zones du cortex pré-moteur qui étaient actives lors de la production de ces mêmes lettres. Ces zones n'étaient par ailleurs pas activées lors de la présentation de pseudo-lettres, ce qui suggère l'existence de représentations sensori-motrices spécifiques à la production de lettres mémorisées auparavant lors de l'apprentissage scolaire. Une autre étude menée chez l'enfant a permis de confirmer l'interaction entre perception et motricité lors de la reconnaissance des lettres. Longcamp, Zerbato-Poudou et Velay (2005) ont fait apprendre 12 lettres en majuscule d'imprimerie à des enfants de maternelle (de 3 ans et 5 ans) soit par un apprentissage en écriture manuscrite, soit en écriture tapuscrite sur clavier. Les résultats indiquent que l'apprentissage des lettres via l'écriture manuscrite participait à une meilleure reconnaissance des lettres et plus particulièrement dans la discrimination de leur orientation.

Il apparait donc que les représentations sensori-motrices des lettres soient le résultat de conjonctions d'entrées pluri-modales. Une des entrées, explicitement abordée à l'école est celle de la mise en place des activités graphiques. L'objectif sous tendu par la pratique quotidienne du graphisme est d'amener les enfants à acquérir les mouvements de base qui leur seront nécessaires lors de l'apprentissage de l'écriture cursive.

2.4 Du graphisme à l'écriture

Les premiers actes graphiques sont les activités de dessin qui ne font pas l'objet d'apprentissage particulier dans la scolarité primaire. Ils sont à différencier des activités de graphisme, pour lesquelles l'enseignant va conduire l'enfant à exploiter au mieux ses capacités de motricité fine afin de construire le répertoire de signes graphiques de base, nécessaire à l'écriture. Les enfants vont peu à peu s'entraîner à tracer des cercles, des traits verticaux, horizontaux ou obliques, des coupes, des boucles, des ponts et toutes sortes de lignes, de formes et de motifs (Figure 2.8).

Figure 2.8. Exemples de production d'enfants de différents graphismes abordés au cours de l'école maternelle. En haut, de gauche à droite : pointage au doigt, lignes verticales, lignes horizontales et vagues (enfant de 3 ans). En bas, de gauche à droite : quadrillage, coupes (enfant de 4 ans), boucles, vagues, zig-zag, cercles et ponts (enfant de 5 ans).

Liliane Lurçat (1983) soulignait que dans l'activité de graphisme, on observe trois niveaux distincts. Un niveau moteur, un niveau perceptif et un niveau représentationnel. Le niveau moteur se caractérise par la production d'un tracé souvent continu, non contrôlé. Le niveau perceptif se caractérise par un contrôle accru de la trace grâce au contrôle visuel. C'est quand la trace devient un but en soi que le niveau représentationnel est le plus abouti. La trace laissée est alors interprétée comme un signe, une « schématisation des objets » (Lurçat, 1983, p. 11). Ces trois niveaux de l'activité graphique sont à mettre en relation avec trois « stades » de développement de l'acte graphique : le stade 1 rend compte du passage du gribouillage à la naissance des premières formes ; le stade 2, l'enfant prend conscience de la forme tracée et le stade 3 correspond à la maîtrise du tracé. À chaque stade du développement correspond un niveau moteur, un niveau perceptif et un niveau représentationnel, le tout étant dépendant des

développements céphalo-caudal et proximo-distal et de leurs interactions. L'association d'un ou plusieurs signes graphiques est un préalable au tracé de l'écriture majuscule ou cursive.

En ce qui concerne le développement de l'écriture, Ajuriaguerra et al. (1964) ont mis en évidence plusieurs étapes progressives. La première phase (entre 6 et 7 ans) dite « pré-calligraphique » est celle durant laquelle les enfants éprouvent des difficultés à maîtriser les courbes, les lignes droites sont encore fluctuantes et l'écriture des lettres reste imprécise. Cette phase s'accompagne néanmoins d'une augmentation de la fluidité du tracé. À cette première phase, succède la phase de « calligraphie infantile » (8 à 10 ans). L'enfant acquiert de l'aisance, son tracé est fluide et les lettres produites sont en conformité avec le modèle. Puis la phase « post-calligraphique » (à partir de 10 ans) marque une autre étape dans le développement de l'écriture car l'enfant tend à augmenter sa vitesse au détriment de la norme calligraphique. Le tracé est rapide, la forme et la taille des lettres sont modifiées pour rendre la production plus économique, le tracé des traits de connections sont plus librement exécutés. Les enfants les plus âgés ont tendance, par exemple, à enchaîner l'exécution de la lettre suivante à partir de la barre transversale de le lettre *t* en cursive. Ils/elles évitent ainsi de revenir à la fin du trait vertical du *t* pour se connecter à la lettre suivante. Sassoon, Nimmo-Smith et Wing (1989) ont demandé à plusieurs centaines d'enfants anglais de 7 à 16 ans d'écrire des phrases de huit mots (ou de 10 selon l'âge) dans lesquelles le mot *the* apparaissait, à vitesse normale et à vitesse rapide. L'analyse concernait la combinaison *th*. Le résultat de leurs observations a indiqué que les enfants de 7 ans ne liaient pas le *t* au *h*. En revanche, à 15 ans, 59% des enfants liaient le *t* au *h* et 62% d'entre eux, le faisaient à partir de la barre du *t*. Cette étude a mis en évidence une propension à enchaîner la barre du *t* à la lettre suivante avec l'expertise de l'écriture.

CHAPITRE 3

L'automatisation

L'automatisation de l'écriture est fortement associée au développement des programmes moteurs. Un mouvement est automatique quand sa représentation sous forme de programme moteur est stable, sa récupération en mémoire ne requiert que peu d'attention et qu'il est exécuté rapidement et avec précision. Le développement de cette représentation est le fruit d'une intervention de différents modes de contrôle du mouvement. Grâce à la pratique et aux retours d'informations tactilo-kinesthésiques et visuels, le geste va peu à peu être représenté dans sa version la plus performante, stocké dans la mémoire à long terme et récupéré lors de la production du mouvement.

3.1 Les stratégies de contrôle

Les composantes spatiales relatives à la localisation de la trace écrite sont nommées « topo-cinétiques ». Elles se manifestent dans l'écriture par l'agencement du texte sur la feuille, des mots sur la ligne, par l'espacement relatif entre les mots et par tous les signes diacritiques des lettres, comme l'accentuation ou encore les barres aux *t*. Les composantes spatiales relatives à la forme d'une lettre sont appelées composantes « morpho-cinétiques » (Paillard, 1990). Elles se caractérisent par la forme des lettres, l'ordre des séquences de traits à produire dans un espace bidimensionnel. Pour que ces deux types de composantes puissent être réalisés correctement, il est nécessaire d'exercer un contrôle très fin du mouvement de production de la trace. On considère que chez les scripteurs experts, le mouvement d'écriture serait dépendant de deux modes de contrôle. Le premier mode de contrôle dit « pro-actif » ou en « boucle ouverte » est à mettre en lien avec le programme moteur (Schmidt & Lee, 2005 ; Van Galen, Teulings & Sanders, 1994). Ce programme est une représentation de la forme de la lettre (ou plutôt son allographe), l'ordre et la direction des strokes la constituant. L'activation de cette représentation s'effectuerait avant sa réalisation effective. Le deuxième mode de contrôle, dit « rétro-actif » ou en « boucle fermée », dépend des retours sensoriels et informe sur les données « topo-cinétiques ». Il s'agit d'établir une comparaison entre le mouvement produit (la sortie) et le mouvement programmé (l'entrée) afin d'obtenir une optimisation du rapport entre les deux. Le but de ce mode de contrôle étant d'arriver à une stabilisation du système.

L'automatisation des gestes d'écriture requiert le passage progressif d'une stratégie de contrôle pro-actif à dominance balistique (5-6 ans) vers une stratégie de contrôle essentiellement basée sur la rétroaction (7-8 ans), puis à celle associant pro-action et rétro-action (9-10 ans) (Meulenbroeck & Van Galen, 1986, 1988 ; Zesiger, 1995). Afin de rendre compte de l'évolution vers un geste automatisé, différents indices peuvent être utilisés.

3.2 Les indicateurs de l'automatisation

Pour rendre compte du niveau d'automatisation d'une activité motrice fine quelle qu'elle soit, plusieurs indicateurs sont utilisés ; ils varient selon l'approche. Le degré d'automatisation de la production de l'écriture peut être mesuré à travers le comptage du nombre de lettres écrites en une minute dans des tâches de copie d'alphabet ou encore par le nombre de mots écrits par minute (Olive, Favart, Beauvais & Beauvais, 2009). On parle alors de « fréquence d'inscription ». Le calcul de la fréquence d'inscription est également utilisé dans les échelles d'évaluation de l'écriture comme par exemple l'échelle BHK (Hamstra-Bletz, De Bie, & den Brinker, 1987). En copie de texte, la fréquence d'inscription passe d'une moyenne de 10 lettres par minute chez des enfants de 6 ans (Charles et al., 2003) à une moyenne de 123 lettres par minute chez des jeunes adultes (O'Mahony, Dempsey & Killeen, 2008). A ce type de mesures quantitatives le BHK associe également des mesures qualitatives regroupant plusieurs critères comme la production de lettres ambiguës ou encore la stabilité des mots, qui « correspond à la capacité à maintenir constante la production d'écriture indépendamment de la charge cognitive liée à l'orthographe ou la grammaire » (Soppelsa & Albaret, 2014, p. 4). Chez les adolescents, qui ont une fréquence d'inscription constante et une dysfluence réduite, il semble que la stabilité soit un bon indicateur du niveau d'automatisation (Albaret, Soppelsa, Danna, & Kaiser, 2013).

D'un point de vue quantitatif, de nombreuses études ont porté sur l'analyse des mesures cinématiques comme les profils de vitesse d'écriture, les accélérations, le nombre de mouvements en l'air, les pauses, ou encore la longueur de la trace (Meulenbroek & Van Galen, 1988 ; Mojet, 1991 ; Rosenblum, 2003 ; Zesiger, Mounoud, & Hauert, 1993). Ainsi, Mai et Marquardt (1994) de même que Tucha, Tucha, et Lange (2008) indiquent que les profils de vitesse possèdent des caractéristiques qui permettent de rendre compte du degré d'automaticité de l'écriture. Ces auteurs stipulent que le nombre de changements de vitesse, pendant la durée du tracé, est un indicateur du niveau de fluidité du tracé, et, par là même du niveau d'automaticité. Chez un scripteur expert, on observe une seule accélération et une seule décélération par stroke, il n'y a alors qu'une seule inversion de vitesse par stroke et les

mouvements d'écriture sont considérés comme étant automatisés. Un stroke présentant un profil de vitesse avec de nombreuses inversions de vitesse indique un faible degré d'automatisation. L'écriture est alors très dysfluente. La figure 3.1 illustre, à gauche, le profil de vitesse d'une production de deux *l* en cursive d'un adulte. Chez l'adulte dont l'écriture est automatisée, les inversions de vitesses sont au nombre de quatre pour la production de deux *l* en cursive, soit une inversion de vitesse par stroke produit. Chez l'enfant de 6 ans (à droite de la figure), les inversions de vitesse sont nombreuses et l'on constate que l'écriture n'est pas encore automatisée. Ainsi, le nombre de pics de vitesse a souvent été pris comme indicateur de fluidité du mouvement ou de dysfluence (Meulenbroek & Van Galen, 1988).

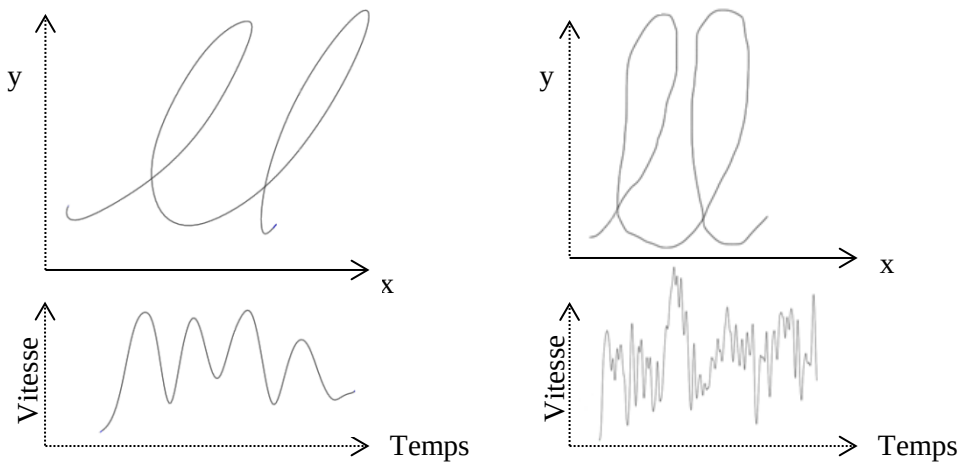

Figure 3.1. À gauche, profil de vitesse d'une production de deux *l* d'un adulte. À droite, le profil de vitesse d'une production de deux *l* d'un enfant de 6 ans. Vitesse en cm/s. Temps en s.

Le niveau d'automatisation de l'écriture a été également perçu au travers le calcul du nombre de pauses (Alamargot, Chesnet, Dansac, & Ros, 2006 ; Prunty & Barnett, 2017 ; Rosenblum, 2003). Tout ce qui n'est pas une activité graphique sur papier est défini comme une pause (Chenu, Pellegrino, Jisa, & Fayol, 2014). Les arrêts temporaires de la course du stylo avec maintien de la pointe du scripteur sur le papier et les mouvements en l'air en sont des exemples. Les pauses sont considérées comme étant le reflet d'une activité coûteuse cognitivement (Schilperoord, 1996). Des temps de pause longs, que l'on rencontrerait chez des faibles scripteurs correspondraient à des processus cognitifs longs et couteux. En plus de l'attention requise pour la transcription (McCutchen, 1996), d'autres processus comme la planification, la génération de texte ou la révision s'y superposeraient. Des temps de pause courts, que l'on retrouve plutôt chez les bons scripteurs (Søvik, Arntzen & Thygesen, 1987)

correspondraient à des processus cognitifs plus rapides et moins couteux (Favart & Olive, 2005) : ceux dédiés à la planification, la génération de texte ou la révision bénéficieraient alors des ressources attentionnelles libérées en matière d'exécution motrice. Olive et Kellogg (2002) distinguent deux catégories de pauses. Chez les scripteurs, dans le cadre de composition et copie de texte, les pauses inférieures à 250 ms correspondraient au temps requis pour l'activation de processus moteurs seuls, et les arrêts temporaires d'activité graphique supérieurs à 250 ms seraient le reflet de la programmation motrice, à laquelle se rajouteraient la charge liée aux activités cognitives de haut niveau. Selon leurs résultats, les scripteurs experts peuvent à la fois, produire une activité motrice d'écriture tout en planifiant, générant et révisant le texte. Chez les scripteurs novices, l'exécution motrice accaparerait une grande partie des ressources attentionnelles, les obligeant à l'alternance entre les deux processus pour produire un texte.

Cette durée de pause limitées à 250 ms correspondrait au temps requis pour tracer, par exemple, le point sur les *i* et ne serait pas suffisamment longue pour pouvoir permettre une activité cognitive de haut niveau comme de la planification ou de la révision de texte. Chenu et al. (2014) ont proposé deux méthodes d'étude qui pourraient identifier automatiquement ce seuil dans le cadre de texte écrit. Ce seuil permettrait de différencier ce qui relève de la charge cognitive liée aux opérations grapho-motrices de ce qui seraient le résultat d'une activation cognitive de haut niveau comme l'élaboration d'un message à transcrire par exemple. L'idée sous-jacente est que chaque type de pause pourrait être différenciée d'une autre par sa distribution gaussienne (élaborée via une modélisation statistique). Leurs résultats ont mis en avant des distributions différentes (ce qui pourrait conduire à différencier les natures des pauses) mais une deuxième méthode a été nécessaire afin de prendre en compte l'hétérogénéité des données des enfants. Cette deuxième méthode s'est basée sur l'analyse des points de rupture au cours de la dynamique d'écriture. Une pause détectée, même longue, pourrait être due au temps nécessaire à la mobilité du stylo (ne reflétant alors que l'aspect grapho-moteur). Cela varierait en fonction de l'expertise de chaque participant. Or, rien ne permet d'affirmer avec certitude, selon Chenu et al. (2014) que pendant cette pause longue, liée aux processus grapho-moteurs, ne s'opèrent pas conjointement des processus cognitifs de haut niveau. De même, pour une pause d'une durée inférieure à 250 ms et qui ne correspond pas à un retour à la ligne ou au placement de la barre sur le *t*, Chenu et al. (2014) signalent qu'il est n'est pas à exclure la possibilité qu'une tâche cognitive de haut niveau puisse s'effectuer en parallèle. Enfin, le niveau d'automatisation peut également se refléter dans le nombre de mouvements en l'air pour une production spécifique. Rosenblum (2003) a demandé à des enfants israéliens âgés de 8 et 9 ans de copier des signes graphiques ressemblant à de l'écriture en hébreux (écriture familière) et à

de l'écriture latine (écriture non familière) ainsi que des mots, des phrases et des paragraphes. Les résultats ont mis en évidence que les enfants du groupe de bons scripteurs, dont l'écriture était la plus automatisée, produisaient significativement moins de mouvements en l'air que les enfants du groupe de faibles scripteurs.

La longueur de la trace peut être également un indicateur de niveau d'automatisation. En effet, la taille des productions –évaluée sur la base de la longueur de la trace– diminue en fonction de l'âge mais principalement à partir de 7-8 ans. Quelques études ont montré qu'une réduction de la longueur des tracés était une marque indiquant le niveau des processus d'automatisation (Mojet, 1991 ; Zesiger et al., 1993).

Le niveau d'automatisation pourrait aussi trouver quelques indicateurs en neuro-imagerie. Dans des études sur la motricité fine de musiciens par exemple, Lotze, Scheler, Tan, Braun et Birbaumer (2003) ont comparé les activations hémodynamiques cérébrales de violonistes experts à celles des novices. Les deux groupes ont manifesté des activations très similaires, mais plus distribuées chez les amateurs par rapport aux activités plus circonscrites observées chez les violonistes professionnels. Dans le cadre d'une tâche motrice surapprise, une localisation cérébrale est plus focale chez les experts : cortex sensori-moteur primaire controlatéral, lobes pariétaux supérieurs bilatéraux et l'hémisphère cérébelleux antérieur ipsilatéral (Figure 3.2).

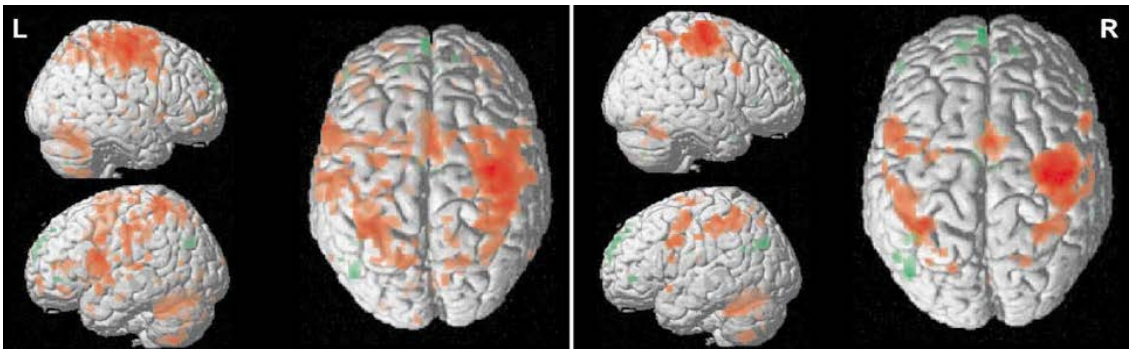

Figure 3.2. Cartes d'activation IRMf au cours de la représentation de la séquence musicale exécutée à la main gauche dans le groupe d'amateurs (à gauche) et des musiciens professionnels (à droite). L'augmentation de l'effet BOLD[8] pendant la tâche est codée en rouge, tandis que l'effet BOLD réduit est codé en vert (Lotze et al., 2003).

Pour d'autres tâches impliquant la dextérité digitale comme le tricot, Doyon et al., (2009) ont également constaté des différences d'activation cérébrale. Ils ont comparé les activations en début d'apprentissage avec celles de fin d'apprentissage, une fois le geste

[8] De l'anglais Blood-Oxygen-Level Dependent (dépendant du niveau d'oxygène sanguin)

automatisé. Les résultats ont révélé que les circuits activés étaient moins nombreux et plus localisés lorsque les gestes étaient automatisés qu'en début d'apprentissage. Les auteurs concluent que ces zones spécifiques activées sont les zones justes nécessaires et suffisantes à la mémorisation à long terme d'une habileté motrice automatisée.

3.2.1 Le rôle des feedbacks visuels

La notion de *feedback* (ou rétroaction) a été définie par Skinner (1958) comme une information consécutive à une réponse permettant à l'apprenant de l'ajuster. En matière d'écriture, le feedback visuel est donc une information visuelle de la trace produite qui permet au scripteur de localiser et corriger ses erreurs. Dans le cadre d'une écriture automatisée comme celle des adultes, il a été démontré qu'il n'y avait pas de différence cinématique entre l'écriture avec vision et sans vision (Marquadt, Gentz, & Mai, 1996). Mais d'autres études ont mis en évidence que le temps d'écriture était prolongé et que la taille des lettres s'accroissait en l'absence de feedback visuel (Van Doorn & Keuss, 1992, 1993 ; Van Galen, Smyth, Meulenbroek, & Hylkema, 1989). D'autres études chez l'adulte ont relevé que deux types de contrôle évoluaient de concert dans le tracé d'écriture (Smyth & Silvers, 1987 ; Teasdale et al, 1993 ; Teulings, 1996 ; Van Galen et al, 1994). Le premier contrôle visuel permet une organisation du mot dans l'espace plan. Le deuxième contrôle visuel, partagé avec les retours proprioceptifs, assure la production de la forme, de l'ordre et du nombre de traits à produire (Smyth & Silvers, 1987). Chez les adultes, les composantes morpho-cinétiques des lettres sont déjà intégrées et le contrôle visuel s'attache plutôt à corriger les erreurs d'orientation ou encore d'ajustement comme pour les points sur les *i* ou les barres aux *t*.

Chez les enfants, des études ont porté sur l'influence des informations visuelles sur le tracé de formes géométriques (Baldy, Chatillon, Cadopi, & Chanquoy, 1996 ; Gullaud & Vinter, 1998). Par exemple, dans l'étude de Baldy et al. (1996), des enfants entre 8 et 9 ans devaient copier, puis reproduire de mémoire, la figure de Rey-Osterrieth, (Osterrieth, 1944 ; Rey, 1941) avec vision de la main, sans vision de la main et avec vision de la main mais le crayon ne produisant pas de trace. Les résultats de cette étude ont indiqué qu'en copie, les participants ont eu tendance à produire un tracé continu, évitant ainsi les levers de crayon. Les résultats suggérèrent d'autre part que dans la condition avec vision, les participants ont adopté une stratégie de production organisée ; dans la condition sans vision de la main les participants ont produit un tracé, de basse qualité, se résumant en une juxtaposition de lignes ; et dans la condition sans trace, un bon nombre de participants ont produit d'abord les contours de la forme

en minimisant les levers de stylos. Les auteurs ont conclu que le contrôle visuel de la main rend possible des stratégies d'organisation permettant une meilleure adaptation aux contraintes de la production.

Par ailleurs, dans une expérience de Chartrel et Vinter (2006), des adultes et des enfants de 8 et 10 ans, ont eu à écrire différentes lettres en cursive (*a*, *o*, *l*, *m*, *p*) selon trois conditions : Vision Normale, Vision Cachée (sans vision de la main et de la trace écrite), Sans Vision (yeux fermés après visualisation de la lettre à écrire). Les résultats ont révélé que l'absence d'information visuelle faisait augmenter la vitesse, la longueur de la trajectoire et la pression. Les auteurs ont suggéré que la détérioration du feedback visuel altère les paramètres de commandes motrices. L'augmentation de la vitesse chez les enfants serait une conséquence de l'augmentation des longueurs, conciliant un respect global à l'isochronie. Il s'agirait pour les enfants de compenser le manque d'informations visuelles par des informations proprio-ceptives. Chez les adultes, seule la pression a augmenté, renforçant ainsi les informations provenant de la modalité proprio-perceptive. Les résultats d'une autre étude impliquant des tâches de production de mots auprès d'enfants de 8 à 12 ans ont montré que la durée, la longueur et la dysfluence étaient plus importantes lorsque les enfants ne pouvaient pas disposer d'informations visuelles sur leurs productions (Zesiger, 1995). Cela était encore très probant pour les enfants les plus jeunes (8-9 ans). La vision joue donc un rôle crucial en matière de contrôle de la trace écrite, tant au niveau de son organisation dans l'espace plan que dans la qualité de la trace écrite notamment chez l'enfant (voir aussi Søvik, 1974). Mais, pour l'écriture, les retours des informations d'ordre kinesthésiques ont aussi leur importance.

3.2.2 Le rôle des feedbacks kinesthésiques

Les retours que nous fournit la kinesthésie sont des informations sur nos propres actions (Schmidt, 1993). Il s'agit d'informations sensorielles liées aux mouvements des articulations, des tensions des muscles ou encore de la pression exercée sur des objets. Alors qu'il est aisé de manipuler la vision dans des protocoles expérimentaux, il en est différemment pour la kinesthésie. Les études sur des patients désafférentés nous ont renseignés sur le rôle de cette modalité dans le contrôle du mouvement. Les mouvements des patients désafférentés sont moins précis que ceux réalisés par des participants sains sans vision (Jeannerod, 1988) et notamment, le contrôle de la contraction musculaire n'est pas constant (Rigal, 2003). Laszlo et Bairstow (1984) ont montré qu'un entraînement kinesthésique spécifique chez des enfants de 5 à 6 ans permettait une meilleure sensibilité kinesthésique et une amélioration significative des

compétences en écriture. Ceci n'a pourtant pas été confirmé par l'étude de Sudsawad, Trombly, Henderson et Tickle-Degnen (2002). Leurs résultats ont montré que l'impact d'un entraînement sur la lisibilité de l'écriture, chez des enfants de 6 et 7 ans ayant des déficits kinesthésiques et des difficultés en écriture, n'était pas significatif.

Par ailleurs, l'étude de Bara et Gentaz (2011) a mis en évidence le rôle de la modalité haptique dans la reconnaissance des lettres chez les enfants scolarisés. Dans leur première étude, des enfants de 5 ans exploraient des lettres de l'alphabet soit visuellement, soit par exploration conjointe manuelle et visuelle. À l'issue de cet entraînement, les performances étaient évaluées en dictée de lettres, en copie de lettres, en reconnaissance de lettres et en qualité d'écriture. Les résultats ont révélé un avantage à la reconnaissance des lettres ainsi qu'à la qualité d'écriture dans les conditions d'entraînement visuo-haptique. Ceci a permis une meilleure identification et mémorisation de la lettre à produire. Il en est de même de l'entraînement visuo-haptique proposé par Palluel-Germain et al. (2007) qui consistait à guider les doigts de l'enfant sur le stylo via un dispositif nommé « Télémaque », se présentant comme une interface visuo-tactile (Figure 3.3).

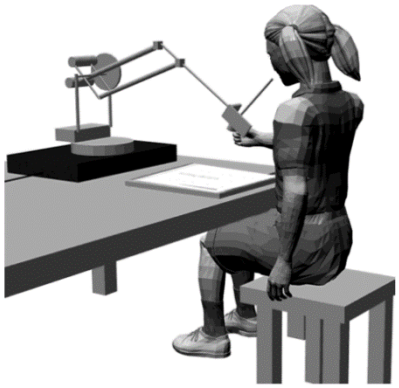

Figure 3.3. Représentation schématique du dispositif Télémaque (Palluel-Germain et al., 2007).

Ce dispositif permettait d'augmenter la fluidité de l'écriture cursive en favorisant la stratégie de contrôle pro-actif. Des enfants de 5 ans devaient reproduire six lettres en cursive (*a*, *b*, *f*, *i*, *l*, *s*). Les enfants étaient assis devant une table sur laquelle les lettres générées par Télémaque étaient affichées sur un écran d'ordinateur. Les enfants devaient tenir un stylo attaché au bras articulé à retour de force, contrôlé par le logiciel. Les résultats ont mis en évidence une amélioration de la fluidité de la production de l'écriture de toutes les lettres chez des enfants ayant suivi l'entraînement par rapport à ceux ne l'ayant pas suivi.

En matière de contrôle moteur chez les scripteurs novices, la proprioception vient donc en complément de la vision. Le flux d'informations issues de toutes les perceptions, est intégré en un tout cohérent. Les essais successifs vont ainsi permettre à l'enfant d'assimiler le geste correct grâce à la détection et à la correction des erreurs via l'intégration des feedbacks visuel et kinesthésique. Le mouvement deviendra de plus en plus automatisé.

3.3 L'anticipation motrice

Le niveau d'automatisation est aussi intrinsèquement lié à la capacité d'anticiper les gestes suivants. En effet, l'écriture fluide et rapide ne peut se faire qu'en écrivant une lettre tout en programmant les mouvements nécessaires à la production de la lettre suivante. Une fois la représentation du but à atteindre établie, nous planifions des séquences motrices dans un ordre sériel strict. Toutefois, pour écrire rapidement, les mouvements de la fin de la séquence doivent être programmés en parallèle, lors de production des premiers gestes de la séquence.

Orliaguet et Boë (1990) ont étudié l'anticipation motrice dans le cadre de l'écriture cursive. Ils ont demandé à des adultes d'écrire des digrammes *ll*, *ln* et *nl* et se sont intéressés à la production du *l*. L'hypothèse était que lors de la production du digramme *ll*, la production du deuxième *l* implique la répétition du même programme moteur, qui reste actif pendant la production du premier *l*. La production du *l* dans *ln* serait différente, car pendant que l'on produit le *l*, l'on doit anticiper des changements de taille et de sens de rotation de la lettre suivante, en l'occurrence *n*. Les auteurs ont morcelé la lettre *l* en deux strokes afin de déterminer sur quelle partie de la lettre se révélaient les influences d'une anticipation motrice. Les résultats ont indiqué que la durée du mouvement descendant de la lettre *l* (*down-stroke*) était plus longue quand elle était suivie du *n* comparée à la durée du down-stroke du *l* de la combinaison *ll*. Ils n'ont pas observé des différences entre les digrammes au niveau du stroke ascendant (*up-stroke*) de la lettre *l*. Les auteurs ont conclu que pendant la réalisation du down-stroke, s'effectuait une anticipation motrice des changements de taille et de directions du stroke suivant. Signalons également que la production du *n* n'a pas modulé la durée des strokes du *l* dans le digramme *nl*. Ainsi, l'impact de la programmation de la lettre suivante sur la durée du mouvement du down-stroke de la lettre précédente est bien plus important que la programmation de la lettre précédente sur l'up-stroke de la lettre qui lui succède.

Pour aller plus loin, cette même équipe a étudié l'effet des modifications des paramètres spatiaux de la lettre suivante sur le down-stroke de la lettre *l* (Boë, Orliaguet & Belhaj, 1991) (Figure 3.4).

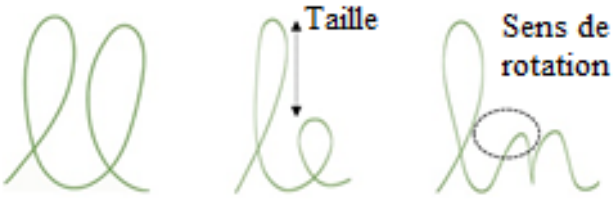

Figure 3.4. Digrammes de l'expérience d'Orliaguet et Boë (1990).

Ils ont comparé la durée du down-stroke du *l* dans des combinaisons de digrammes où l'on faisait varier la taille de la lettre suivante (*le*), ou encore le sens de rotation (*ln*) par rapport au digramme *ll*. Comme dans l'expérience précédente, pour *ll*, le programme moteur pour tracer le deuxième *l* est le même, il doit juste être maintenu actif en mémoire de travail. Pour les digrammes *le* et *ln*, d'autres programmes moteurs doivent être activés. Pour *le* le programme moteur correspond à celui du digramme *ll* mais une paramétrisation de la taille est requise pour le *e*. Dans le cas du digramme *ln*, à la paramétrisation des différences de taille, vont se rajouter celles qui concernent un changement de sens de rotation. Les résultats ont indiqué que la durée du down-stroke du *l* était plus courte quand le *l* était suivi par un *l* que lorsqu'il était suivi par un *e* ; à son tour, la durée du down-stroke du *l* était plus courte quand le *l* était suivi par un *e* que par un *n*. Ces résultats révèlent donc que pendant la production du dernier stroke d'une lettre, se produit simultanément une anticipation du geste consécutif. Le coût cognitif dépend du nombre de paramètres à traiter.

Chez l'enfant, les travaux de Kandel et Perret (2015) ont mis en exergue que l'anticipation motrice dans des tâches d'écriture cursive était un indicateur pertinent en matière d'automatisation chez les enfants entre 8 et 10 ans. Comme dans l'étude de Boë et al. (1991), les enfants devaient reproduire des digrammes (*ll*, *le*, *ln*) et les résultats ont présenté le même pattern : la durée du down-stroke du premier *l*, était plus courte dans la condition *ll* que dans la condition *le*, qui elle-même était plus courte que dans la condition *ln*. Les auteurs ont conclu que les durées des strokes descendants sont dépendantes de la variabilité des caractéristiques spatiales de la lettre qui suit, et que l'anticipation motrice était opérationnelle dès l'âge de 8 ans.

3.3.1 Le chunking

Dans une étude de Portier et al. (1990), des participants adultes devaient reproduire six caractères non familiers composés de segments ressemblant à ceux de lettres de l'écriture

majuscule mais qui variaient en degré de similarité. Après entraînement, les analyses sur le temps des trois premiers segments produits ont indiqué qu'il y avait d'une part, un phénomène d'assemblage des premiers segments et d'autre part que la préparation des segments ultérieurs du caractère se réalisait pendant l'exécution en temps réel du segment initial. Ce principe d'assemblage d'éléments en unités de traitement plus importantes est connu sous le terme *chunking* moteur (Verwey, 1994). Dans le domaine de la production motrice, comme dans l'expérience de Portier et al. (1990), ce processus permet l'élaboration d'une représentation unique à partir d'une série de réponses motrices successives. Une fois que cette représentation est récupérée de la mémoire, elle permet une préparation à l'action à l'avance et son exécution à un rythme élevé (Ruitenberg, Abrahamse, & Verwey, 2013).

Le phénomène de chunking dans le développement moteur a été étudié par Ashtamker et Karni (2015). Des enfants de 11 ans devaient répéter plusieurs fois une séquence de mouvements d'opposition de doigts, comme par exemple joindre le pouce avec l'auriculaire, puis l'index, puis l'annulaire, puis l'index, puis l'auriculaire et enfin l'annulaire (Figure 3.5). Les enfants ont été entrainés à l'apprentissage de sous séquences constituées de deux à trois mouvements d'opposition, puis ils étaient invités à produire en continu, une séquence complète de six mouvements d'opposition, composée des deux sous séquences apprises.

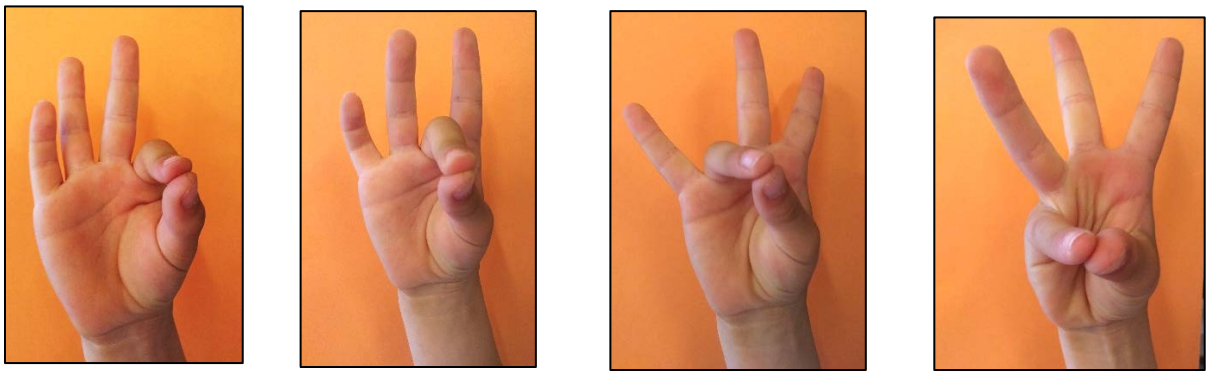

Figure 3.5. Exemple d'exercices d'opposition de doigts (Ashtamker & Karni, 2015).

L'étude de la vitesse et du nombre d'erreurs produites a montré une amélioration des performances pour la séquence complète 24 heures après l'entraînement, mais uniquement lorsque cette dernière bénéficiait de l'apprentissage des sous-séquences. Ainsi, un bref apprentissage de la séquence complète succédant à l'apprentissage du regroupement en sous séquences, permettrait une intégration et une consolidation de l'ordre des mouvements de cette séquence. Ce phénomène de chunking est également à l'œuvre dans le cadre de l'apprentissage

de patterns de labyrinthes constitués de 6, 8, 10, ou 12 segments connectés par des intersections (Van Mier et al., 1993 ; Figure 3.6).

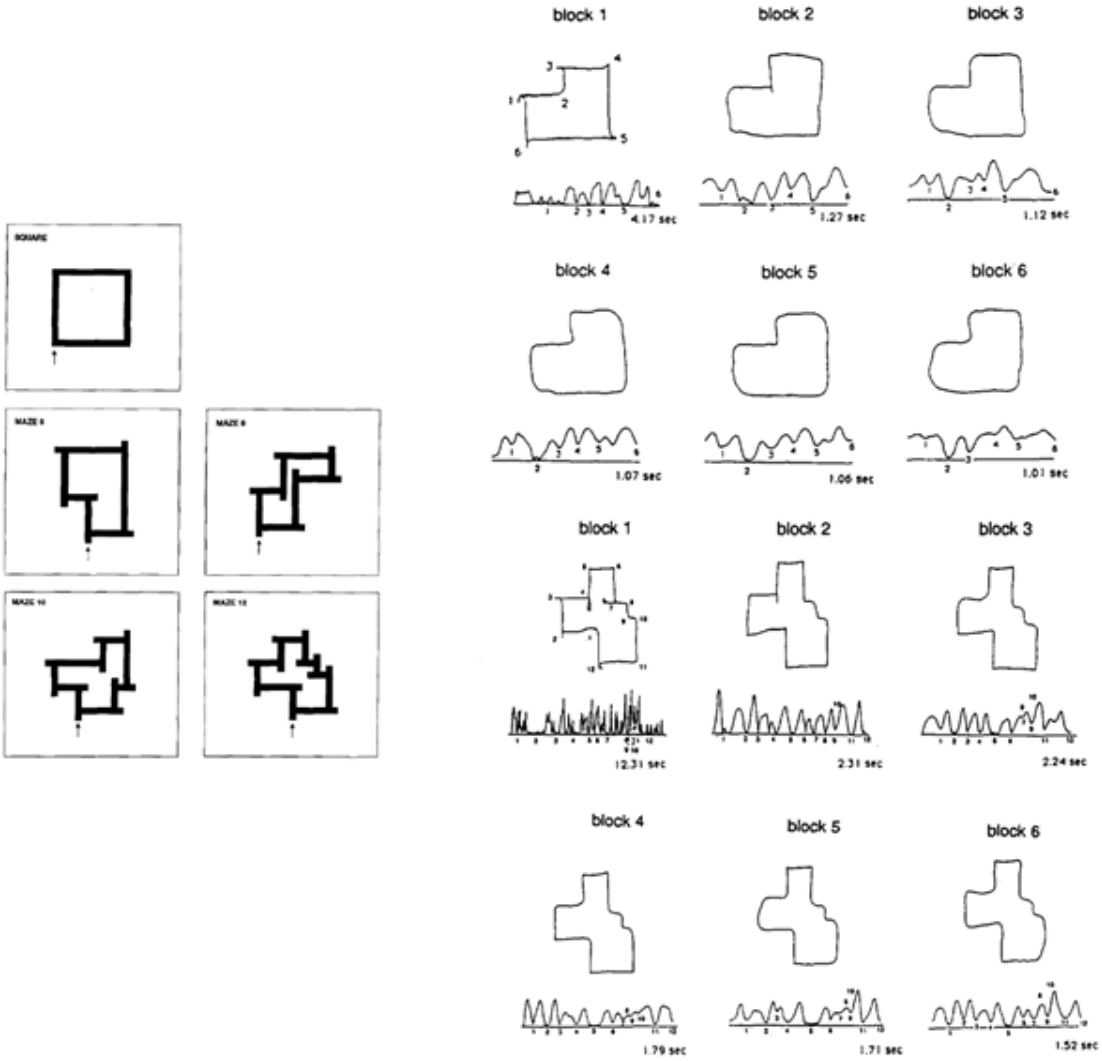

Figure 3.6. À gauche, les labyrinthes utilisés dans l'expérience de Van Mier et al. (1993). Le chemin total était de 24 cm pour les cinq conceptions. Les flèches indiquent la position de départ de chaque dessin. À droite en haut, productions des participants des labyrinthes de six segments. Sous chaque production apparait le profil de vitesse correspondant. La durée totale de chaque production est inscrite à droite sous son profil de vitesse. À droite en bas, productions des participants des labyrinthes de 12 segments.

Avec la pratique et l'entraînement, les participants ont peu à peu réduit la durée du mouvement et ont fait moins d'erreurs liées au sens du tracé. Ils ont graduellement assemblé plusieurs segments (jusqu'à 8) en un seul mouvement, soit en optant pour la stratégie consistant à arrondir les angles, soit en diminuant la pause relative au changement de direction aux angles du labyrinthe.

Ainsi, dans le cadre du tracé de patterns géométriques, l'élaboration de chunks à partir de la séquence ordonnée de strokes à produire faciliterait la récupération du programme moteur et donc la réalisation de la figure. Ce processus de chunking semble donc être un indicateur d'automaticité dans des tâches motrices, y compris dans des tâches de motricité fine comme l'écriture. L'économie de traitement par une récupération d'un programme moteur unique d'une taille plus importante que le stroke a également été démontré par Pontart et al. (2013). Ces auteurs se sont intéressés aux tâches de dictée de mots et d'écriture du prénom, du nom et de l'alphabet en cursif, chez des enfants de 7 à 15 ans. Une des conclusions de cette étude fut de constater que la vitesse de déplacement du stylo était plus lente pour l'écriture de l'alphabet que pour les noms dans les classes secondaires. Le gain de vitesse pour l'écriture des noms serait le résultat d'une récupération de la chaîne graphémique en un seul morceau –un chunk– et non un traitement lettre à lettre comme dans le cas de l'écriture de lettres isolées.

En outre, l'étude longitudinale de Lambert et Espéret (2002) a mis en évidence un dénominateur commun entre les processus orthographiques et les processus grapho-moteurs dans une tâche de copie de mots, non-mots, pseudo-mots et de dessins composés de lignes brisées chez des enfants de 6 ans. Les résultats ont révélé une augmentation de la vitesse pour la copie des items verbaux supérieure à celle des dessins. Les auteurs concluent à l'existence d'un « mécanisme d'assemblage » faisant évoluer les processus grapho-moteurs du trait à la lettre et les processus lexicaux de la lettre à la syllabe. La lettre ne serait plus programmée segment par segment, ce qui engendre un coût de traitement élevé, mais bien comme une entité entière. Ce mécanisme d'assemblage permettrait d'alléger la charge du contrôle grapho-moteur en augmentant la taille de l'unité de traitement. Selon Berthoz (2009), ce mécanisme permettrait de substituer en un geste unique plusieurs gestes entrecoupés d'arrêts. « Le geste est pensé par sa fin, et non en étapes. » (p.130). Il nomme ce principe la « simplexité ».

Cette faculté de produire des stratégies visant à réduire la complexité d'une tâche au cours du développement avait été également observée par Nihei (1980, 1983). Dans son étude chez les enfants de 5 ans à 11 ans, Nihei a décrit le principe d'organisation du tracé des strokes de l'écriture de lettre en japonais comme suivant la règle du point d'ancrage. Chez les plus jeunes le point d'ancrage serait fixe. Le tracé du stroke suivant débuterait là où commence le premier stroke tracé. Par exemple, pour reproduire une suite de deux strokes comme dans la lettre *L* en majuscule d'imprimerie, l'enfant de 5 ans débute son tracé au point de jonction (à l'angle formé par les deux segments). Dans un premier temps il/elle trace le segment horizontal puis en deuxième lieu, il/elle replace la pointe de son stylo sur le point de départ du premier

tracé pour effectuer le tracé vertical. Cette organisation évoluerait vers un tracé continu et fluide chez les enfants les plus âgés (6 ans et plus) : ainsi le stroke suivant débuterait là où se terminerait le stroke précédent. Dans l'exemple du tracé du pattern *L*, l'enfant commence son tracé par le segment vertical qu'il/elle poursuit par le segment horizontal. Nihei nomme ce principe le « fluid principle anchoring ». Selon Nihei (1983) les stratégies à 5 ans résulteraient de l'activation de plusieurs programmes moteurs successifs alors qu'à partir de 6 ans la production serait contrôlée par un programme moteur unique (Figure 3.7). Nihei nomme le mouvement élémentaire, permettant de réaliser l'angle du *L* de façon fluide et rapide, le « movème ». Ce dernier ne peut être réalisé que par les enfants les plus âgés maîtrisant l'ancrage fluide, les plus jeunes ne pouvant le réaliser qu'à l'aide de l'ancrage fixe. Plus tard, vers 11 ans, les enfants suivraient une règle usant du principe directionnel, à savoir, les débuts des tracés se feraient de haut en bas et de gauche à droite.

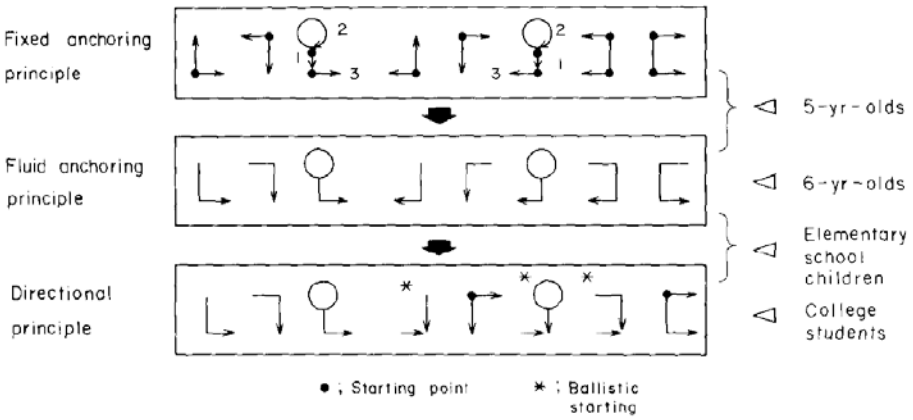

Figure 3.7. Description schématique du changement de développement dans le principe d'organisation des strokes (Nihei 1980).

De son côté, Dumont (2013) décrit la relation fonctionnelle qui existe entre la première partie de la lettre *a* (écrit en cursif) et la deuxième partie. La deuxième partie du *a* est définie comme une « étrécie », c'est-à-dire comme une boucle qui se ferme sur elle-même. Cette boucle étrécie assurerait la fermeture du rond et porterait en elle « le chunking nécessaire à la fois à la fluidité du geste (attribut de l'écriture cursive) et à l'émergence systématique de la lettre (la lettre *a* étant autre chose que la somme des parties : le rond et l'étrécie) » (Dumont, 2013 ; p 185).

Enfin, d'un point de vue neuronal, des auteurs comme Ruitenberg et al. (2013) se sont intéressés aux mécanismes d'automatisation de mouvements séquentiels chez les pré-

adolescents en les comparant avec les performances d'adultes. Les différences observées, à savoir, des performances plus contrôlées et moins automatisées chez les pré-adolescents, seraient liées au degré de maturation des structures cérébrales telles celles du cortex préfrontal et du cervelet. Les noyaux gris centraux seraient principalement activés lors de l'acquisition de tâches motrices séquentielles comme les chunks moteurs (Boyd et al., 2009).

Notre première étude s'est penchée sur ce phénomène d'augmentation du nombre d'unités de traitement chez les enfants de 6 à 9 ans. Nous suggérons que les enfants vont peu à peu enrichir leur programme moteur en passant progressivement d'une unité de traitement de l'ordre du stroke à des unités plus larges de l'ordre de la lettre elle-même.

PRÉSENTATION DU TRAVAIL DE DOCTORAT

Ce travail doctoral visait à approfondir nos connaissances sur les processus qui permettent la mise en place des automatismes lors de l'apprentissage de l'écriture. De la série de recherches présentées dans les chapitres précédents découle que chez l'adulte, l'écriture est fluide et rapide –i.e., automatisée– car la production de chaque lettre repose sur l'activation préalable d'une mémoire procédurale connue sous le terme programme moteur. Dans nos études, nous nous sommes attachés à comprendre comment les enfants élaborent ces programmes moteurs lorsqu'ils/elles apprennent à écrire. Pour ce faire, nous avons enregistré les mouvements d'écriture des enfants à l'aide d'une tablette digitalisante. Afin de mettre en lumière si une évolution de la programmation stoke par stroke à une programmation lettre par lettre s'effectuait au cours des premières années de l'apprentissage de l'écriture, nous avons recueillis des données empiriques à partir d'observations sur le terrain pour tester cette hypothèse. Notre travail en milieu scolaire nous a également permis de constater que la nature du stroke à produire affectait la mise en place des automatismes. En effet, les enfants ont souvent des difficultés pour réaliser des strokes impliquant des mouvements de rotation (e.g., pour tracer la lettre *0*) et pour exécuter correctement les mouvements de pointage qui permettent de positionner l'outil scripteur après un lever (e.g., pour mettre le point sur le *i*). Dans le chapitre ci-après, nous présentons la méthodologie utilisée dans nos expériences. Les études que nous avons réalisées constituent les trois chapitres suivants et sont présentées sous forme d'articles, car elles sont soit déjà publiées, soit en cours de publication. L'ensemble de ce travail est suivi par une discussion générale des résultats expérimentaux et une conclusion.

PARTIE EXPÉRIMENTALE

Cette partie expérimentale présente dans un premier temps la méthodologie utilisée dans nos différentes études. Puis dans un deuxième temps les trois études, sous forme d'articles publiés ou en cours de publication, sont proposées.

CHAPITRE 4

Méthodologie

4.1 Analyse de l'écriture chez l'enfant

Pour comprendre les processus qui permettent la mise en place de l'automatisation de l'écriture chez l'enfant nous avons focalisé notre attention sur les aspects cinématiques de production du mouvement. Depuis l'avènement de tablettes digitalisantes et des logiciels d'analyse, l'enregistrement des données spatio-temporelles de l'écriture permet des analyses fines sur les caractéristiques des mouvements de production écrite. Le paradigme expérimental que nous avons utilisé dans ce travail doctoral est le même pour les trois études que nous présenterons. Nous allons donc décrire dans ce chapitre la méthodologie générale ; les détails propres à chaque expérience sont exposés dans les articles.

Nous avons recueilli les données spatio-temporelles de l'écriture de nos participants grâce à l'utilisation d'une tablette graphique Wacom Intuos 3 format A5 qui délivre une surface active de 20,32 x 15,24 cm. Sa résolution de 5080 lignes par pouce (environ 2,54 cm) définit la finesse de la trame. Sa fréquence d'échantillonnage est de 200 Hz, soit une capture de coordonnées toutes les 5 ms, avec une précision de 0,02 mm. Un stylet sans fil et sans pile est utilisé comme instrument d'écriture, et il est aussi bien manipulable qu'un stylo ordinaire. Son diamètre est légèrement plus grand qu'un stylo ordinaire. Il permet de tracer ou d'écrire sur une feuille de papier que l'on place sur le dessus de la tablette de façon tout à fait classique. Comme le stylo choisi est celui qui laisse une trace sur la feuille par la diffusion de la pointe bille, il permet ainsi une rétroaction immédiate et identique à celle de l'écriture sur une simple feuille. En effet, il semble que l'écriture directe sur la tablette sans une interface papier constitue un défi supplémentaire pour les enfants apprentis scripteurs (Gerth et al., 2016). Par ailleurs, nous avons sélectionné une bille correspondant le plus à la taille d'une pointe bille moyenne. La tablette capte le signal de la pointe du stylet à une hauteur maximum de deux centimètres. Au-delà de cette limite, le signal entre le bout du stylet et la surface de la tablette n'est plus transmis. Cette caractéristique de la tablette nous a donné la possibilité d'enregistrer des données spatio-temporelles du mouvement d'écriture lorsque le stylet était en l'air.

La tablette graphique était reliée à un ordinateur qui gérait le déroulement expérimental avec le logiciel *Ductus* (Guinet & Kandel, 2010). Son module d'acquisition de données, nous a permis de contrôler toute la passation de l'expérience. L'expérience commençait par la présentation d'un point de fixation au centre de l'écran et un bip sonore indiquait la présentation

du stimulus. La durée de présentation du point de fixation a été fixée à 1500 ms pour les passations auprès des enfants et réduite à 500 ms auprès des adultes. Par la suite nous présentions les stimuli sur l'écran, ce qui déclenchait les réponses écrites sur la tablette graphique. Les stimuli apparaissaient à l'écran le temps nécessaire pour les reproduire. Les consignes de passation furent, pour chacune des études, de demander aux participants de reproduire les modèles présentés à l'écran, en écrivant comme ils avaient l'habitude de le faire.

Pour l'étude 1, les stimuli présentaient des séquences de lettres en écriture cursive ; dans l'étude 2 les stimuli présentaient des lettres de l'alphabet isolées écrites en majuscules ; et dans l'étude 3, les stimuli présentaient des séquences de lettres écrites en majuscules. L'expérimentateur gérait le déroulement de l'acquisition des données : un bouton « continuer » lui permettait le passage au stimulus suivant, un bouton « erreur » lui permettait de revenir sur le déroulement de la séquence de présentation et d'enregistrement, un bouton « fin » permettait l'arrêt prématuré de l'expérience. Afin de se familiariser avec le matériel, il a été demandé aux participants d'effectuer quelques essais avant les passations, en écrivant leur prénom et en s'exerçant à la reproduction de deux ou trois formes géométriques simples.

Signalons enfin que toute proposition de passation expérimentale chez le sujet humain se doit d'être approuvée par un comité d'éthique. Le Comité d'Éthique pour les Recherches - Grenoble Alpes (CERGA, anciennement CERNI) nous a donné un avis favorable (accordé le 10 novembre 2015 sous le numéro : 2015-11-10-78 ; Annexe 1). Il fallait ensuite obtenir un accord, sous la forme d'une convention pour l'accueil d'un chercheur ou étudiant dans une école du 1er degré, auprès de la Direction Départementale des Services de l'Éducation Nationale (Annexe 2). L'organisme chargé de ce type de démarche est la Cellule Académique Recherche Développement Innovation Expérimentation (CARDIE), à laquelle nous avons fait parvenir une présentation de notre démarche ainsi que la convention remplie et signée par les directeurs des écoles concernées et les inspecteurs départementaux de l'Éducation Nationale concernés. En dernier lieu, un accord parental signé et un accord de chacun des participants (enfants ou adultes) furent demandés (Annexe 3).

4.2 Analyse des données

La trace du stylo sur la tablette était codée en coordonnées selon des axes xy et la pression était codée en une unité établie par la tablette Wacom. La latence, qui faisait référence au temps écoulé entre la présentation du stimulus sur l'écran et l'initiation du mouvement d'écriture sur la surface de la tablette (pression > 0), était codée en millisecondes. Ces données étaient

récupérées par le module dédié à l'analyse de données de *Ductus*. Dans un premier temps, les coordonnées xy de la trajectoire, converties en centimètres, ont été filtrées chronologiquement à l'aide d'un filtre linéaire passe-bas de premier ordre Butterworth avec une fréquence de coupure de 12 Hz (Rabiner & Gold, 1975). Ce filtre a été à nouveau passé en sens chronologique inverse. En d'autres termes, afin d'augmenter le gain de puissance du signal, il est communément appliqué des filtres sur sa totalité. Ce filtre va permettre, d'une part d'éliminer les tracés dont la fréquence est supérieure à 12 Hz qui pourraient être dus à des artéfacts non liés à l'écriture. D'autre part, en repassant en sens chronologique inverse, il va permettre de répartir les signaux conservés là où d'autres ont été coupés et ainsi, de limiter les sauts temporels liés aux coupures.

À partir des données filtrées, *Ductus* calcule différents paramètres géométriques et cinématiques des traces d'écriture, comme par exemple la trajectoire du tracé, la durée d'écriture, le nombre de pics de vitesse, la vitesse moyenne d'écriture, ou encore le nombre et la durée des mouvements en l'air (Figure 4.1). Ces mesures présentent une sensibilité variable en fonction des populations et des conditions expérimentales. Dans chaque étude décrite dans les articles des chapitres suivants, nous avons relevé les mesures typiquement utilisées dans les études sur la production de l'écriture chez l'enfant ainsi que d'autres qui nous semblaient pertinentes pour le but de l'étude.

Sur ces mesures nous avons fait différents types de segmentations, ce qui nous a permis de focaliser sur certains aspects du mouvement d'écriture. La segmentation portait sur une lettre d'intérêt pour, dans le cas de l'étude 1, étudier l'impact du nombre de strokes sur les mesures cinématiques. Dans le cadre de l'étude 2, la segmentation portait sur les strokes de chaque lettre, car l'objectif était de déterminer le nombre de strokes produits en surface et le nombre de mouvements en l'air pour l'ensemble de l'alphabet. Dans l'étude 3, la segmentation permettait de considérer le tracé des séquences de lettres en son entier. Les paragraphes suivants présentent les mesures que nous avons relevées.

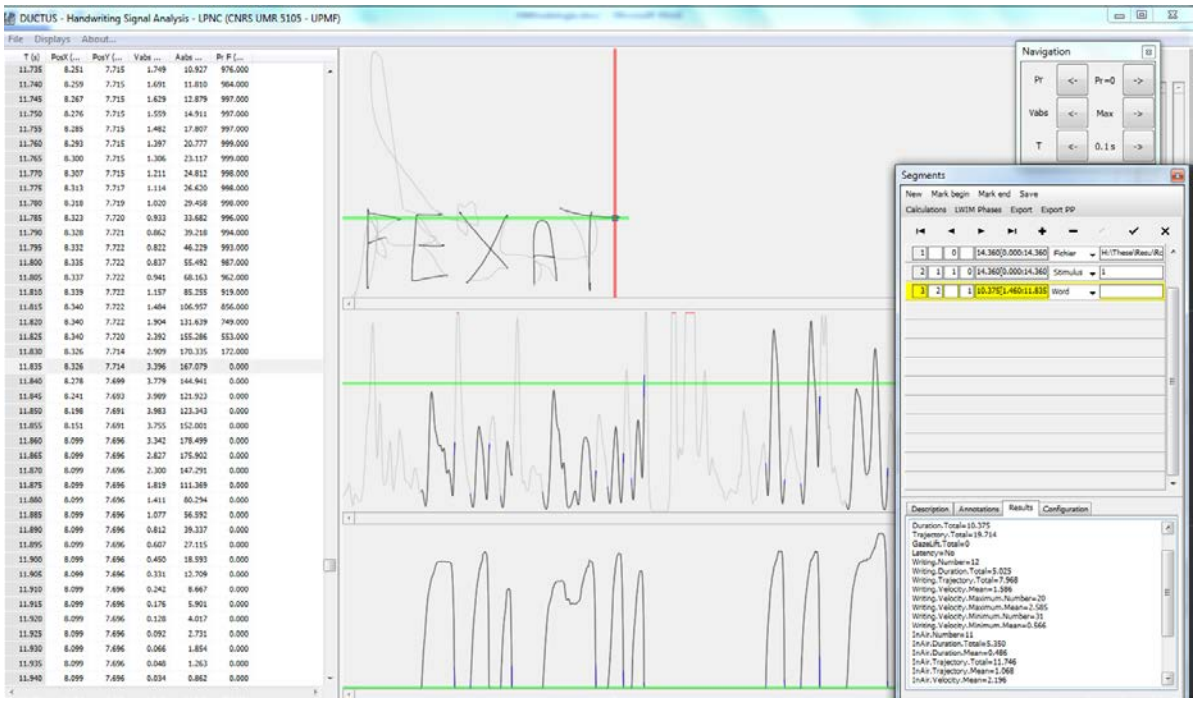

Figure 4.1. Interface d'analyse de données de *Ductus*. À gauche la visualisation de la table de données (valeurs xy, vitesse absolue, accélération et pression). Au centre de haut en bas (les lignes en noir présentent les données acquises sur la surface de la tablette alors que les lignes en gris présentent les mouvements en l'air) : la trajectoire du mouvement, son profil de vitesse et son profil de pression. À droite, les pavés de navigation et de segmentation sont disponibles pour effectuer les calculs sur le/s segment/s sélectionné/s.

4.2.1 Pression

Afin de déterminer un début du tracé, le navigateur du logiciel permettait une recherche automatique en sélectionnant le curseur sur la recherche d'une pression supérieure à zéro, c'est-à-dire, dès que le stylo entrait en contact avec la surface de la tablette (sans les mouvements en l'air précédant l'initiation du mouvement). Par exemple, dans le cadre de l'étude 3, le choix systématique de cet indicateur permettait de ne prendre en compte dans l'analyse que le tracé effectif de la séquence de lettres. La fin du tracé était elle aussi déterminée sur la base de la dernière pression égale à zéro (sans les mouvements en l'air de fin de tracé). Le calcul sur les mouvements en l'air s'effectuait également sur la base d'une recherche de pression égale à zéro.

4.2.2 Minimum de vitesse au point de courbure maximal

Dans l'étude 1, les lettres cursives d'intérêt (l dans la figure 4.2), étaient positionnées en amont ou en aval de lettres utilisées comme contexte (u dans la figure 4.2). Afin de déterminer le début du stroke de la lettre d'intérêt, la recherche manuelle d'un minima de vitesse à un maxima de courbure étaient l'indicateur du début du stroke suivant, ou de la fin du stroke précédant

(Meulenbroek & Van Galen, 1990). Si la lettre d'intérêt était positionnée en fin de stimulus, la pression égale zéro était l'indicateur de fin de stroke.

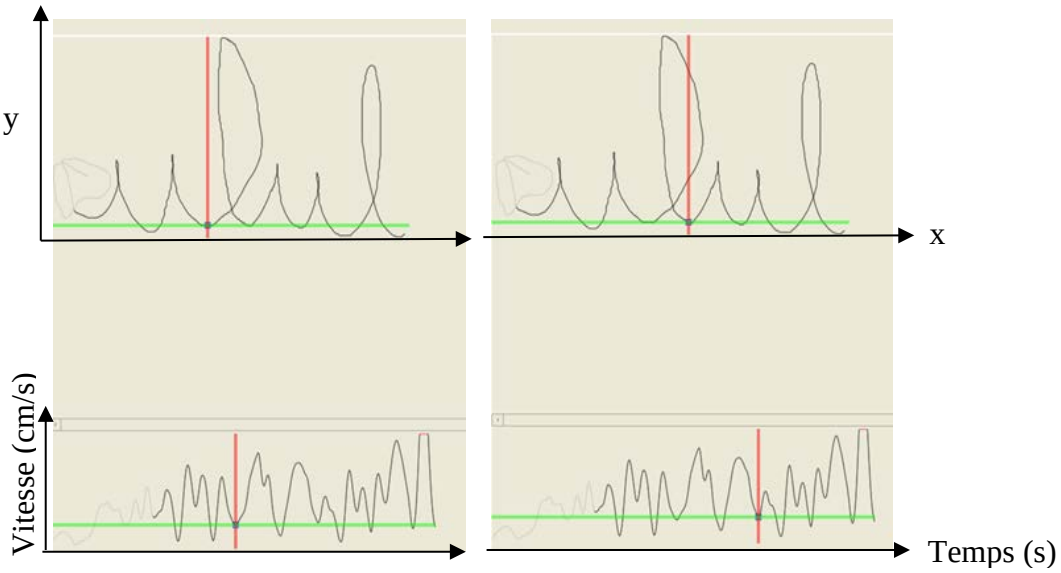

Figure 4.2. À gauche, localisation du début du premier stroke du *l* par la recherche du minimum de vitesse (en bas) au maximum de courbure entre le dernier stroke de la lettre *u* et le premier stroke de la lettre *l* (en haut). À droite, localisation de la fin du dernier stroke de la lettre *l* par la recherche du minimum de vitesse (en bas) au maximum de courbure entre le dernier stroke de la lettre *l* et le début du premier stroke de la deuxième lettre *u* (en haut).

4.2.3 Maxima de vitesse

La segmentation des tracés d'écriture cursive chez l'enfant, en particulier des plus jeunes, a été très difficile et complexe. Nous avons dû établir une série des critères de segmentation supplémentaires lorsque nous ne parvenions pas à segmenter correctement sur la base des critères classiques utilisés dans la plupart des études cinématiques de l'écriture. Ainsi, si le minimum de vitesse sélectionné n'indiquait pas la fin du stroke de la lettre (Figure 4.3 à gauche), ni le début du stroke de la lettre suivante (Figure 4.3 au centre), le choix de la limite inter-lettre se faisait par le positionnement du curseur sur le maximum de vitesse entre les deux lettres (Figure 4.3 à droite).

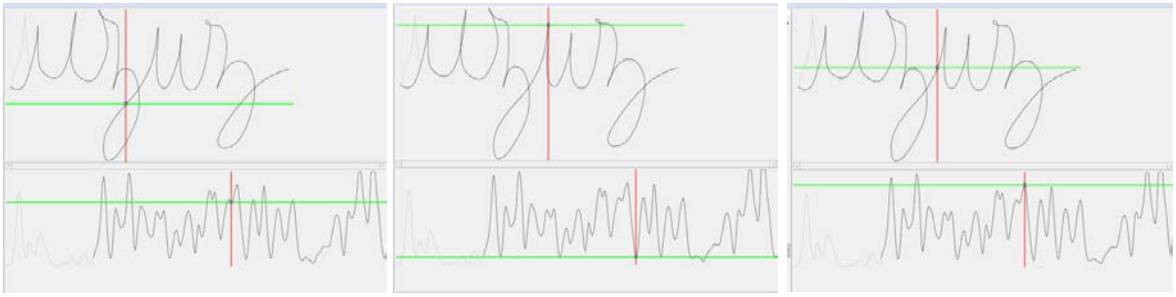

Figure 4.3. À gauche, positionnement du curseur sur la coordonnée y au minima de vitesse (en bas) ne correspondant pas à la fin du stroke de le lettre d'intérêt (en haut). Au centre, positionnent du curseur sur la coordonnée y au minima de vitesse (en bas) ne correspondant pas au début du premier stroke de la lettre *u* (en haut). À droite, choix de la coordonnée y (en haut) correspondant au maximum de vitesse (en bas) pour la délimitation inter-lettre.

4.2.4 Minima en y

Dans quelques cas, il a été impossible de déterminer un maxima de courbure coïncidant à un minima de vitesse pour déterminer le début (ou la fin) d'un stroke inter-lettre. Le choix d'un positionnement de la fin de stroke de la lettre qui précède s'est opéré par une localisation du curseur sur le minimum de la coordonnée sur l'axe y entre les deux lettres (Figure 4.4 à droite).

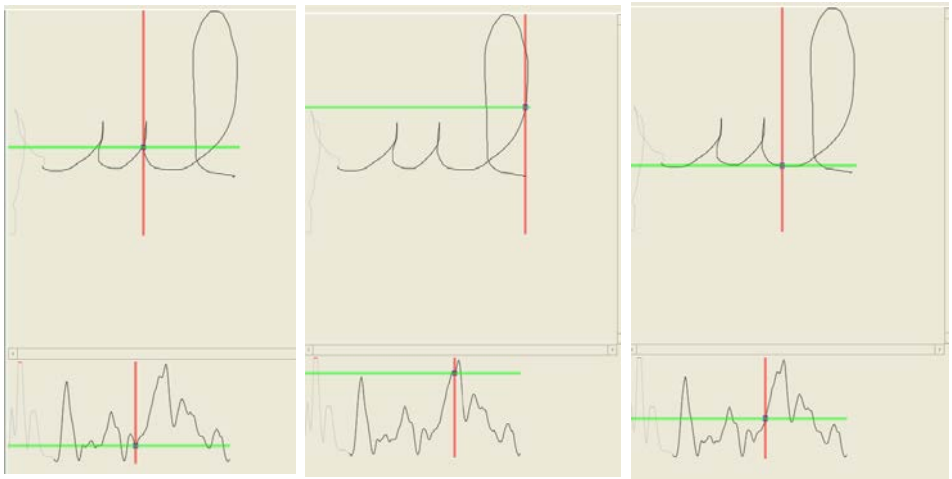

Figure 4.4. Recherche du point indiquant la fin du dernier stroke du *u* et le début du premier stroke du *l* par le minima de vitesse au maxima de vitesse. À gauche, minimum de vitesse (en bas) ne coïncidant pas avec un maximum de courbure (en haut). Au centre, minimum de vitesse suivant (en bas), ne correspondant pas non plus au maximum de courbure (en haut). À droite, point indiquant la fin du dernier stroke du *u* et du début du premier stroke du *l* par la sélection de la coordonnée en y minimum (en haut) entre les deux lettres.

Si plusieurs points identiques aux minima de coordonnées en y se présentaient, la sélection se faisait sur le choix de la première des coordonnées en y (Figure 4.5).

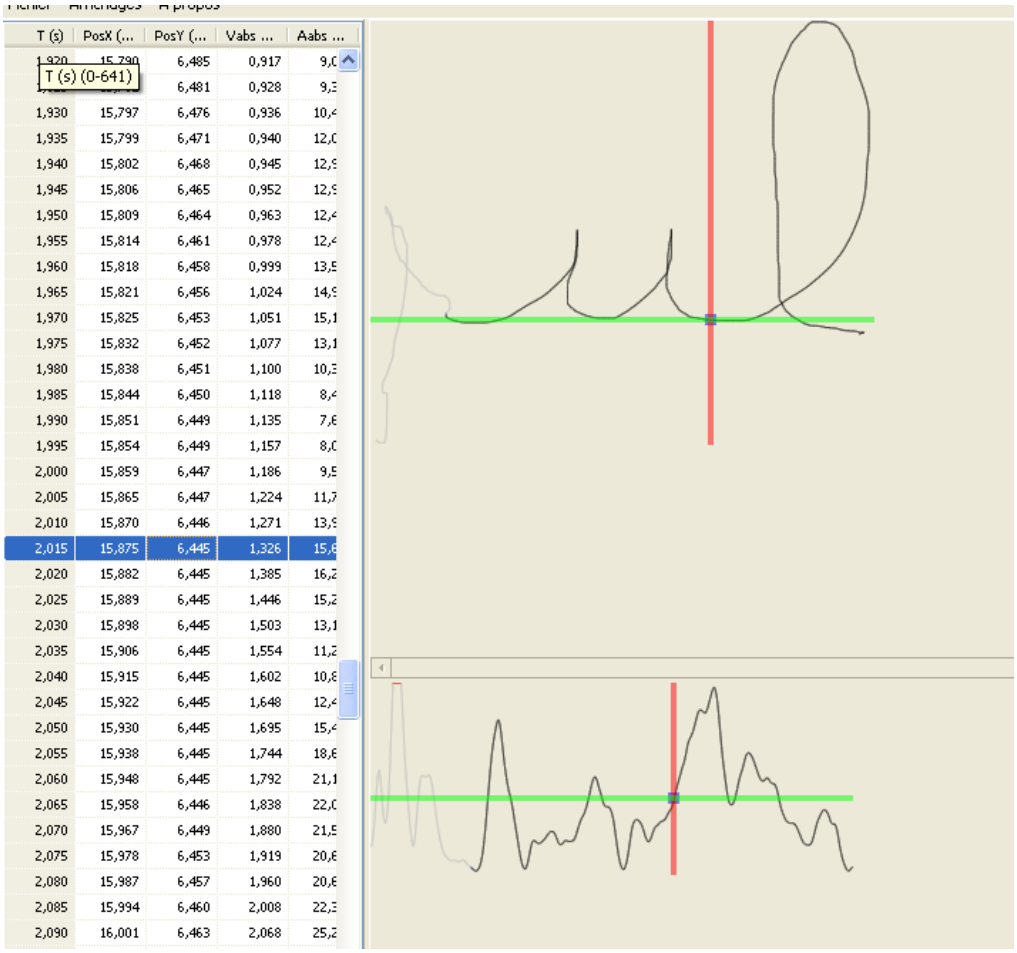

Figure 4.5. À gauche pavé de visualisation des données. À droite, positionnement du curseur sur la première valeur de la série de coordonnées identiques en y.

Les résultats de la segmentation ont été récupérés sur un tableau Excel, ce qui permettait ensuite une analyse statistique directe via le logiciel R (version RStudio, version 3.0.1; Bates, Maechler, & Bolker, 2011). Le traitement statistique a été de type inférentiel. Sous réserve que certaines hypothèses soient vérifiées, les statistiques inférentielles permettent de comparer les moyennes, les variances de la population à partir de moyennes d'échantillons représentatifs d'une population. Elles offrent un large choix de méthodes qui s'adaptent au mieux aux types de données recueillies. Dans le cadre de cette thèse, nous avons procédé en des analyses statistiques en nous basant sur le modèle mixte. Le modèle mixte est un modèle statistique qui tient compte à la fois des facteurs à effets fixes et des facteurs à effets aléatoires. Cette approche permet la modélisation de la moyenne et de la variance en même temps. Dans le cadre de mesures répétées (ce qui est le cas pour les études de cette thèse) l'utilisation de modèle mixte nous a semblé le plus adapté.

Nous avons également proposé dans l'étude 1 une Analyse en Composantes Principales (ACP) qui présente la variabilité d'un jeu de données à travers une réduction du nombre des

variables. Cette méthode est essentiellement descriptive et permet de visualiser l'ensemble des données en ramenant le nombre de variables, qui peuvent être corrélées entre elles, en un nombre plus petit de composantes principales, non corrélées entre elles.

CHAPITRE 5

Étude 1 - Élaboration des programmes moteurs dans l'automatisation de la production des lettres

Nous avons vu dans les chapitres précédents qu'un des indicateurs de l'automatisation des mouvements d'écriture est la capacité à générer de façon fluide et rapide une séquence motrice de plus en plus longue. Cela est en partie possible parce que les programmes moteurs activés en mémoire contiennent suffisamment d'informations sur le mouvement qui doit être effectué pour la réalisation de la lettre. Chez l'adulte, les programmes moteurs sont de manière générale de la taille d'une lettre. Chaque allographe a son propre programme moteur et contient des informations sur la forme, l'ordre et la direction des strokes de la lettre. Chez l'enfant, ces programmes moteurs doivent être élaborés pour que l'écriture devienne fluide et automatique. Les études que nous avons présentées indiquent que cet apprentissage est laborieux et dépend également du développement neuro-moteur. Il commence à la fin de la Grande Section de la maternelle et se met en place au cours des premières années de l'école élémentaire. Cette première étude visait donc à comprendre l'évolution des programmes moteurs lors de la production de lettres au cours de l'école élémentaire.

Nous avons fait l'hypothèse que la taille du programme moteur évolue avec l'âge et la pratique de l'écriture. Au début de l'apprentissage, les enfants procéderaient par l'activation des strokes un à un alors que les plus âgés, présentant une écriture plus fluide et automatisée, seraient capables d'activer un programme moteur de la taille de l'allographe, comme les adultes. Dans ce but, nous avons étudié l'impact du nombre de strokes des lettres, pour chaque groupe d'âge, sur plusieurs mesures cinématiques. Nous avons fait varier le nombre de strokes de certaines lettres cursives : deux pour le *l*, trois pour le *j*, quatre pour le *h* et cinq pour le *z*. Si l'enfant élabore les programmes moteurs des lettres en regroupant progressivement de plus en plus de strokes –comme pour des stratégies de chunking– alors les mesures cinématiques devraient varier en fonction du nombre de strokes de chaque lettre pour les plus jeunes. Si en revanche, il/elle a automatisé ses mouvements d'écriture et est capable d'activer des programmes moteurs de la taille de la lettre, les mesures cinématiques devraient être moins impactées par l'augmentation du nombre de strokes des lettres.

Des enfants de 6 à 9 ans ont eu à reproduire sur tablette digitalisante, des séquences de lettres écrites en cursive dans lesquelles étaient intégrées des lettres qui variaient en nombre de strokes. Nos résultats fournissent des données cinématiques indiquant que le nombre de strokes

affectait la production de lettres des enfants les plus jeunes mais beaucoup moins celle des enfants les plus âgés. Il semblerait que les enfants passent d'une stratégie de programmation motrice stroke par stroke à une programmation, à partir de 8 ans, qui regroupe de plusieurs strokes en chunks, voire de la lettre entière. Par ailleurs, la durée de production du mouvement et la dysfluence ont décru fortement entre 6 et 8 ans pour se stabiliser entre 8 et 9 ans. Cela suggère que des processus de début d'automatisation en matière d'écriture se mettent en place dès l'âge de 8 ans.

L'ensemble de ce travail est présenté sous la forme d'un article scientifique déjà publié. La référence bibliographique est la suivante :

Séraphin Thibon, L., Gerber, S. & Kandel, S. (2018). The elaboration of motor programs for the automation of letter production. *Acta Psychologica*, 182, pp. 200-211. doi.org/10.1016/j.actpsy.2017.12.001

Une partie de ce travail a également été présentée sous forme de poster dans un congrès international dont la référence est la suivante :

Séraphin Thibon, L., Gerber, S. & **Kandel, S.** (2016). Automation in writing acquisition. *International meeting of the Psychonomic Society*, Granada, Spain, May, 5-8.

Acta Psychologica 182 (2018) 200–211

Contents lists available at ScienceDirect

Acta Psychologica

journal homepage: www.elsevier.com/locate/actpsy

The elaboration of motor programs for the automation of letter production

Laurence Séraphin Thibon, Silvain Gerber, Sonia Kandel*

Univ. Grenoble Alpes, GIPSA-lab (CNRS UMR 5216), Grenoble, France

ARTICLE INFO

Keywords:
Handwriting
Strokes
Motor program
Children
Automation

ABSTRACT

We investigated how children learn to write letters. Letter writing evolves from stroke-by-stroke to whole-letter programming. Children of ages 6 to 9 (N = 98) wrote letters of varying complexity on a digitizer. At ages 6 and 7 movement duration, dysfluency and trajectory increased with stroke number. This indicates that the motor program they activated mainly coded information on stroke production. Stroke number affected the older children's production much less, suggesting that they programmed stroke chunks or the whole letter. The fact that movement duration and dysfluency decreased from ages 6 to 8, and remained stable at ages 8 and 9 suggests that automation of letter writing begins at age 8. Automation seems to require the elaboration of stroke chunks and/or letter-sized motor programs.

1. Introduction

Written language is omnipresent in everyday life. Despite its importance, there are not many studies on the cognitive components of handwriting production. The number of studies is even more limited for developmental research. This is surprising, since children spend at least 55% of their school time in motor tasks that involve writing (McHale & Cermak, 1992). The present study intends to gain more understanding on the psychomotor processes that lead the children – through practice – to the automation of grapho-motor production (Auzias & de Ajuriaguerra, 1986). During writing acquisition, children learn to follow a series of rules for letter production. It is a sort of "grammar of action" (Goodnow & Levine, 1973) that specifies where to start writing, in what direction to produce the movements and where to stop them. At the beginning of the learning processes, the application of these rules during letter production involves a strong cognitive load. Writing automation is achieved when this load decreases and letter writing becomes an instrument for communication. In other words, automation appears when the cognitive resources can be allocated to the other components of writing, namely spelling, sentence construction and text elaboration (Berninger & Winn, 2006; Hayes, 2012; Maggio, Lété, Chenu, Jisa, & Fayol, 2011; Pontart et al., 2013). The aim of this study was to deepen our understanding on how the cognitive load decreases with practice and letter writing becomes automatic. We investigated an aspect of writing automation that is related to the way motor information is coded and stored in long-term memory.

Handwriting derives from the intention of communicating in written language. It is a voluntary movement with a clearly specified goal. It requires two major phases. The first concerns motor planning which determines the temporal organization of action. It defines the hierarchy of the different sequences that lead to the goal of the action (Mazeau & Pouhet, 2014). The second phase is movement programming, which refers to the adjustments (size, amplitude, pressure, etc.) that the action requires in a given environment. This research focused on the elaboration of motor programs for letter production. A motor program is a sort of sensori-motor map that codes information on letter shape, the strokes that are needed for producing it and the direction of these strokes. Keele (1968) defined it as "a set of muscle commands that are structured before a movement sequence begins and that allows the entire sequence to be carried out uninfluenced by peripheral feedback." (p. 387). So a motor program is a procedural memory that stocks a chronologically and spatially organized motor sequence. It is activated each time an individual has to produce a letter. The activation of a motor program precedes movement production, irrespective of context and effector (Graham & Weintraub, 1996; van Galen & Teulings, 1983). At the beginning of writing acquisition, the children write letters stroke-by-stroke. With practice, they put the strokes together and writing becomes faster and smoother. In adult-like writing, each letter is represented as a single motor program irrespective of the number of strokes it is made up of (Teulings, Thomassen, & van Galen, 1983; van Galen, Smyth, Meulenbroek, & Hylkema, 1989). So the size of a motor program evolves from a stroke to a whole letter. How does this serial stroke-by-stroke pattern of activation become a global activation of the whole letter?

* Corresponding author at: Univ. Grenoble Alpes, GIPSA-lab (CNRS 5216), 11 rue des Mathématiques - Grenoble Campus BP46, 38402 Saint Martin d'Hères - Cedex, France.
E-mail address: Sonia.Kandel@univ-grenoble-alpes.fr (S. Kandel).

https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2017.12.001
Received 21 June 2017; Received in revised form 8 November 2017; Accepted 3 December 2017
Available online 09 December 2017
0001-6918/ © 2017 Elsevier B.V. All rights reserved.

1.1. Motor development for letter writing

Motor development for letter writing is a long process that takes place during the first years of elementary school (Chartrel & Vinter, 2004). Letter writing is achieved by learning rules that define manual actions on a writing instrument. Studies on general motor learning during the writing acquisition period shed some light into the understanding of how the children elaborate motor programs through practice. As Halsband and Lange (2006) point out, motor learning is both explicit and implicit. At the beginning, the movements are under explicit motor control. The elaboration of motor programs for letter production starts when the teachers explicitly tell the children how to proceed to produce them. Teachers define a "grammar of action" that guides the children on where to start writing and the path they should follow to write a given letter (Bara & Bonneton-Botte, 2015; Bruner, 1971; Goodnow & Levine, 1973). Goodnow and Levine (1973) defined seven hierarchical rules like "start at a leftmost and topmost point", "draw horizontal lines from left to right and vertical lines from top to bottom". Hence, the rules essentially specify onset and offset points to produce a geometrical model as well as stroke order and direction.

When the children follow the path the teachers instruct them, they are creating a link between sensory stimulation and a specific motor pattern (Wolpert, Ghahramani, & Jordan, 1995). They have to test or explore which movements produce the "best" letter shapes. The quality of the shape refers to its similarity with the model the teacher provided. The children proceed by trial and error learning. They have to generate a movement sequence that needs to be coded as a procedural memory. It integrates the best sensory-motor link. The elaboration of sensory-motor links is done in three stages. The stimulus is processed via sensory receptors. Then, the output is transmitted to the brain, which in turn interprets them to generate motor commands. The latter are transmitted to specific muscles that produce the motor output. This kind of motor learning is explicit in the sense that learning is the result of a *conscious* process that intentionally aims at creating this link. There are several types of sensori-motor links: Hand-eye coordination is necessary to make sure that the target has been reached; visuo-motor integration is involved in the adjustment of the movements to the location of the target; the fine motor skills of the hand control the dexterity required to hold the pen; and kinesthetic feedback is essential to verify that the correct movement has been produced. This multiplicity of sensori-motor links contributes to the construction and stabilization of the motor programs that will be activated for letter production. Poor writers often have deficient sensori-motor links (Bairstow & Laszlo, 1981; Cornhill & Case-Smith, 1996). At the beginning, the generation of these sensory-motor associations is extremely demanding in attentional processes (e.g., Atkinson, 1989; Petersen, Corbetta, Miezin, & Shulman, 1994; Shadmehr & Mussa-Ivaldi, 1994) and working memory (Deiber et al., 1997). This is difficult and time consuming, but is the basis for establishing the associations between letter shapes and the movement sequences required for writing them. Visuo-haptic exploration also participates to the generation of the sensori-motor maps (Bara, Fredembach, & Gentaz, 2010; James, 2010; James & Engelhardt, 2012). The children must select which sensory-motor link is the best for a given letter and decide to execute it. The execution is very demanding because the child has to keep the sensory-motor link active throughout the production and simultaneously process the resulting visual and kinesthetic feedback. This explains why at this stage the writing movements are extremely slow, visuo-motor coordination is difficult and the resulting shapes do not always mirror the model (e.g., Mojet, 1991; Wann, Wing, & Søvik, 1991). The processing of this feedback imposes a strong cognitive load that has an impact on movement accuracy and speed (Laszlo & Bairstow, 1984, 1985; Laszlo & Broderick, 1991; Meulenbroek & van Galen, 1986, 1988a; Søvik, 1974).

Through practice, motor learning will become progressively more implicit. Motor production will require less control and sensory feedback. When a motor sequence is completely learned and requires no explicit motor control at all, we can assume that the production is automatic. The storage in long-term memory of more and more accurate sensory-motor links allows the children to produce letters with less sensory control and intentionality (Meulenbroek & van Galen, 1986, 1988a, 1989). Movement control will improve to render the writing gestures fast, accurate and automatic. Automation is therefore linked to implicit motor learning of progressively more complex sensory-motor associations (Halsband & Lange, 2006). The improvement of motor control internalizes the sensory-motor links as learned actions. These sensory-motor links or maps refer to the same kind of concept writing researchers call a "motor program".

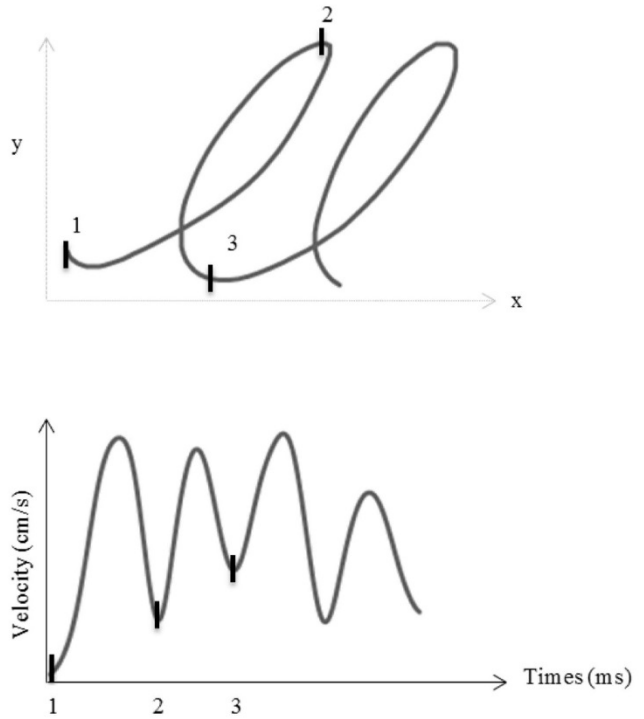

Fig. 1. Illustration of the concept of stroke. Example of segmentation of the first *l* of an *ll* motor sequence produced by an adult. Upper part: Stroke trajectory segmentation on the basis of geometric criteria (xy coordinates). Lower part: Velocity profile (tangential velocity as a function of time) and stroke segmentation on the basis of kinematic criteria (velocity minimum values).

1.2. Motor programs for letter writing

Learning to write a letter requires the memorization of a motor sequence in a given order. At the beginning of the acquisition process the children learn to produce strokes. A stroke is a motor sequence that is limited by two tangential velocity minima at maximum curvature (Meulenbroek & van Galen, 1990). Fig. 1 presents an example of how we segmented the strokes of letter *l*.

To write a letter the children generate it stroke by stroke. With practice and neuro-motor maturation, each letter becomes a sequence of strokes that is represented in long-term memory (Halsband & Lange, 2006). Automation is achieved when the representation has enough geometric and kinematic information to produce the letter with a fast, ballistic and smooth movement. In other words, automation occurs when the representation is "stable". Stability allows for fast retrieval, motor planning and writing execution. Schmidt (1975) called this kind of representation a motor "schema". Since this view of motor control was somehow restrictive, the concept evolved. Halsband and Lange (2006) called it a sensory-motor map. Several studies refer to it as a "motor program". A motor program is defined as "an abstract representation of movement that centrally organizes and controls the

many degrees of freedom involved in performing an action" (Schmidt & Lee, 2005; p. 182).

In handwriting research, the *size* of the motor program that allows for letter production was a matter of debate for a certain period (Portier, van Galen, & Meulenbroek, 1990). Several studies examined whether the basic motor sequence of motor production in writing were strokes, groups of strokes, letters or words (Teulings et al., 1983; van Galen et al., 1989). Adult experimental data indicated that a motor program in handwriting is a representation that codes spatial information on the specific shape of the letter as well as kinematic information on stroke order and direction. Indeed, the number of strokes of the first letter of a sequence of letters did not affect the timing of the motor preparation phase (i.e., latency). This led the authors to conclude that the letter was the unit of motor production in handwriting. Other studies confirmed this idea and it is widely admitted that a motor program encodes information on a whole letter (see Van Mier, Hulstijn, & Petersen, 1993). Van Galen and Teulings (1983) suggested three stages for adult – i.e., automatic – letter production. The first step to produce a letter requires that we activate its motor program. The second level involves the setting of the parameters of the movement sequence according to specific local constraints. We have to adapt our movements to the context in which we have to write the letter (e.g., size, force, etc.). Then, we select the muscular structures that will execute the movement. This process was described more thoroughly in van Galen's (1991) psychomotor theory of handwriting production. The question we examine in the present study is how the children elaborate the motor programs for producing letters in an automatic and stable fashion.

To our knowledge, the question on how motor programs evolve from stroke coding to whole letter coding has not been addressed directly by empirical research. The studies we will describe in the following paragraphs aimed at understanding the impact of sensory feedback on letter production. However, we can also interpret them from a "motor programming" perspective. Meulenbroek and van Galen (1988a) conducted a study in which 8 to 12 year old children had to write isolated letters on a digitizer. The children were instructed to write the letters as fast as they could. They observed that writing duration decreased with age and became stable between ages 11 and 12. Other kinematic aspects did not follow however the same kind of evolution. Mean velocity and maximal speed decreased from ages 8 to 9 and then increased until age 12. Movement fluency also followed this pattern of results. The authors accounted for this "performance decline" around 9 years old as a period in which feedback strategies change. They posited that the younger children essentially used ballistic strategies in which movement control was proactive. They had difficulties in controlling their movements, especially the ones requiring fine motor control such as letter writing. When producing ballistic movements, feedback is only possible when the movement is finished. At around 8 years old, the children would change these movement strategies because a purely ballistic control decreases movement accuracy. The children would change to a more sensory oriented movement production that would permanently be guided by visual and kinesthetic feedback. This accounts for the discontinuous pattern of the kinematic results. Then at age 9, ballistic strategies would reappear so the involvement of sensory feedback can decrease. From a "motor programming" perspective, it is likely that the discontinuity also reveals changes in the size of the processing unit: from a ballistic stroke-by-stroke strategy to a letter sized program that requires less feedback. In another study, children of the same age had to produce two-letter sequences (Meulenbroek & van Galen, 1989). They compared stroke production within a letter and between the two letters. The interesting point is that duration and dysfluency decreased with age in a continuous fashion for within letter strokes. The connection strokes between letters –i.e., the strokes that do not belong to a letter-sized motor program– did exhibit a discontinuous pattern. Furthermore, connection strokes were slower, had longer trajectories and were more dysfluent than within-letter strokes. The authors concluded that motor programming for within and between-letter strokes was different.

An experiment involving more complex productions, like pseudo-word writing, did not confirm however, the performance decline at ages 8–9 (Mojet, 1991). This research was conducted with more than 200 children from 1st to 6th grade and provided information on 13 measures. The results indicated that most of the measures evolved until age 8 and then started to become stable at age 10: writing speed increased and pausing time decreased from ages 7 to 8 and stabilized at age 10; movement duration, trajectory and dysfluency also decreased from ages 7 to 9 and stabilized at age 10. Another study conducted by Zesiger, Mounoud, and Hauert (1993) with 8 to 12 year olds and adults confirmed the pattern of results presented by Mojet (1991) with word and pseudo-word production. The most important quantitative increases were observed for the younger children and took place during the first years of the writing acquisition process. Age 9 appears to be the point at which the performance stops evolving in a linear fashion. In other words, stabilization – i.e., automation for letter production – seems to start around this period.

Other more recent experiments conducted with children of ages 8 through 10 also found a stabilization of the kinematic measures around age 9. Kandel and Perret (2015a) investigated the development of motor anticipation which is an important component of writing automation. It refers to the ability to anticipate the production of the following letter sequences. They instructed the children to produce two-letter sequences. They examined the anticipation of the spatio-temporal parameters of the second letter while producing the first one (e.g., processing changes in size like *ll* vs. *le* and rotation direction like *le* vs. ln). They observed that motor anticipation started at around age 9. In particular, duration, dysfluency and trajectory increased from ages 8 to 9 and then remained stable from 9 to 10. This pattern of results was also observed for letter production in word writing (Kandel & Perret, 2015b). It is noteworthy that none of the studies mentioned above provided data beyond age 12, so we do not know exactly when, in adolescence, the spatial and kinematic measures further evolve and become adult-like. Finally, and critical for the purpose of the present study, these results could also be interpreted as revealing an increase in the size of the motor program. For the younger children, the letters would be written stroke-by-stroke, as a collection of small motor sequences. These fine-grained motor sequences could be chunked together with practice. Their size would increase progressively until they reach the size of the whole letter, at around age 9. The present research examined this hypothesis.

In this perspective, at the beginning of writing acquisition, letters with many strokes should constitute stronger cognitive loads than letters with fewer strokes. To write a stroke the children have to process simultaneously several kinds of information such as size, direction, force, pressure as well as visual and kinesthetic feedback during movement execution. Also, the information has to be kept in working memory, which has a limited capacity. The cognitive load results from the difficulty to deal with all this information (Sweller, van Merrienboer, & Paas, 1998). It overloads the memory capacities. This renders the writing movements very slow. With practice, some of this information is stocked in long term memory as sensori-motor maps that contain procedural and spatial information. The cognitive load decreases and movement speed increases. This leaves cognitive resources the possibility of processing simultaneously information on more than one stroke. Progressively, the children will add up the strokes such that the sensori-motor maps contain the whole motor sequence to produce a given letter. This will lead to the elaboration of a motor program for each letter. The motor program will contain information on letter shape, size, stroke direction and order. It will be activated from long term memory each time the child has to write a letter. Therefore, the number of strokes of a given letter should no longer determine the cognitive load for movement execution. Writing automation will be achieved when letter production is no longer a cognitive load and letter

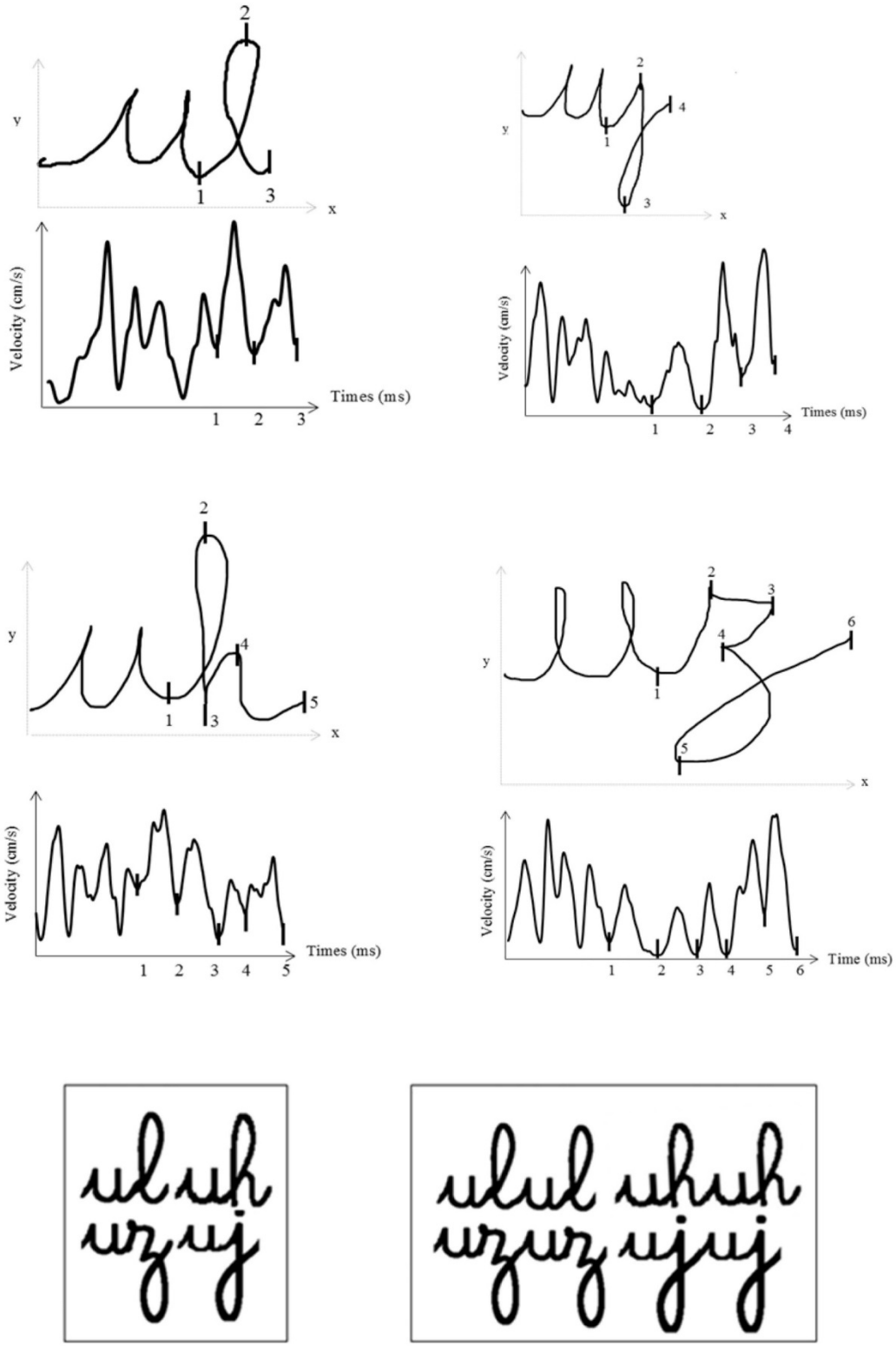

Fig. 2. Upper part: Example of productions and their corresponding velocity profiles. Illustration of the stroke segmentation for each target letter. Lower part: Letter sequences used as stimuli.

writing becomes an instrument for communication.

The studies presented in the previous paragraphs indicated that writing velocity and fluency increased progressively until movement control reached stability and therefore automaticity. Our study examined how children achieve automation. We hypothesized that one of the reasons why speed and fluency increase is because the size of the letters' motor program increases. At the beginning, the children would write letters stroke-by-stroke. Letter production would result from the sum of several strokes put together. With practice, strokes would be associated and constitute bigger stroke chunks (Miller, 1956). Then, the

children would elaborate a motor program for each letter, with information on its shape, stroke order and direction (Meulenbroek & van Galen, 1986). The aim of the present study was to investigate whether letter writing evolves from stroke-by-stroke to whole letter programming. Children of ages 6 to 9 wrote cursive letters of varying complexity on a digitizer. Letter complexity referred to increases in number of strokes: *l* = 2 strokes, *j* = 3 strokes, *h* = 4 strokes, *z* = 5 strokes (see Fig. 2 for examples of these letters written in cursive writing). We measured movement duration, trajectory, number of velocity peaks and mean velocity as indicators of the cognitive load involved in motor production. We predicted that the impact of letter complexity should decrease with age. If the younger children produce letters as a collection of strokes, the cognitive load should increase as a function of the number of strokes in the letter. Likewise, if the older children put the strokes together into one motor sequence of the whole letter then the cognitive load should not be affected by an increase in the number of strokes.

2. Method

2.1. Participants

98 children participated in the experiment. There were 26 children of age 6 (6;6, SD = 3.5) attending 1st grade, 26 children of age 7 (7;9, SD = 3.6) attending 2nd grade, 21 children of age 8 (8;9, SD = 3.2) attending the 3rd grade and 28 children of age 9 (9;8, SD = 5.7) attending 4th grade. They were right-handed and native French-speakers. They attended an Elementary School in the Grenoble urban area. The school year started in September and the experiment was conducted in March. Reading and writing explicit instruction started in 1st grade (the children were around 6 years old). Before age 6 grapho-motor production is mainly oriented towards drawing movements. At age 5 the children become familiar with cursive writing, but do not learn formally how to write. None of the participants were repeating or skipping a grade. They were attending their grade at the regular age. They had normal or corrected-to-normal vision. The parents and teachers reported no hearing impairments, learning disability, brain or behavioral problems. School attendance was regular. They participated in the experiment under parental written consent. The study received approval by the Grenoble ethical committee (CERNI 2015-11-10-75).

2.2. Material

We conducted a preliminary study with adults (*n* = 25) to determine the number of strokes of each cursive letter of the alphabet written in lower-case and isolation. They had to write the letters, one by one, on a digitizer (Wacom Intuos 3 – A5, sampling frequency 200 Hz, accuracy 0.02 mm). Letter presentation and movement analysis were controlled by *Ductus* (Guinet & Kandel, 2010). We segmented each letter into strokes (see Fig. 1). We located the lowest or highest value on the y axis and the closest tangential velocity minimum to determine the beginning and end of each stroke. The highest or lowest coordinates on the y axis generally determine the point of maximal curvature of the path. They correspond to a change of direction. Fig. 1 shows the example of the production of an *l* produced by an adult. This letter is composed of two strokes. The first stroke is an upstroke in which the velocity peak is followed by a minimal velocity value. This corresponds to the highest point on the y axis and location of maximal curvature. The second stroke is a downstroke in which the velocity peak is followed by a minimal velocity value. This corresponds to the lowest point on the y axis and the point that determines the end of letter *l* and the beginning of the following letter. We then counted the number of strokes for each letter and noted the most frequent stroke number (see Appendix A).

On the basis of this information, we selected letters of increasing stroke numbers: *l* = 2 strokes, *j* = 3 strokes, *h* = 4 strokes and *z* = 5 strokes. Handwriting instruction rules in French schools stipulate that connecting strokes are also components of the letter (Direction générale de l'enseignement scolaire, 2013). Thus, the first up-stroke of letters *j* and *z* were counted as strokes. Fig. 2 shows examples of the stroke segmentation we did for each target letter. We will call these letters the "target letters". Letter *l* was produced with two strokes by 24 out of 25 participants. Letter *j* was produced with 3 strokes (in air movement to produce the dot not included) by 23/25 participants. Letter *h* was produced with 4 strokes by 21/25 participants. Letter *z* was produced with 5 strokes by 14/25 participants. It is noteworthy that the frequency of occurrence of letter *z* in French texts (0.46%) is lower than *y* (0.72%; New, Pallier, Ferrand, & Matos, 2001). Nevertheless, at school, during the period between ages 6 to 9, the frequency of occurrence of *z* is very high. The children write many *z*s when they learn to conjugate verbs. All French verbs include a *z* in the second person plural. To render the number of strokes condition equivalent, we decided to choose letters that contained a loop so we could control the size of the letters. We also chose letters whose onset was located at the baseline so the production of all the letters started at the same point. For these reasons, we could only choose one letter per condition. For example, in the 2-stroke condition, the only letter apart from *l* was *c*, but the latter does not contain a loop. We used letter *u* as context to elaborate the two- and four-letter sequences the children would have to write. There were several reasons why we chose letter *u*. Since the target letters were consonants we needed to choose a vowel so the two- and four-letter sequences could be "word-like". Among the five vowels, only *e* and *u* are the simplest to produce. We excluded *e* because it is like a small *l*; which was one of our target letters. The shape of the two letters is almost the same and there is only a size difference. Also, Mojet's (1991) study with a very large population of children showed that the movements to produce discontinuous garlands –like the ones in letter *u*- were the easiest to produce.

3. Procedure

The children wrote each target letter four times: in isolation (*l*, *j*, *h*, *z*), embedded in two-letter sequences (*ul*, *uj*, *uh*, *uz*) and four-letter sequences (*ulul*, *ujuj*, *uhuh*, *uzuz*). The presentation of the letters was controlled by *Ductus* (Guinet & Kandel, 2010). A fixation point preceded the presentations during 1500 ms. Then, each sequence was presented in front of the child, on the center of the screen of a laptop. The child's task was to write the letters on a paper that was stuck to the digitizer. The children had to write the letters as they usually do in class; i.e., in cursive handwriting. They had to write with a special pen (Intuos Inking Pen) on lined paper with landscape format. The paper was similar to the notebook paper the children use to write when they are in school (spacing between lines = 2.5 mm; horizontal limit = 1.5 cm for isolated letters and 5 cm for two- and four-letter sequences). The letters remained on the screen until the child finished writing them. The children became familiar with the material by writing their name. We instructed them to start writing as soon as they could. There were no time limits or speed constraints during writing. The experimenter clicked on a button to start the following trial. The sequences were presented randomly across participants. The children were tested individually in a quiet room inside the school. The experiment lasted 10 to 15 min.

3.1. Data processing and analysis

The data were smoothed with a Finite Impulse Response filter (Rabiner & Gold, 1975) with a 12-Hz cutoff frequency. For isolated letters, letter onset corresponded to pressure > 0 and the end to pressure = 0. In the two- and four-letter sequences, the beginning of the target letter was the tangential velocity minimum that followed the last stroke of the *u* (see Fig. 3).

For the two-letter sequences, the end of the target letter

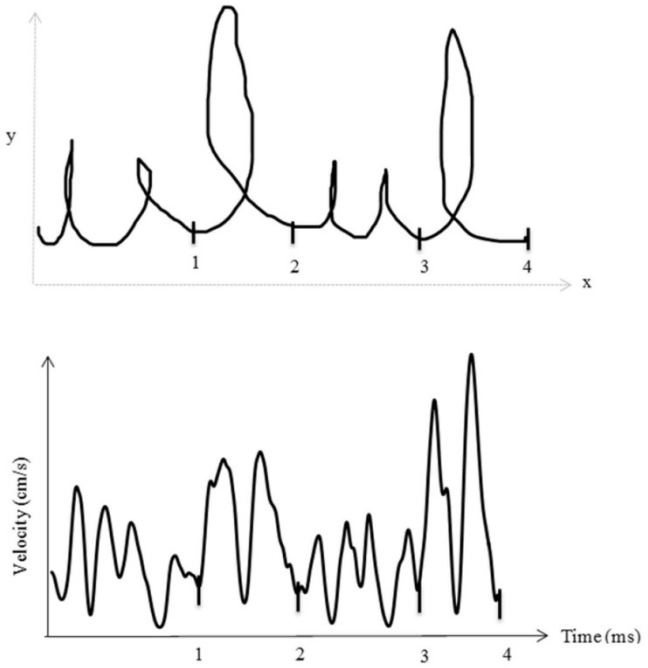

Fig. 3. Letter segmentation procedure of the children's production. The onset of the first target letter *l* corresponded to the tangential velocity minimum (1) after the last stroke of the *u*. The end of the first target letter corresponded to the tangential velocity minimum (2) of its last stroke. The onset of the second target letter *l* corresponded to the tangential velocity minimum (3) after the last stroke of the second *u*. The end of the second target letter corresponded to pressure = 0 (4).

corresponded to pressure = 0. For the four-letter sequences, the end of the first target letter corresponded to the tangential velocity minimum of the last stroke. For the second target letter of the four-letter sequences, the beginning of the target letter was the tangential velocity minimum that followed the last stroke of the *u*. The end corresponded to pressure = 0. When the tangential velocity minimum was impossible to locate, we used the lowest value in y axis as segmentation reference. Once we isolated the target letters we analyzed three measures. The variability of these measures is an indicator of the cognitive load involved in motor program retrieval, movement programming and execution. Letter duration concerned the time (ms) the children took to write each letter. The number of absolute velocity peaks observed for each letter reflects movement fluency (Meulenbroek & van Galen, 1989). Smooth movements have less velocity peaks than dysfluent ones. Trajectory (cm) refers to the length of the pen tip path on the surface of the digitizer to produce the target letter. Velocity refers to the ratio between the trajectory and time (cm/s).

We recorded 1568 data points for each measure. There were 14 productions that were unexploitable so we excluded them from the analysis (0.08% of the data). There were also 22 outliers in the trajectory data that exceeded three standard deviations from the mean (1.4% of the data). For the statistical analysis, we did a logarithmic transformation on the duration and trajectory data. We then conducted a mixed linear model with the lme4 package provided by R (version RStudio, Bates, Maechler, & Bolker, 2011). The selection of the model resulted from a backward selection based on the elimination of non-significant terms using the package lmerTest (Kenward & Roger, 1997). For the analysis of the number of velocity peaks, we conducted a negative binomial regression with number of velocity peaks as random effect. The reason for doing this kind of analysis instead of the mixed linear model is that this variable is a count variable with over-dispersion. We conducted a forward selection based on the likelihood ratio test. The model included three fixed-effect factors: Age (Bates et al., 2011; Berninger & Winn, 2006; Bruner, 1971; Chartrel & Vinter, 2004),

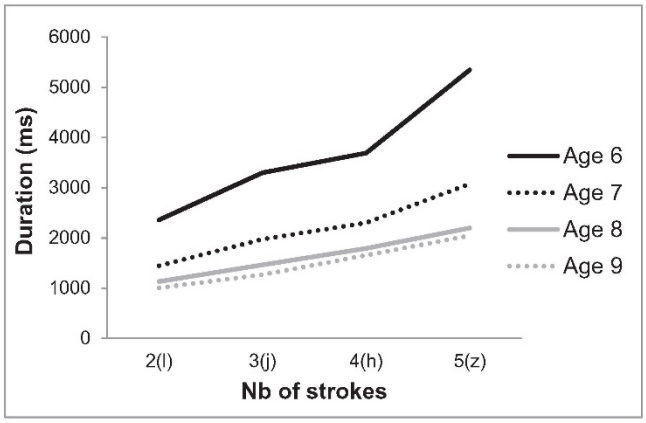

Fig. 4. Mean letter durations for each age (6, 7, 8, 9) as a function of the number of strokes of the target letter (2, 3, 4, 5).

Letter Context (isolated, 2 letter-sequence, position 2 in the 4 letter-sequence, position 4 in the 4 letter-sequence, Stroke number (2 strokes (l), 3 strokes (j), 4 strokes (h) and 5 strokes (z)). Participants were considered as a random effect factor. Multiple comparisons were conducted following the method presented by Hothorn, Bretz, and Westfall (2008). We report the significant differences. To get insight into the impact of the learning process on stroke chunking, we calculated the global ratio of the duration of the simplest and more complex letters (2 strokes vs. 5 strokes) for the youngest and oldest children (age 6 vs. age 9). This kind of calculation smooths the growth slope in the Compound Growth Rate (CGR): Ratio = (final value / initial value)^(1/3) − 1. The results refer to the smoothed growth percentage from the initial value (2 strokes) to the subsequent values up to the final value (5 strokes). Finally, we carried out principal component analyses (PCA) for each age and target letter (Package FactoMine R, Cornillon et al., 2012).

3.2. Results

3.2.1. Duration

Fig. 4 presents the mean durations for each age as a function of the number of strokes in the target letter. Letter duration decreased with age, $F(3, 94.05) = 69.51$, $p < 0.001$. Letter duration increased as the number of strokes in the target letter increased, $F(3, 1423.18) = 643.29$, $p < 0.001$. The interaction between the two variables was significant, $F(9, 1423.17) = 2.63$, $p < 0.01$. Tables 1 and 2 present the results of the multiple comparisons analyses. Duration varied with context, $F(3, 1423.11) = 67.10$, $p < 0.001$. The interactions Grade ∗ Context and Number of Strokes ∗ Context were significant, $F(9, 1423.11) = 3.01$, $p < 0.001$ and $F(9, 1423.11) = 2.69$, $p < 0.004$, respectively.

The analyses of the duration increases for each age revealed that for the 6 year-old children, there was a 126% duration increase from 2

Table 1
Results of the multiple comparison analyses conducted on the duration data for each age.

	2–3 strokes	3–4 strokes	4–5 strokes
Age 6	$z = 10.39$, $p < 0.001$	$z = 3.72$, $p < 0.05$	$z = -10.32$, $p < 0.001$
Age 7	$z = 8.97$, $p < 0.001$	$z = 4.33$, $p < 0.001$	$z = -8.07$, $p < 0.001$
Age 8	$z = 7.22$, $p < 0.001$	$z = 5.36$, $p < 0.001$	$z = -4.90$, $p < 0.001$
Age 9	$z = 7.39$, $p < 0.001$	$z = 8.25$, $p < 0.001$	$z = -6.43$, $p < 0.001$

Table 2
Results of the multiple comparison analyses conducted on the duration data for each target letter (ns = non-significant).

	2 strokes (l)	3 strokes (j)	4 strokes (h)	5 strokes (z)
Age 6–7	z = 6.13, $p < 0.001$	z = 6.53, $p < 0.001$	z = 6.17, $p < 0.001$	z = 6.98, $p < 0.001$
Age 7–8	ns	z = 3.75, $p < 0.05$	ns	z = 4.47, $p < 0.001$
Age 8–9	ns	ns	ns	ns

stroke-letters to 5 stroke-letters. The Compound Growth Rate (CGR) indicated that there was a mean 31% duration increase per stroke. For the 9 year-old children, there was a 103% duration increase from 2 stroke-letters to 5 stroke-letters. There was a mean 26% duration increase per stroke. Thus, there was a 23% difference in duration increase between the older and younger children.

Furthermore, when we considered stroke number as a continuous variable instead of factor, we observed that the duration increases were different for the younger and older children. The tendency curves that adjusted better to the data were exponential for ages 6 ($R^2 = 0.96$) and 7 ($R^2 = 0.98$). They were linear, instead, for ages 8 ($R^2 = 0.99$) and 9 ($R^2 = 0.99$).

3.2.2. Trajectory

Fig. 5 presents the mean trajectories for each age as a function of the number of strokes in the target letter. Trajectory decreased with age, $F(3, 94.05) = 7.02$, $p < 0.001$. Trajectory increased as the number of strokes in the target letter increased, $F(3, 1423.18) = 287.66$, $p < 0.001$. The interaction between the two variables was significant, $F(9, 1423.17) = 6.85$, $p < 0.001$. Tables 3 and 4 present the results of the multiple comparisons analyses. Trajectory varied with context, $F(3, 1432.11) = 6.15$, $p < 0.001$. The interaction Grade * Context was significant, $F(9, 1432.11) = 2.38$, $p < 0.01$.

Further analyses revealed that for the 6 year-old children, there was a 60% trajectory increase from 2 stroke-letters to 5 stroke-letters. The CGR indicated that there was a mean 16% trajectory increase per stroke. For the 9 year-old children, there was a 55% trajectory increase from 2 stroke-letters to 5 stroke-letters. There was a mean 15% trajectory increase per stroke. Thus, there was a 5% difference in trajectory increase between the younger and older children. We then considered stroke number as a continuous variable instead of factor. The tendency curve that adjusted better to the data was a power regression for age 6 ($R^2 = 0.95$). For the other children the tendency curves were instead polynomial (age 7: $R^2 = 0.99$; age 8: $R^2 = 0.97$; age 9: $R^2 = 0.97$).

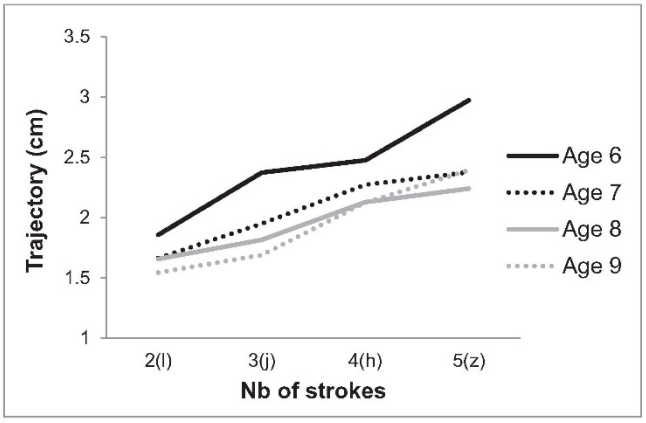

Fig. 5. Mean letter trajectories for each age (6, 7, 8, 9) as a function of the number of strokes in the target letter (2, 3, 4, 5).

Table 3
Results of the multiple comparison analyses conducted on the trajectory data for each age (ns = non-significant).

	2–3 strokes	3–4 strokes	4–5 strokes
Age 6	z = 10.31, $p < 0.001$	ns	z = −6.24, $p < 0.001$
Age 7	z = 5.89, $p < 0.001$	z = 5.25, $p < 0.001$	z = −1.34, $p < 0.001$
Age 8	z = 3.72, $p < 0.05$	z = 6.98, $p < 0.001$	ns
Age 9	z = 4.10, $p < 0.05$	z = 9.68, $p < 0.001$	z = −4.95, $p < 0.001$

Table 4
Results of the multiple comparison analyses conducted on the trajectory data for each target letter (ns = non-significant).

	2 strokes (l)	3 strokes (j)	4 strokes (h)	5 strokes (z)
Age 6–7	ns	z = 3.44, $p < 0.05$	ns	z = 3.80, $p < 0.05$
Age 7–8	ns	ns	ns	ns
Age 8–9	ns	ns	ns	ns

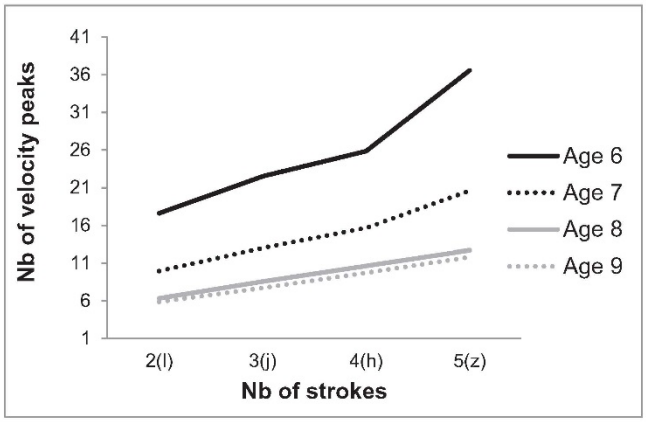

Fig. 6. Mean number of velocity peaks for each age (6, 7, 8, 9) as a function of the number of strokes in the target letter (2, 3, 4, 5).

3.2.3. Dysfluency

Fig. 6 presents the mean number of velocity peaks for each age as a function of the number of strokes in the target letter. Age and Stroke number yielded significant effects, Chisq (Bairstow & Laszlo, 1981) = 110.48, $p < 0.001$ and Chisq (Bairstow & Laszlo, 1981) = 698.46, $p < 0.001$, respectively. The interaction between the two variables did not reach significance ($p = 0.42$). The number of velocity peaks varied with context, Chisq (Bairstow & Laszlo, 1981) = 126.45, $p < 0.001$. The interaction Grade*Context was significant, Chisq (Chartrel & Vinter, 2004) = 31.08, $p < 0.001$.

As we did for duration and trajectory, we analyzed the rate of dysfluency variation. For the 6 year-old children, there was a 107% dysfluency increase from 2 stroke-letters to 5 stroke-letters. The CGR indicated that there was a mean 27% dysfluency increase per stroke. For the 9 year-old children, there was a 101% dysfluency increase from 2 stroke-letters to 5 stroke-letters. There was a mean 26% dysfluency increase per stroke. Thus, there was a 6% difference in dysfluency increase between the younger and older children.

When we considered stroke number as a continuous variable instead of factor, we observed that the number of velocity peak increases were

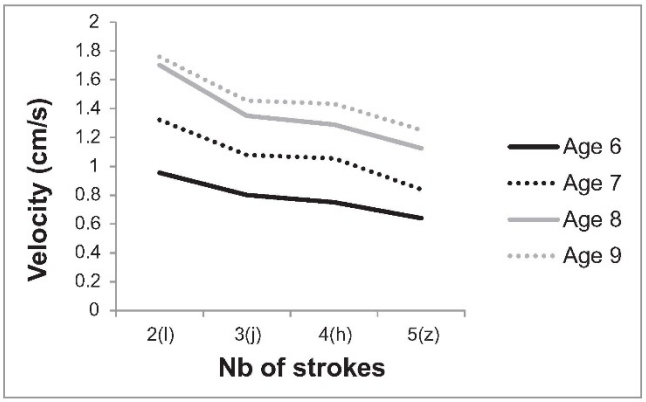

Fig. 7. Mean velocity for each age (6, 7, 8, 9) as a function of the number of strokes in the target letter (2, 3, 4, 5).

also different for the older and younger children. The tendency curves that adjusted better to the data were polynomial for ages 6 ($R^2 = 0.97$) and 7 ($R^2 = 0.99$). They were linear instead for ages 8 ($R^2 = 0.99$) and 9 ($R^2 = 0.99$).

3.2.4. Mean Velocity

Fig. 7 presents the mean velocity for each age as a function of the number of strokes in the target letter. Velocity increased with age, $F(3, 94.05) = 27.97$, $p < 0.001$ and decreased as the number of strokes in the target letter increased, $F(3, 1450.13) = 131.04$, $p < 0.001$. The interaction between the two variables was not significant ($p = 0.08$). Mean velocity varied with context, $F(3, 1450.09) = 41.02$, $p < 0.001$. None of the interactions with context reached significance (Grade * Context, $p = 0.10$, Number of Strokes * Context, $p = 0.14$).

As we did for duration, trajectory and dysfluency, we analyzed the rate of mean velocity variation. For the 6 year-old children, there was a 33% velocity decrease from 2 stroke-letters to 5 stroke-letters. The CGR indicated that there was a mean 12.5% velocity decrease per stroke. For the 9 year-old children, there was a 28.82% velocity decrease from 2 stroke-letters to 5 stroke-letters. The CGR indicated that there was a mean 10% velocity decrease per stroke. Thus, there was a 4% difference in velocity decrease between the younger and older children from 2 stroke-letters to 5 stroke-letters.

When we considered stroke number as a continuous variable instead of factor, we observed that mean velocity increases were also different for the older and younger children. The tendency curves that adjusted better to the data were logarithmic for age 6 ($R^2 = 0.94$) and power for age 7 ($R^2 = 0.97$). They were polynomial for age 8 ($R^2 = 0.92$) and logarithmic for ages 9 ($R^2 = 0.97$).

3.2.5. Principal components analysis

We conducted principal components analyses on each target letter. Fig. 8 presents the results. In each analysis the duration, number of velocity peaks and trajectory were active quantitative variables; they were standardized and age was a supplementary qualitative variable.

3.2.5.1. Two strokes-letter (l). The analysis revealed that the two main factors represented a projected inertia of 99.28%. The main factor, that we called "Kinematics", had an estimated inertia of 70.32% (eigenvalue = 2.11). It received a strong contribution of duration ($r = 0.97$, $p < 0.001$) and number of velocity peaks ($r = 0.96$, $p < 0.001$). The determination coefficient of the qualitative variable age on axis n°1 was significant ($r = 0.55$, $p < 0.001$). The estimation of the barycenter coordinates for each age indicated that the critical probabilities of the tests for each modality were significant ($p < 0.001$) for ages 6, 8 and 9 and non-significant for age 7 ($p = 0.79$). The second factor, that we called "Spatial", had an estimated inertia of 28.97% (eigenvalue = 0.87) and received a strong contribution of the trajectory variable ($r = 0.88$, $p < 0.001$). The determination coefficient of the qualitative variable age on axis n°2 was not significant ($r = 0.01$, $p = 0.79$). The estimation of the barycenter coordinates for each age on axis n°2 indicated that the critical probabilities of the tests for each modality were not significant: age 6 ($p = 0.78$), age 7 ($p = 0.84$), age 8 ($p = 0.32$) and age 9 ($p = 0.56$).

3.2.5.2. Three strokes-letter (j). The two main factors represented a projected inertia of 99.18%. The Kinematics factor had an estimated inertia of 79% (eigenvalue = 2.37). It received a strong contribution of duration ($r = 0.96$, $p < 0.001$) and number of velocity peaks ($r = 0.94$, $p < 0.001$). The determination coefficient of the qualitative variable age on axis n°1 was significant ($r = 0.64$, $p < 0.001$). The estimation of the barycenter coordinates for each age indicated that the critical probabilities of the tests for each modality were significant ($p < 0.001$) for ages 6, 8 and 9 and non-significant for age 7 ($p = 0.94$). The Spatial factor had an estimated inertia 20.18% (eigenvalue = 0.61) and received a strong contribution of the trajectory variable ($r = 0.68$, $p < 0.001$). The determination coefficient of the qualitative variable age on axis n°2 was not significant ($r = 0.01$, $p = 0.72$). The estimation of the barycenter coordinates for each age on axis n°2 indicated that the critical probabilities of the tests for each modality were not significant: age 6 ($p = 0.36$), age 7 ($p = 0.82$), age 8 ($p = 0.33$) and age 9 ($p = 0.93$).

3.2.5.3. Four strokes-letter (h). The two main factors represented a projected inertia of 98.99%. The Kinematics factor had an estimated inertia of 68.45% (eigenvalue = 2.05). It received a strong contribution of duration ($r = 0.97$, $p < 0.001$) and number of velocity peaks ($r = 0.97$, $p < 0.001$). The determination coefficient of the qualitative variable age on axis n°1 was significant ($r = 0.63$, $p < 0.001$). The estimation of the barycenter coordinates for each age indicated that the critical probabilities of the tests for each modality were significant ($p < 0.001$) for ages 6, 8 and 9 and non-significant for age 7 ($p = 0.95$). The Spatial factor had an estimated inertia of 30.54% (eigenvalue = 0.92) and received a strong contribution of the trajectory variable ($r = 0.92$, $p < 0.001$). The determination coefficient of the qualitative variable age on axis n°2 was not significant ($r = 0.004$, $p = 0.95$). The estimation of the barycenter coordinates for each age on axis n°2 indicated that the critical probabilities of the tests for each modality were not significant: age 6 ($p = 0.57$), age 7 ($p = 0.80$), age 8 ($p = 0.93$) and age 9 ($p = 0.83$).

3.2.5.4. Five strokes-letter (z). The two main factors represented a projected inertia of 99.25%. The Kinematics factor had an estimated inertia of 71.42% (eigenvalue = 2.14). It received a strong contribution of duration ($r = 0.97$, $p < 0.001$) and number of velocity peaks ($r = 0.95$, $p < 0.001$). The determination coefficient of the qualitative variable age on axis n°1 was significant ($r = 0.65$, $p < 0.001$). The estimation of the barycenter coordinates for each age indicated that the critical probabilities of the tests for each modality were significant ($p < 0.001$) for ages 6, 8 and 9 and non-significant for age 7 ($p = 0.56$). The Spatial factor had an estimated inertia of 27.83% (eigenvalue = 0.83) and received a strong contribution of the trajectory variable ($r = 0.92$, $p < 0.001$). The determination coefficient of the qualitative variable age on axis n°2 was not significant ($r = 0.02$, $p = 0.95$). The estimation of the barycenter coordinates for each age on axis n°2 indicated that the critical probabilities of the tests for each modality were not significant: age 6 ($p = 0.57$), age 7 ($p = 0.38$), age 8 ($p = 0.90$) and age 9 ($p = 0.19$).

It is noteworthy that the barycenter coordinates for the age variable on Fig. 7 for age 6 were positive on the Kinematics axis and negative for the age 8 and 9 children, irrespective of the number of strokes. For the age 7 group, the values did not differ from 0. The barycenter

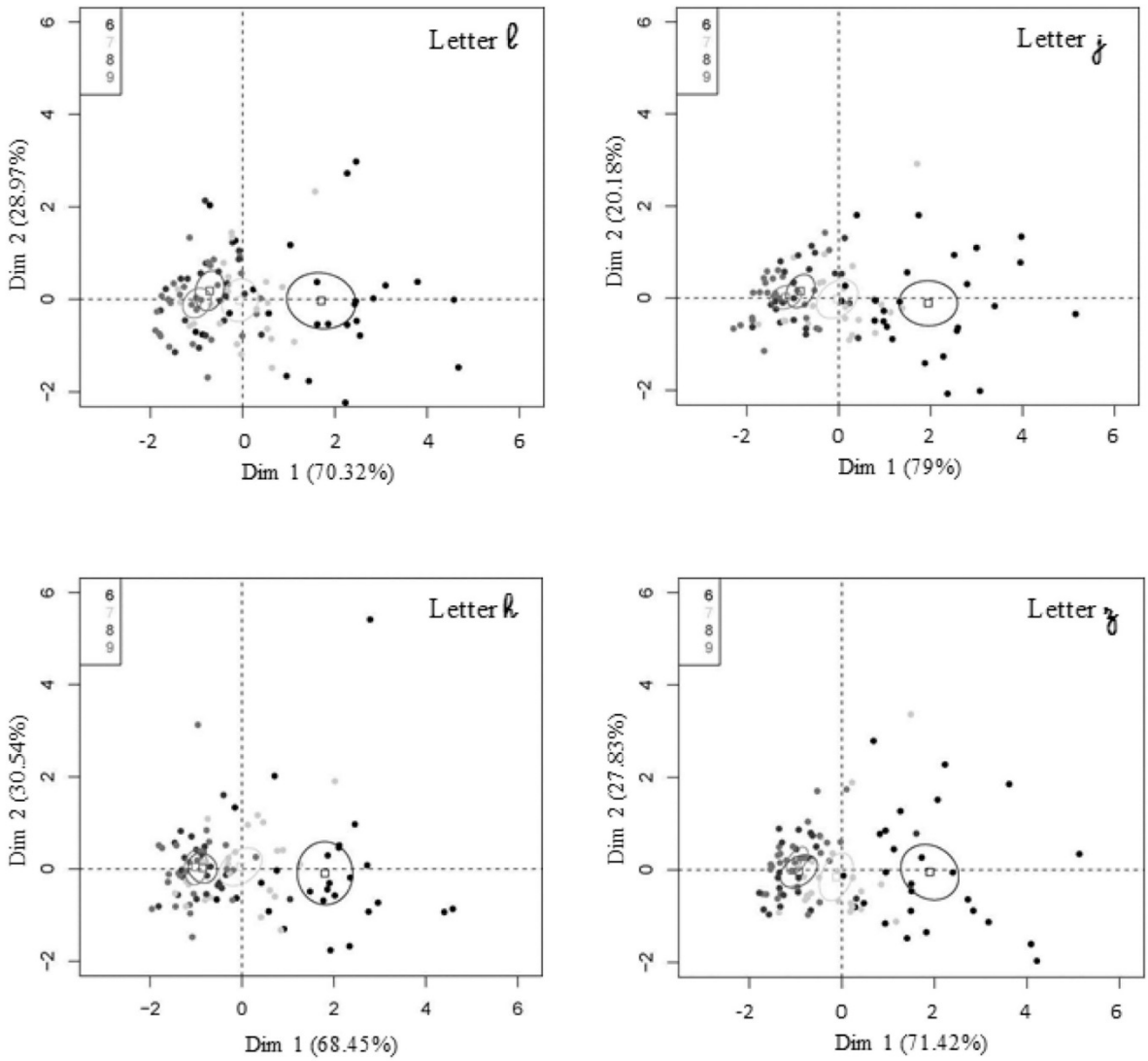

Fig. 8. Principal Component Analysis for each target letter with confidence ellipses for the four age groups (6, 7, 8, 9). Dimension 1 corresponds to the "Kinematics" factor and Dimension 2 corresponds to the "Spatial" factor.

coordinates for the age variable on the Spatial axis did not differ from 0 for any of the four groups, irrespective of the number of strokes.

4. Discussion

The aim of this study was to investigate whether letter writing evolves from a stroke-by-stroke programming strategy to whole letter programming. Children of ages 6 to 9 wrote cursive letters on a digitizer. The letters varied in number of strokes: $l = 2$ strokes, $j = 3$ strokes, $h = 4$ strokes, $z = 5$ strokes. We measured movement duration, trajectory, number of velocity peaks and mean velocity as indicators of the cognitive load involved in motor production. The results indicated a systematic decrease of duration, trajectory, number of velocity peaks measures from ages 6 to 8 and then remained stable from ages 8 to 9. In line with this pattern of results, mean velocity increased from ages 6 to 8 and then remained stable from ages 8 to 9. Age 8 seems to initiate the period of automation for letter writing. The data also revealed that stroke number affected more the younger children's productions than the older ones. This indicates that writing automation may result from a stroke chunking process that renders motor programs letter-sized motor sequences.

The results revealed similar patterns for the movement duration and dysfluency data. These measures decreased progressively from ages 6 to 8. The data for the children of ages 8 and 9 did not yield significant differences. The similarity of the result patterns observed in Figs. 4 and 6 indicates that the 8 and 9 year-olds behaved the same way. They presented different duration and dysfluency patterns than the younger children. This suggests that automation in letter writing begins at age 8 and confirms the findings of previous developmental studies on writing production. Research conducted by Meulenbroek and van Galen (1988a, 1988b, 1989), Mojet (1991), Zesiger et al. (1993) and Kandel and Perret (2015a, 2015b) provided evidence that the children's writing movements become progressively faster and smoother at the beginning of the learning process (from ages 6 through 8). This increase is followed by a period of stabilization that starts at age 8 and extends to age 10.

The data also revealed that at ages 6 and 7 duration and dysfluency increased with letter complexity. For the 8 and 9 year olds, the impact of stroke number was not so pronounced. This pattern of results is very clear for duration. For the dysfluency data, it is difficult to evaluate because the interaction did not reach statistical significance. However, further analyses indicated that the increases with stroke number for the 6 and 7 year-olds were exponential for duration and polynomial for dysfluency. This suggests that the increase in number of strokes has an

exponential impact on duration. For dysfluency, the fluctuation was very important. This could be an indicator that movement control changes are taking place during this period. In contrast, the number of strokes produced linear increases in ages 8 and 9 for both measures. The CGR analyses confirmed these differences between the younger and older children. In particular, the impact of the number of strokes on movement duration was much more pronounced for 6 year-olds than 9 year-olds. The impact difference for duration was of 23%. This constitutes the main contribution of the present study. The impact of stroke complexity on movement duration for the younger children means that each supplementary stroke produced a very significant increase. So it is likely that the motor program the younger children activated mainly contained information on stroke production. Stroke number affected the older children's production much less. It seems as though at age 8 the motor programs for letters begin to assemble strokes into a more coarse-grained motor sequence. This suggests that certain motor sequences were bigger than a stroke and were integrated as such in long term memory. It is thus likely that the information the motor programs they retrieved coded information on stroke chunks or the whole letter. We explained this progression in terms of a decrease of cognitive load, but it is important to consider that it is also dependent on neuro-motor maturation (see Halsband & Lange, 2006 for a review; Marcelli & Cohen, 2012).

The results for mean velocity indicate a progressive increase between ages 6 to 8. There was no increase between ages 8 and 9. Again, the stabilization of this parameter is an indicator of motor automation. Writing speed decreased significantly from the 2 to the 3-stroke condition, irrespective of age. The logarithmic velocity decrease between ages 6 and 9 confirms the idea of a rapid movement control improvement and its stabilization as a function of the number of strokes. For the 7-year-olds, we observed a power trend suggesting that the speed decrease is continuous. The polynomial curve of the 8-year-olds indicates that there were many velocity fluctuations. This is difficult to interpret and requires further investigation. The results of the CGR analysis were also in line with the differences between younger and older children. Indeed, the impact of the number of strokes on speed was stronger for the 6 year-olds than for 9 year-olds. The difference was of 9%.

The results for trajectory were less clear than for duration and dysfluency. Globally, the decrease of the trajectory measure was not progressive. There was a difference between the age 6 children and the rest. Trajectories for the 7, 8 and 9 year olds were equivalent. Also, trajectory increased significantly with letter complexity but the increase differed between the 6 year-olds and all the other groups. At age 6, the increase followed a power regression. This is an indicator of a progressive increase. At age 7 the impact of letter complexity decreased. The number of strokes produced a polynomial pattern of increase. This is an indicator of an important fluctuation of the trajectory, so it is difficult to interpret. This suggests that at age 7 the children already controlled the spatial parameters to produce the letters quite well. This control seems to be equivalent for the children of ages 8 and 9. It reveals that the letter strokes chunk into bigger sequences earlier for spatial than kinematic parameters. This is probably due to the fact that the teachers impose strong geometric constraints on letter writing from the beginning of the acquisition period. The teachers explicitly instruct the children to decrease the size of the letters they produce. For the younger children, the amplitude of their movements is often difficult to control. The result is the production of big letters. With a years' practice – i.e., at age 7 – movement amplitude seems to be controlled. The children integrate enough sensory feedback as to program the spatial coordinates of a given letter (Olivier, 1999). Moreover, in French schools the children use notebooks that have a specific spacing (Seyes type) since 1st grade. This imposes certain spatial constraints that could account for the lack of trajectory increase at age 7.

The context effect was not expected because we did not have the intention of manipulating it. We just used the different contexts to make the task more "school-like" and represent the length variability of French words. We integrated them in the statistical models so the model comparisons would be more precise. The results are not clear. It seems that movement duration and dysfluency were higher for isolated letters than for the other contexts. The children may have felt less constrained by time when producing an isolated letter than a sequence of letters. A study by Chartrel and Vinter (2008) indicated that an instruction to increase speed resulted in a decrease in the number of velocity peaks. Producing 2 and 4-letter sequences probably induced the children to anticipate the following motor sequences (Kandel & Perret, 2015a). This could account for the speed increases observed for letters in position 2 of the 4-letter sequences. There is no coherent explanation for the context effects observed on the trajectory measure. Other experiments manipulating context should be conducted to understand these effects.

The Principal Components Analysis provided further insight into the data. The results are accounted for by two dimensions, namely Kinematic and Spatial. The pattern of results was similar for the four letters, so we will discuss them globally. The most important differences between the groups can be clearly observed on the Kinematic axis. The age 6 children presented a very high dispersion around the barycenter. This means that at this age the variability in the children's productions was extremely important and contrasts with the data of the groups from ages 7 to 9. For these three groups, the heterogeneity in the productions was significantly lower than for the age 6 children. Another interesting point is that 6 year-olds presented a barycenter around + 2 on the Kinematic axis whereas the 8 and 9 year-olds' it was around − 2. The 7 year-olds were in an intermediate position, at around 0. This means that motor control for letter writing improves progressively from ages 6 to 8. Moreover, the ellipses of the 8 and 9 year-olds overlapped for the four letters. This indicates a stability in the data that can be considered as a supplementary indicator of automation for letter writing. The Spatial axis did not yield much variability between the children's productions. As stated above, the children have to deal with strong constraints on spacing and thus on letter size since the beginning of the writing acquisition processes. This could explain the low heterogeneity of the results on the Spatial dimension.

5. Conclusion

The impact of letter complexity was stronger for the younger than the older children. This suggests that at the beginning of writing acquisition, the children code letters stroke-by-stroke. The older children seem to process letters as a whole motor sequence, or at least into motor sequences that are bigger than a stroke. The spatial parameters for letter production are controlled at age 7 whereas the kinematic parameters become stable at age 8. Automation for letter production starts at ages 8–9.

Acknowledgements

We are extremely grateful to the Directrice Académique de l'Education Nationale de l'Isère, school directors and teachers for their precious collaboration in the experimental part of this study. We acknowledge funding from the Agence Nationale de la Recherche (ANR 14-C30-0013-01) attributed to Sonia Kandel.

Appendix A. Number of strokes per lower-case cursive letter produced in isolation by 25 adult participants. Percentage of participants that wrote the letter with the indicated number of strokes

Letter	*a*	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*	*g*	*h*	*i*	*j*	*k*	*l*	*m*	*n*	*o*	*p*	*q*	*r*	*s*	*t*	*u*	*v*	*w*	*x*	*y*	*z*
Nb Strokes	3	4	2	3	3	4	4	4	3	3	5	2	6	4	3	4	3	3	3	4	4	4	6	4	5	5
%	42	80	72	64	64	68	48	76	88	80	76	88	88	71	60	75	48	68	56	63	92	52	50	56	72	58

References

Atkinson, J. (1989). New tests of vision screening and assessment in infants and young children. In J. H. French, S. Harel, & P. Casaer (Eds.). *Child neurology and development disabilities* (pp. 219–227). Baltimore, MD: Paul H. Brookes Publishing.

Auzias, M., & de Ajuriaguerra, J. (1986). Les fonctions culturelles de l'écriture et les conditions de son développement chez l'enfant. *Enfance, 39*(2), 145–167.

Bairstow, P. J., & Laszlo, J. I. (1981). Kinaesthetic sensitivity to passive movements and its relationship to motor development and motor control. *Developmental Medicine and Child Neurology, 23*(6), 606–616.

Bara, F., & Bonneton-Botte, N. (2015). Est-il nécessaire d'enseigner le sens du tracé des lettres en capitales d'imprimerie en maternelle ? *Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant, 27*(139), 583–592.

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*(2), 197.

Bates, D., Maechler, M., & Bolker, B. (2011). *lme4: Linear mixed-effects models using S4 classes.* R package.

Berninger, V. W., & Winn, W. D. (2006). Implications of advancements in brain research and technology for writing development, writing instruction, and educational evolution. In C. MacArthur, S. Graham, & J. Fitzgerald (Eds.). *Handbook of writing research.* New York: Guilford.

Bruner, J. S. (1971). *The relevance of education.* New York: Norton.

Chartrel, E., & Vinter, A. (2004). L'écriture: Une activité longue et complexe à acquérir. *Approche Neuropsychologique de l'Apprentissage chez l'Enfant, 78*, 174–180.

Chartrel, E., & Vinter, A. (2008). The impact of spatio-temporal constraints on cursive letter handwriting in children. *Learning and Instruction, 18*(6), 537–547.

Cornhill, H., & Case-Smith, J. (1996). Factors that relate to good and poor handwriting. *American Journal of Occupational Therapy, 50*(9), 732–739.

Cornillon, P. A., Guyader, A., Husson, F., Jégou, N., Josse, J., Kloareg, M., ... Rouvière, L. (2012). *Statistique avec R* (3e ed). PUR: Rennes.

Deiber, M. P., Wise, S. P., Honda, M., Catalan, M. J., Grafman, J., & Hallett, M. (1997). Frontal and parietal networks for conditional motor learning: A positron emission tomography study. *Journal of Neurophysiology, 78*(2), 977–991.

Direction Générale de l'enseignement scolaire (2013). *Modèles d'écriture scolaire. Documents d'accompagnement. Polices de caractères cursives.* media.eduscol.education.fr. ([En ligne]. Page 22 consultée le 1er septembre 2015). Retrieved from http://media.eduscol.education.fr/file/premier_degre/05/9/Document_accompagnement_polices_de_caracteres_cursives_V2_295059.pdf.

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., & Weintraub, N. (1996). A review of handwriting research: Progress and prospects from 1980 to 1994. *Educational Psychology Review, 8*(1), 7–87.

Guinet, E., & Kandel, S. (2010). Ductus: A software package for the study of handwriting production. *Behavior Research Methods, 42*(1), 326–332.

Halsband, U., & Lange, R. K. (2006). Motor learning in man: A review of functional and clinical studies. *Journal of Physiology, 99*(4–6), 414–424.

Hayes, J. R. (2012). Modeling and remodeling writing. *Written Communication, 29*, 369–388.

Hothorn, T., Bretz, F., & Westfall, P. (2008). Simultaneous inference in general parametric models. *Biometrical Journal, 50*(3), 346–363.

James, K. H. (2010). Sensori-motor experience leads to changes in visual processing in the developing brain. *Developmental Science, 13*(2), 279–288.

James, K. H., & Engelhardt, L. (2012). The effects of handwriting experience on functional brain development in pre-literate children. *Trends in Neuroscience and Education, 1*(1), 32–42.

Kandel, S., & Perret, C. (2015a). How do movements to produce letters become automatic during writing acquisition? Investigating the development of motor anticipation. *International Journal of Behavioral Development, 39*, 113–120.

Kandel, S., & Perret, C. (2015b). How does the interaction between spelling and motor processes build up during writing acquisition? *Cognition, 136*, 325–336.

Keele, S. W. (1968). Movement control in skilled motor performance. *Psychological Bulletin, 70*(6p1), 387.

Kenward, M. G., & Roger, J. H. (1997). Small sample inference for fixed effects from restricted maximum likelihood. *Biometrics, 53*, 983–997.

Laszlo, J. I., & Bairstow, P. J. (1984). Handwriting: Difficulties and possible solutions. *School Psychology International, 5*(4), 207–213.

Laszlo, J. I., & Bairstow, P. J. (1985). *Perceptual-motor behaviour: Developmental assessment and therapy.* London: Holt, Rinehart & Winston.

Laszlo, J. I., & Broderick, P. (1991). Drawing and handwriting difficulties: Reasons for and remediation of dysfunction. In J. P. Wann, A. M. Wing, & N. Søvik (Eds.). *The development of graphic skills* (pp. 259–280). London: Academic Press.

Maggio, S., Lété, B., Chenu, F., Jisa, H., & Fayol, M. (2011). Tracking the mind during writing: Immediacy, delayed, and anticipatory effects on pauses and writing rate. *Reading and Writing, 25*(9), 2131–2151.

Marcelli, D., & Cohen, D. (2012). *Enfance et Psychopathologie* (9e éd). Paris: Masson.

Mazeau, M., & Pouhet, A. (2014). *Neuropsychologie et troubles des apprentissages. Du développement typique aux dys* (2nd éd). Paris: Masson.

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: Official Publication of the American Occupational Therapy Association, 46*(10), 898–903.

Meulenbroek, R., & Van Galen, G. (1990). Perceptual-motor complexity of printed and cursive letters. *The Journal of Experimental Education, 58*(2), 95–110. Retrieved from http://www.jstor.org/stable/20151799.

Meulenbroek, R. G., & van Galen, G. P. (1986). Movement analysis of repetitive writing behaviour of first, second and third grade primary school children. *Advances in Psychology, 37*, 71–92.

Meulenbroek, R. G., & van Galen, G. P. (1988a). Foreperiod duration and the analysis of motor stages in a line-drawing task. *Acta Psychologica, 69*(1), 19–34.

Meulenbroek, R. G. J., & van Galen, G. P. (1988b). The acquisition of skilled handwriting: Discontinuous trends in kinematic variables. *Advances in Psychology, 55* (273-28).

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. 105–118). Singapore: World Scientific.

Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review, 101*(2), 343–352.

Mojet, W. (1991). Characteristics of developing handwriting skills in elementary education. In J. Wann, A. Wing, & N. Sovik (Eds.). *Development of graphic skills* (pp. 53–75). London: Academic Press.

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. http://www.lexique.org.

Olivier, I. (1999). Ontogenèse des processus de programmation motrice: le cas des paramètres spatiaux des gestes manuels. In I. Olivier, & H. Ripoll (Eds.). *Développement psychomoteur de l'enfant* (pp. 95–114). Paris: Revue EPS.

Petersen, S. E., Corbetta, M., Miezin, F. M., & Shulman, G. L. (1994). PET studies of parietal involvement in spatial attention: Comparison of different task types. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale, 48*(2), 319.

Pontart, V., Bidet-Ildei, C., Lambert, E., Morisset, P., Flouret, L., & Alamargot, D. (2013). Influence of handwriting skills during spelling in primary and lower secondary grades. *Frontiers in Psychology, 4*, 818.

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.

Rabiner, L. R., & Gold, B. (1975). *Theory and application of digital signal processing.* Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.

Schmidt, R. A., & Lee, T. D. (2005). *Motor control and learning: A behavioral emphasis.* Champaign, IL: Human Kinetics.

Schmidt, R.a. R. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review, 82*(4), 225–260.

Shadmehr, R., & Mussa-Ivaldi, F. A. (1994). Adaptive representation of dynamics during learning of a motor task. *The Journal of Neuroscience, 14*(5), 3208–3224.

Søvik, N. (1974). Developmental trends of visual feedback control in copying and writing performance of children aged 7 through 11 years. *Perceptual and Motor Skills, 39*, 919–930.

Sweller, J., van Merrienboer, J., & Paas, F. (1998). Cognitive architecture and instructional design. *Educational Psychology Review, 10*, 251–296.

Teulings, H.-L., Thomassen, A. J. W. M., & van Galen, G. P. (1983). Preparation of partly precued handwriting movements: The size of movement units in handwriting. *Acta Psychologica, 54*(1–3), 165–177.

Van Galen, G. P. (1991). Handwriting: Issues for a psychomotor theory. *Human Movement Science, 10*, 165–191.

Van Galen, G. P., Smyth, M. M., Meulenbroek, R. G. J., & Hylkema, H. (1989). The role of short-term memory and motor buffer in handwriting under visual and non-visual guidance. In R. Plamondon, C. Y. Suen, & M. L. Simner (Eds.). *Computer recognition and human production of handwriting* (pp. 253–271). London: World Scientific Publications Co Pte Ltd.

Van Galen, G. P., & Teulings, H. L. (1983). The independent monitoring of form and scale

factors in handwriting. *Acta Psychologica, 54*(1–3), 9–22.
Van Mier, H., Hulstijn, W., & Petersen, S. E. (1993). Changes in motor planning during the acquisition of movement patterns in a continuous task. *Acta Psychologica, 82*(1–3), 291–312.
Wann, J., Wing, A. M., & Søvik, N. (Eds.). (1991). *The development of graphic skills*. London: Academic Press.
Wolpert, D. M., Ghahramani, Z., & Jordan, M. I. (1995). An internal model for sensorimotor integration. *Science, 269*(5232), 1880.
Zesiger, P., Mounoud, P., & Hauert, C. A. (1993). Effects of lexicality and trigram frequency on handwriting production in children and adults. *Acta Psychologica, 82*(1), 353–365.

CHAPITRE 6

Étude 2 - Analyse de variabilité de la production des lettres majuscules chez l'adulte

L'objectif de notre travail était d'approfondir nos connaissances sur les processus d'automatisation de l'écriture manuscrite chez l'enfant en âge scolaire. Dans un premier temps, nous avons étudié les processus d'élaboration des programmes moteurs qui permettent la production rapide et fluide de lettres. La deuxième partie de cette thèse doctorale avait pour but de mieux comprendre comment l'enfant parvient à maîtriser deux types de mouvements qui posent beaucoup de difficultés au cours de l'apprentissage de l'écriture : les mouvements de rotation et de pointage. Pour la mise en place expérimentale de ce travail, nous avons dû réaliser une étude préliminaire chez l'adulte pour caractériser les lettres de l'alphabet en termes de nombre de strokes et de mouvements de pointage lorsque l'écriture manuscrite est déjà automatisée. Ce chapitre présente cette étude préliminaire, et dans le chapitre suivant nous exposerons l'expérience qui examine directement les mouvements de rotation et de pointage. Il nous a semblé que la meilleure façon d'étudier ces mouvements devait se faire à travers la production manuscrite de lettres majuscules car ce format augmente le nombre de mouvements de pointage par rapport à l'écriture cursive. De plus, la segmentation de ces lettres est moins ambiguë et donc plus précise. Pour mieux caractériser la production de chaque lettre de l'alphabet en majuscules et pouvoir les manipuler objectivement, nous avons dû déterminer comment elles étaient produites en termes de strokes. Étant donné que les mouvements d'écriture sont variables entre les individus, et parfois même au sein d'un même individu, nous avons tenté de dégager quel était le nombre de strokes et de mouvements en l'air le plus fréquemment produits pour une lettre donnée.

Nous avons ainsi fait une étude descriptive sur la composition des lettres en strokes dans deux types de situations : dans la première nous avons proposé un modèle de lettre majuscule et nous demandions aux participants de le respecter ; dans la deuxième nous avons demandé aux participants d'écrire ces mêmes lettres de façon spontanée, comme ils/elles ont l'habitude de les écrire, sans nécessité de suivre le modèle. Les résultats, que nous présentons dans ce chapitre, ont mis en évidence que les participants adultes ont produit 73% des lettres de l'alphabet –soit 19 sur 26– en suivant des patterns de mouvements similaires. De plus, les instructions de suivi de modèle n'ont pas eu un impact majeur sur la production des lettres. Cela

suggère que la « grammaire de l'action » acquise au cours de la scolarité pour la production des lettres reste relativement présente à l'âge adulte pour la majorité des lettres. Grâce à ces informations sur la fréquence du nombre de strokes et des mouvements en l'air produits pour chaque lettre, nous avons construit un matériel expérimental très contrôlé qui nous a permis d'obtenir des informations précieuses sur le contrôle des mouvements de pointage et de rotation chez l'enfant et que nous présenterons dans le chapitre suivant.

L'ensemble de ce travail sera publié sous la forme d'un chapitre d'ouvrage. La référence bibliographique est la suivante :

Séraphin Thibon, L., Gerber, S. & Kandel, S. (in press). Analyzing variability in upper-case letter production in adults. In C. Perret & T. Olive (eds.). *Writing Words: Theoretical and methodological advances in word production research*. Studies in Writing Series. NL: Brill Editions.

Analyzing variability in upper-case letter production in adults:
A methodological contribution

Laurence Séraphin-Thibon, Silvain Gerber & Sonia Kandel

Université Grenoble Alpes, GIPSA-lab (CNRS UMR 5216), France

Corresponding author:
Sonia Kandel
Université Grenoble Alpes
GIPSA-lab (CNRS UMR 5216)
1180, avenue Centrale – BP 25
38031 Grenoble Cedex 09
France
Phone: +33 476 82 80 09
Email: Sonia.Kandel@gipsa-lab.fr

Abstract

During writing acquisition, children learn to follow a series of rules for letter production. Rules render writing legible because the children have to learn to reproduce a specific geometric model. Also, letters can be produced in many ways. Following rules decreases movement variability because it limits the number of strokes for letter production. When writing automation is achieved however, the child introduces other movement patterns that are easier for him/her to produce. Adult writing is the result of the stabilization through repetition of this personal writing. This implies that adult writing presents similarities but also variability. Variability is one of the major issues in handwriting research. The goal of the present study was to provide an empirical stroke execution reference that specifies the most frequent movement patterns in upper-case letter production. A group of adult participants wrote the alphabet in upper-case letters on a digitizer. They had to write the letters following a model presented on the screen of a computer or "spontaneously" as they usually write them. We measured the number of strokes per letter and distinguished "on surface strokes" from "in air movements". We observed that variability is rather limited since there were 19 letters that were produced, by most participants, with the same number of strokes, irrespective of the experimental instructions. This means that variability essentially concerned 7 letters, which represents 27% of the alphabet. Furthermore, 17 letters were produced without in air movements and 7 letters with one in air movement. Therefore, the "grammar of action" we learn during the writing acquisition period seems to prevail on our production strategies in adulthood.

Key words: handwriting, letters, upper-case, rules, variability

Running title: Analyzing letter production in adults

Analyzing variability in upper-case letter production in adults:
A methodological contribution

Unlike speech acquisition, learning how to write results from formal explicit instruction. Its proficiency requires a long learning period (Chartrel & Vinter, 2004) that is cognitively demanding (Bourdin, & Fayol, 1994; Olive & Kellogg, 2002). The reason why it is so long is that there are many processing levels that must interact to turn an idea into a written text (Hayes, 2012). The children have to learn that to write a text they have to organize ideas into a succession of logical events. There will one or several paragraphs devoted to each event. To produce these paragraphs, the children must understand that they have to generate sentences that convey meaningful statements. The semantic aspects of the sentences will be related to the meaning of each word. The children know how to produce them orally. Learning how to write requires that they acquire knowledge on which letters make up which words. However, knowing the letters is not enough. The children must learn how to produce them. This implies that they need to acquire proficiency in movement execution. The present study focuses on letter production. When the children learn how to write, they are taught rules that will constrain a certain number of parameters for letter production. For example, all vertical lines should be produced from top to bottom. It is like a "grammar of action" (Goodnow & Levine, 1973) that specifies letter shape and determines stroke order and direction. Learning the rules renders letter production "efficient". On one hand, they render writing legible because the children have to learn to reproduce a specific geometric pattern. On the other, letters can be produced in many ways. Following rules decreases movement variability and increases efficiency because it limits the number of strokes for letter production.

At the beginning of the learning processes, the application of these rules during letter production involves a strong cognitive load. Letter writing is time and energy consuming. With practice, the children memorize these rules and the load decreases progressively. This increases movement fluency and speed. When the cognitive load does not constitute an obstacle for movement production, letter writing will become automatic. Cognitive resources will mainly be devoted to other functions of writing (Berninger & Winn, 2006). It becomes an instrument for communication. Automation also implies, however, that the child introduces other movement patterns that are easier for him/her to produce. So, at this time, writing becomes a personal "blend" of geometric and kinematic adjustments to the grammar of action rules. Adult writing is the result of the stabilization through repetition of this personal writing. This implies

that adult writing presents similarities but also variability. Variability is one of the major issues in handwriting research. Most writing studies based their movement time analyses and normalization procedures on a “theoretical” counting of stroke production during letter writing (e.g., Meulenbroek & van Galen, 1990 for cursive lower-case letters) or a limited quantity of data (e.g., Spinelli et al., 2012 for print upper-case letters). The goal of the present study was to provide an empirical stroke execution reference that specifies the most frequent movement patterns in upper-case letter production.

We write to communicate contents and meanings. If we write fast we will be able to transmit more information. We also need to write fast so we do not forget the sentences we planned. These sentences are stored temporarily in working memory. Clumsy writers for example have difficulties in writing long texts because the mechanical aspects of writing consume the cognitive resources that are needed to focus on the orthographic and informational aspects of the paragraph (Graham, Harris & Fink, 2000). Another essential aspect of writing is legibility. We have to write fast, but not too fast, because we have to produce letter shapes that need to be clear enough so they can be read by other people. So, when a child learns to write, he/she needs to consider both aspects. Learning to write efficiently consists of a trade-off between writing speed and legibility. The writing rules or “grammar of action” that are taught at school are the basis to achieve this trade-off. With practice, the child will assimilate all the rules until he/she writes clear and fast enough as to communicate effectively. Once writing automation is achieved writing patterns will become more and more personal (Mojet, 1991).

The aim of this study was to gain understanding on how variable writing becomes when motor production becomes personal. The other goal of this study was to provide an empirical methodological basis for writing experiments that require movement time normalization on the basis of stroke number. Several studies investigating the impact of the linguistic components of writing applied this kind of normalization. For example, Kandel, Peereman, Grosjaques, and Fayol (2011) examined the impact of syllable structure and bigram frequency in adult handwriting. They had to compare movement time for writing French words that differed on these aspects (e.g., VILAIN (naughty) vs. VOLEUR (thief)). The V is the same for both words, so there is no need to normalize, but most of the remaining letters in the words are not the same. The authors had to find a way to compare them. To compare letters that are made up of a different number of strokes (e.g. I in VILAIN has three strokes and O in VOLEUR has 2 strokes), they normalized the letter duration values with respect to the number of strokes per letter. For example, if the durations for I and for O were both 300 ms, the mean stroke durations

were 300/3 = 100 ms and 300/2 = 150, respectively. With this method, they presented adult data indicating that word production is mostly programmed syllable-by-syllable. This writing strategy can by modified if there is a low frequency bigram within the initial syllable.

The normalisation procedure used in Kandel et al. (2011) was described more formally by Spinelli et al. (2012). They presented a table in which they determine the stroke number for each upper-case letter of the alphabet. However, we are not sure that this procedure can be generalized because the data it relied on is rather limited. Indeed, there was only one participant. She was instructed to write ten times each letter in upper-case, one after the other, as she usually writes them. It is also noteworthy that the stroke count Spinelli et al presented concerned writing time. That is, the time when the tip of the pen touched the surface of the digitizer (pressure > 0). They did not consider in air movements (pressure = 0), like the ones we do to change location and write the horizontal line of an A for example (see Figure 1). Noting "in air movements" could be useful, since they add supplementary movement time that is not always considered in handwriting studies. These points may produce biases in movement duration data that could question the theoretical implications of these experiments.

To examine this issue, we conducted an experiment in which the participants wrote the alphabet in upper-case letters on a digitizer. We counted the number of strokes per letter, and distinguished "on surface strokes" from "in air movements". On this basis, we examined the variability of each letter of the alphabet across participants. We also considered the impact of instructing the participants to follow a particular model or letter shape and compared it to a situation of "spontaneous writing".

Method

Participants

There were a total of 42 adult participants (21 participants in the "without model" writing condition and 21 participants in the "with model" writing condition). All the participants were right-handed, had normal or corrected-to-normal vision, and no motor or hearing disorders. They were unaware of the purpose of the experiment. They gave written consent for their participation in the experiment. The study received approval from the CERNI, which is the ethical committee for Cognitive Science experiments in Grenoble.

Material and procedure

The participants had to write the letters of the alphabet in upper-case. Letter presentation and movement analysis were controlled by Ductus (Guinet & Kandel, 2010). We presented the letters in upper-case on the center of a laptop screen. The letters were presented in Calibri font size 72 (e.g., E, T, A, F). We chose this font because we found that it was the font that respected the best handwritten upper-case letter patterns. Some fonts, like "Times New Roman", present wheelbases on the top and bottom of the letters that are not usually done in handwriting. The letters were presented in alphabetic order, by groups of six. They were preceded by a fixation point (500 ms duration). The participants had to write the letters on a paper stuck to a digitizer (Wacom Intuos 3 – A5, sampling frequency 200 Hz, accuracy 0.02 mm). The digitizer was connected to the laptop that monitored the handwriting movements. The participants had to write with a special pen (Intuos Inking Pen) on a 20.5 x 19.5 cm lined paper, landscape format (spacing between lines = 0.7 cm). The participants were instructed to start writing as soon as possible and write the letters four times in upper-case. In one condition, we asked them to write the letters following the shape of the letter presented in the screen ("with model" condition; WM hereafter). In the other condition, we gave no particular instruction and they had to write the upper-case letters "as they usually did" ("without model" condition; WOM hereafter). We tested the participants individually in a quiet room. The experiment lasted approximately 10 minutes.

Data Processing and Analysis

We segmented each letter into strokes. As can be observed in Figure 1, the first stroke for letter A concerned the initial movement (from points 1 to 2), the second stroke referred to the segment between points 2-3, there was an in air movement at points 3-4 and a final stroke from point 4 to 5. We used the definition of "stroke" presented by Teulings (1996): "… when recording the movement of the pen tip during fluent writing the tangential (or absolute) velocity time function will show a sequence of unimodal peaks: the ballistic strokes".

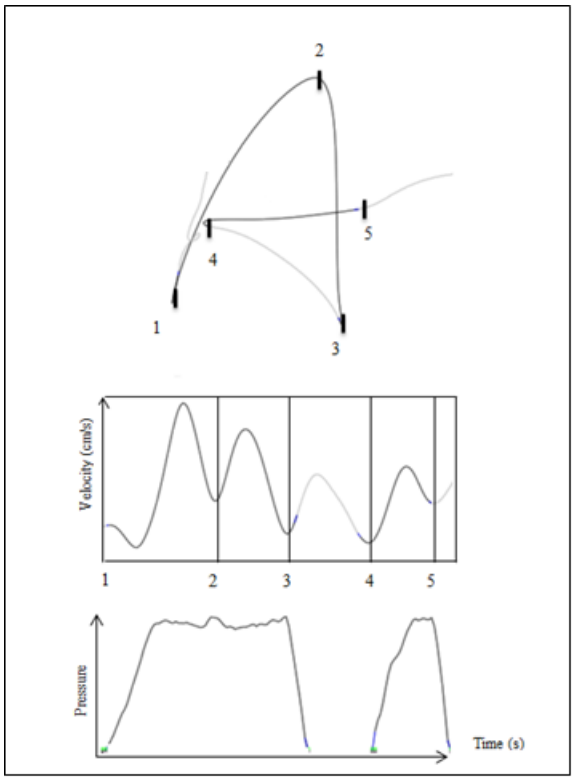

Figure 1. Stroke segmentation procedure. Example of a participant who wrote letter A. The black lines correspond to writing time with ink on the paper (pressure > 0 on the pressure profile). The grey lines are movements that do not touch the surface of the digitizer (pressure = 0 on the pressure profile). The numbers and the corresponding dashes indicate the beginning and end of each stroke. Between 3 and 4 there is an in air movement. Velocity profile: tangential velocity as a function of time. Pressure profile: Pen tip pressure as a function of time.

We counted the number of strokes for each letter in each condition. The number of "in air" movements were counted separately. An "in air" movement refers to a movement within the production of a letter that does not touch the surface of the digitizer (pressure = 0; points 3-4 in Figure 1). The "in air" movements can be monitored because the digitizer detects the pen 6 mm above its surface. The first step of the data analysis consisted in segmenting the letters into strokes. Letter onset corresponded to pressure > 0 after letter presentation. Each stroke corresponded to the movement on the surface of the digitizer between two consecutive velocity minima (Figure 1). Letter end corresponded to pressure = 0 after its last stroke.

We recorded 4368 data points. There were 12 productions that were not exploitable (0.3% of the data) so we excluded them from the analyses. First, we conducted a descriptive analysis to gain understanding on production variability. Then, we conducted statistical analyses to examine whether the instruction to follow a model during writing had an impact on the number of strokes produced. To do so, we compared the distributions of the two conditions (WM vs WOM) for each letter. We considered stroke number as an ordered variable with 7 levels. We conducted an ordered logit regression using the ordinal package and the lsmeans

package, provided by R-software (version 3.0.1). The model included three fixed-effect factors: Condition (with model vs. without model), Letter (the 26 letters of the alphabet) and their interaction. Participants were considered as a random effect. We report the significant differences.

Results and discussion

Number of strokes

Table 1 presents the number of strokes produced for each letter with and without model. There were 7 letters that presented very little variability. They were produced with the same number of strokes in the majority of the observations (> 75% of the productions) in both conditions: L, T, U, V, X were produced with 2 strokes, W with 4 strokes, and Z with 3 strokes. In the "with model" condition, there were 6 other letters for which we observed little variability (> 75%): I = 1 stroke, C and Y = 2 strokes, K, H and S = 3 strokes. In the "without model" condition, these 6 letters presented more variability but they were still rather stable because at least 50% of the observations presented the same number of strokes: C = 1 stroke (39%) or 2 strokes (53%), H = 3 strokes (71%) or 4 strokes (23%), I = 1 stroke (29%) or 3 strokes (67%), K = 3 strokes (57%) or 4 strokes (36%), S = 2 strokes (25%) or 3 strokes (58%), Y = 2 strokes (45%) or 3 strokes (55%).

Table 1. Number of strokes produced for each letter with model (1a) and without model (1b). The numbers indicate the percentage of observations (the highest percentage is in bold).

Table 1a. Letters produced with model.

Nb of strokes (WM)	1	2	3	4	5	6	7
A			**50**	44	5	1	
B			6	13	**54**	26	1
C	11	**85**	4	1			
D		12	**43**	**43**	2		
E		1	23	**70**	1		5
F			**54**	46			
G		7	**60**	31	2		
H			**93**	7			
I	**99**	1	0				
J	25	**73**	2				
K			**88**	12			
L	2	**98**	0				
M			8	**52**	39		
N			36	**64**			
O	1	**62**	29	2	6		
P	2	6	**51**	33	7		
Q		2	**57**	36	5		
R			10	**58**	30	2	
S		15	**81**	4			
T		**93**	7				
U	5	**88**	5	2			
V		**100**	0				
W			1	**99**			
X		**100**	0				
Y		**82**	15	2			
Z			**98**	2			

Table 1b. Letters produced without model.

Nb of strokes (WOM)	1	2	3	4	5	6	7
A			29	**67**	4		
B			8	37	**40**	13	1
C	39	**53**	8				
D		18	**54**	28			
E		7	25	**54**	12	1	
F		5	**52**	42	1		
G	4	23	**48**	21	5		
H		1	**71**	23	5		
I	29	2	**67**	1			
J		32	**65**	2			
K		7	**57**	36	0		
L	11	**89**	0				
M		1	10	**58**	31		
N			39	**61**	0		
O	8	**67**	23	2			
P		18	**61**	20	1		
Q		12	**65**	22	1		
R			14	**70**	1		
S	6	25	**58**	11	0		
T		**100**					
U	6	**83**	8	2			
V		**100**					
W		4	4	**87**	6		
X		**100**					
Y		45	**55**				
Z		4	**76**	20			

The 10 letters that presented some variability (> 50%) in both conditions were: A = 3 strokes WM condition (50%) or 4 strokes WOM condition (67%), E = 4 strokes in WM condition (70%) or 5 strokes WOM condition (54%), F = 3 strokes, J = 2 strokes WM condition (73%) or 3 strokes WOM condition (65%), M = 4 strokes, N = 4 strokes, O = 2 strokes, P = 3 strokes, Q = 3 strokes, R = 4 strokes. In the WM condition, B was produced with 5 strokes in 54% of the observations, whereas in the WOM condition it was very variable (4 strokes (37%)) and 5 strokes (40%)). Likewise, in the WM condition, G was produced with 3 strokes in 60% of the observations, whereas in the WOM condition it was very variable (2 strokes (23%), 3 strokes (48%) and 4 strokes (21%)). The inverse was observed for D: it was very variable in

the WM condition (3 strokes (43%) and 4 strokes (43%), whereas in the WOM condition it was produced with 3 strokes in 54% of the observations.

To summarize, there were 7 letters that were produced with the same number of strokes in both conditions in at least 75% of the observations and 10 letters for which it happened in at least 50% of the observations. This implies that 65% of the letters of the alphabet are produced following the same rules, regardless of the presence or absence of the instructions to follow the model. Indeed, in the WM condition, 25/26 of the letters were produced more than 50% of the times the same way. In the WOM condition, 24/26 of the letters were produced more than 50% of the times the same way.

Nevertheless, numerically speaking, writing the letters with the model produced less variability than without a model (except for D). In the “with model” condition, there were 13 letters that were produced at > 75% in the same way. This represents 50% of the letters of the alphabet. In the “without model” condition, there were 7 letters that reached this percentage (26% of the alphabet). However, there were 19 letters in the WOM condition that were produced with the same number of strokes in at least 50% of the observations (73% of the alphabet). There was only one letter (D) in the WM condition and two letters (B and G) in the WOM condition that really presented variability (< 50%). The statistical analyses compared the stroke number distributions of each letter in each condition (WM vs. WOM). We observed a significant impact of the instruction to follow the model in 13 letters: A ($z = -1.88$, $p < .05$), B ($z = 3.52$, $p < .001$), C ($z = 3.24$, $p < .001$), D ($z = 2.52$, $p < .01$), G ($z = 2.75$, $p < .01$), H ($z = -2.11$, $p < .05$), I ($z = 1.08$, $p < .0001$), J ($z = -11.55$, $p < .001$), O ($z = 2.58$, $p < .01$), P ($z = 3.17$, $p < .001$), Q ($z = 2.8$, $p < .01$), R ($z = 2.04$, $p < .05$), Y ($z = 0.41$, $p < .0001$). It is noteworthy that nine of these letters presented curved lines that require rotation movements for production. The effect of the instruction to follow the model was a tendency to produce the letter with more strokes (except for letter J). For the remaining four letters, which are made up of straight lines, we observed a tendency to produce the letter with less strokes.

Table 2 presents the most frequent number of strokes produced for each letter with and without model. It revealed that there are only 5 letters for which the number of strokes is not congruent in the WM and WOM conditions: A, D, I, J, and Y. The statistical analyses of their distribution indicated that the instruction to follow the model decreased the number of strokes (except for D). This suggests that in future experiments with upper-case writing, instructing the participants to write the letters with a model will not have a very determinant impact on the data.

Table 2. Most frequent number of strokes for each letter when produced with and without model.

Nb of strokes	With Model	Without Model
A	3	**4**
B	5	5
C	2	2
D	3 or 4	**3**
E	4	4
F	3	3
G	3	3
H	3	3
I	1	**3**
J	2	**3**
K	3	3
L	2	2
M	4	4
N	4	4
O	2	2
P	3	3
Q	3	3
R	4	4
S	3	3
T	2	2
U	2	2
V	2	2
W	4	4
X	2	2
Y	2	**3**
Z	3	3

We also compared our stroke counts with the one presented by Spinelli et al. (2012). In their experiment, one individual wrote the letters with no particular instruction, like in our "without model" condition. Their stroke count excluded in air movements. The comparison indicated that there are 8 letters (A, C, G, I, N, P, R, Y) that differ in stroke numbers with our WOM condition. The differences are of only one stroke, except for I. All these letters had an agreement of at least 50%, except for G, which is one of the most variable letters of the alphabet.

In sum, and from a descriptive point of view, we globally observed that there are letters that are more variable than others but variability is quite limited. This suggests that the rules that were learnt during writing acquisition are still applied most of the times we write the letters.

In Air movements

Table 3 presents the number of “in air” movements produced for each letter with and without model. There were 17 letters in the WM and 16 letters in the WOM conditions that presented very little variability in the number of in air movements (> 75% of the productions). There were 9 letters in the WM and 10 letters in the WOM conditions that presented some variability (> 50%). Thus, there were no letters that presented great variability (x < 50%). These results therefore revealed that there is little variability in the number of in air movements.

It is interesting to point out that 17 letters in the WM condition and 16 letters in the WOM condition were mostly produced without any in air movement. Only 7 letters in the WM condition and 7 letters in the WOM condition were produced with one in air movement. The in air movement always corresponded to a straight line that was either horizontal (e.g., A, T) or slanted (e.g., K, X, Y). There were only 2 letters in the WM condition and 3 letters in the WOM condition that were produced with two in air movements.

To summarize, we observed that a majority of the upper-case letters were produced without any in air movements. Around one quarter of the alphabet (23 to 26%) was produced with only one in air movement. This could explain why the variability is so limited.

Table 3. Number of in air movements produced for each letter with model (3a) and without model (3b). The numbers indicate the percentage of observations (the highest percentage is in bold).

Table 3a. Letters produced with model.

Nb of In Air Movements (WM)	0	1	2	3
A	5	**73**	23	0
B	**67**	32	1	0
C	**100**	0	0	0
D	**56**	44	0	0
E	5	23	**58**	14
F	0	**58**	42	0
G	**82**	18	0	0
H	5	13	**82**	0
I	**100**	0	0	0
J	**100**	0	0	0
K	13	**62**	25	0
L	**100**	0	0	0
M	**77**	23	0	0
N	**74**	23	4	0
O	**100**	0	0	0
P	**70**	30	0	0
Q	8	**92**	0	0
R	**71**	29	0	0
S	**100**	0	0	0
T	8	**92**	0	0
U	**100**	0	0	0
V	**100**	0	0	0
W	**88**	12	0	0
X	0	**99**	1	0
Y	19	**81**	0	0
Z	**99**	1	0	0

Table 3b. Letters produced without model.

Nb of In Air Movements (WOM)	0	1	2
A	0	**91**	9
B	**70**	25	5
C	**100**	0	0
D	**66**	34	0
E	1	34	**65**
F	1	**63**	36
G	**100**	0	0
H	15	23	**62**
I	29	18	**53**
J	11	**88**	1
K	27	**57**	15
L	**100**	0	0
M	**82**	11	7
N	**93**	2	5
O	**100**	0	0
P	**79**	21	0
Q	1	**99**	0
R	**90**	10	0
S	**100**	0	0
T	1	**99**	0
U	**100**	0	0
V	**95**	5	0
W	**63**	32	5
X	4	**96**	0
Y	**60**	40	0
Z	**69**	31	0

Conclusion

This experiment is a first attempt to quantify production variability in handwriting. It also aimed at providing a methodological contribution to handwriting studies in which movement time data is normalized on the basis of stroke number. To do so, the participants had to write the letters of the alphabet in upper-case format on a digitizer. They were instructed either to follow the model of the letter presented on the screen or to write spontaneously.

The data revealed that the number of strokes required to produce the letters was rather constant among participants and productions. There were 19 letters that were produced, in most observations, with the same number of strokes, irrespective of the experimental instructions. This means that variability essentially concerned 7 letters, which represents 27% of the alphabet. Furthermore, among these letters, only 3 of them presented less than 50% agreement in the observations. In addition, the majority of the letters (17 letters) were produced without in air movements and 7 letters with one in air movement. In air movements were always done at the end of the production and concerned straight lines. The results also indicated that the instructions to follow a specific model did not have a major impact on the number of strokes the participants produced. This study revealed that the participants produced most of the letters with the same number of strokes. The few letters that presented variability were B, D, G. The instruction to follow the model only affected letters A, D, I and J. Therefore, the “grammar of action” we learned during the writing acquisition period seems to prevail on our production strategies in adulthood.

We also compared the data of the present study to the table defining stroke numbers presented by Spinelli et al. (2012). We observed discrepancies of one stroke in seven letters. This comparison shows the importance of the present methodological contribution and sheds some light into possible biases of previous experiments with upper-case writing (e.g., Kandel et al., 2011; Afonso et al., 2015).

Finally, it is important to note that this study was limited to upper-case letters. This is the format that produces less variability. Future studies should examine variability in cursive and script lower case writing.

References

Afonso, O., Alvarez, C., & Kandel, S. (2015). Effects of Grapheme-to-Phoneme probability on writing durations. Memory & Cognition, 43, 579-492. DOI 10.3758/s13421-014-0489-8

Berninger, V. W., Winn, W. D. (2006). Implications of advancements in brain research and technology for writing development, writing instruction, and educational evolution. In C. MacArthur, S. Graham, & J. Fitzgerald (Eds.), *Handbook of Writing Research*. New York: Guilford.

Bourdin, B., & Fayol, M. (1994). Is written language production more difficult than oral language production? A working memory approach. *International Journal of Psychology, 29,* 591-620.

Chartrel, E., & Vinter, A. (2004). L'écriture : une activité longue et complexe à acquérir. *Approche Neuropsychologique de l'Apprentissage chez l'Enfant*, *78*, 174-180.

Christensen, R.H.B. (2015). Regression Models for Ordinal Data. R package version 2015.6‑28. https://cran.r-project.org/web/packages/ordinal/index.html

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., 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(4), 620-633.

Guinet, E., & Kandel, S. (2010). Ductus: A software package for the study of handwriting production. *Behavior Research Methods*, *42*(1), 326-332.

Hayes, J. R. (2012). Modeling and remodeling writing. *Written Communication, 29,* 369–388.

Kandel, S., Peereman, R., Grosjacques, G. & Fayol, M. (2011). For a psycholinguistic model of handwriting production: Testing the syllable-bigram controversy. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 37(4), 1310-1322.

Meulenbroek, R. G., & Van Galen, G. P. (1990). Perceptual-motor complexity of printed and cursive letters. *The Journal of experimental education*, *58*(2), 95-110.

Mojet, J. W. (1991). Characteristics of the developing handwriting skill in elementary education. In J. Wann, A. Wing, & N. Søvik (Eds.), *Development of graphic skills: Research, perspectives and educational implications* (pp. 53–75). London: Academic Press

Olive, T., & Kellogg, R. T. (2002). Concurrent activation of high-and low-level production processes in written composition. *Memory & Cognition*, *30*(4), 594-600.

R Core Team (2014). R: A language and environment for statistical computing. *R Foundation for Statistical Computing*, Vienna, Austria. URL http://www.R-project.org/.

Russell V. Lenth (2016). Least-Squares Means: The R Package lsmeans. Journal of Statistical Software, 69(1), 1–33.

Spinelli, E., Kandel, S., Guerassimovitch, H., & Ferrand, L. (2012). Graphemic cohesion effect in reading and writing complex graphemes. *Language and Cognitive Processes*, *27*(5), 770-791.

Teulings, H. L. (1996). Handwriting movement control. *Handbook of perception and action*, *2*, 561-613.

Thomassen, A.J.W.M., Tibosch, H.J.C.M., & Maarse, F.J. (1989). The effect of context on stroke direction and stroke order in handwriting. In R. Plamondon, C.Y. Suen, & M. Simner (Eds.), Computer recognition and human production of handwriting (pp. 213–230). Singapore: World Scientific.

Tutz, G. & Hennevogl, W. (1996). Random effects in ordinal regression models. Computational Statistics & Data Analysis 22, 537–557.

Van Sommers, P. (1984). *Drawing and cognition: descriptive and experimental studies of graphic production processes*. Cambridge: Cambridge University Press.

Acknowledgements

We acknowledge funding from the Agence Nationale de la Recherche (ANR ECRIRE-14-CE30-0013) attributed to Sonia Kandel.

CHAPITRE 7

Étude 3 - Comment les enfants produisent-ils des mouvements de pointage et de rotation quand ils/elles apprennent à écrire les lettres ?

Nous avons vu que l'écriture est une activité motrice qui requiert une dextérité manuelle fine permettant de produire des lettres de façon fluide et lisible. De nombreux mouvements sont requis dans les taches d'écriture. Parmi eux, nous avons porté notre attention sur les mouvements de rotation (e.g., lettre *C*) et de pointage (e.g., lettre *T*) car quotidiennement, les enseignants sont confrontés à des difficultés que rencontrent les jeunes élèves pour l'écriture de ces types de mouvement. Nous avons voulu comprendre en quoi les mouvements de rotation et de pointage étaient des mouvements couteux et pourquoi la mise en place des automatismes moteurs pouvait y être sensible. Des enfants de 6 à 10 ans ont eu à reproduire des séquences de lettres (i.e., des pseudo-mots) sur une tablette digitalisante. Dans une condition, les pseudo-mots étaient constitués de lettres porteuses de courbures ; dans l'autre condition, les lettres constituant les pseudo-mots étaient porteuses de mouvements de pointage mais pas de mouvements de rotation ; puis, dans une condition de contrôle, les lettres des pseudo-mots étaient constituées avec un nombre contrôlé de rotations et de pointages. Les résultats ont indiqué que les mouvements de rotation et de pointage sont tous deux des mouvements coûteux, surtout pour les enfants les plus jeunes. Les enfants semblent utiliser des stratégies de compensation afin de gérer les difficultés inhérentes à chacun des mouvements. Les mouvements de rotation seraient coûteux en matière de gestion des vitesses. La réduction de l'amplitude entre les maxima et minima de vitesse permettrait de maintenir une vitesse relativement constante afin de produire les courbes mais rendrait le tracé très dysfluent. Pour la gestion des mouvements de pointage, nous avons observé une stratégie compensatoire entre les durées de mouvements sur feuille et les durées des mouvements en l'air. Ces résultats suggèrent une tendance globale à garder un rythme constant dans la production des lettres. Ces stratégies compensatoires étaient présentes à tous les âges. Toutefois, nous avons constaté que les processus d'acquisition de ces stratégies se mettraient en place entre 6 et 7 ans. A 8 ans, les enfants focaliseraient leur attention sur la stabilisation de ces stratégies et l'amélioration du contrôle du mouvement. L'automatisation de ces mouvements serait en place autour de 10 ans, lorsque les enfants parviennent à augmenter la vitesse de production de manière significative. Cela serait dû à un contrôle efficace de la durée de leurs mouvements ainsi que de leur fluidité.

L’ensemble de ce travail a été publié sous la forme d’un article scientifique. La référence bibliographique est la suivante :

Séraphin Thibon, L., Barbier, G., Vilain, C., Sawallis, T.R., Gerber, S. & Kandel, S. (2018, publié en ligne). Investigating how children produce rotation and pointing movements when they learn to write letters. *Human Movement Science*. doi.org/10.1016/j.humov.2018.04.008

Une partie de ce travail a également été présenté sous forme de poster dans un congrès international dont la référence est la suivante :

Séraphin Thibon, L., Barbier, G., Vilain, C., Sawallis, T.R., Gerber, S. & Kandel, S. (2018, publié en ligne). Investigating how children produce rotation and pointing movements when they learn to write letters. *The 1st Literacy Summit*, Porto, Portugal, November, 1-3.

ARTICLE IN PRESS

Human Movement Science xxx (xxxx) xxx–xxx

Contents lists available at ScienceDirect

Human Movement Science

journal homepage: www.elsevier.com/locate/humov

Full Length Article

Investigating how children produce rotation and pointing movements when they learn to write letters

Laurence Séraphin Thibon[a], Guillaume Barbier[a], Coriandre Vilain[a], Thomas R. Sawallis[b], Silvain Gerber[a], Sonia Kandel[a,*]

[a] Univ. Grenoble Alpes, GIPSA-lab (CNRS UMR 5216), Grenoble, France
[b] University of Alabama, New College, Tuscaloosa, AL, USA

ARTICLE INFO

Keywords:
Handwriting
Children
Letters
Rotation movements
Pointing movements

ABSTRACT

How do children learn to write letters? During writing acquisition, some letters may be more difficult to produce than others because certain movement sequences require more precise motor control (e.g., the rotation that produces curved lines like in letter O or the pointing movement to trace the horizontal bar of a T). Children of ages 6–10 (N = 108) wrote sequences of upper-case letters on a digitizer. They varied in the number of pointing and rotation movements. The data revealed that these movements required compensatory strategies in specific kinematic variables. For pointing movements there was a duration decrease that was compensated by an increase in in-air movement time. Rotation movements were produced with low maximal velocity but high minimal velocity. At all ages there was a global tendency to keep stability in the *tempo* of writing: pointing movements exhibited a duration trade-off whereas rotation movements required a trade-off on maximal and minimal velocity. The acquisition of letter writing took place between ages 6 and 7. At age 8 the children shifted focus to improving movement control. Writing automation was achieved around age 10 when the children controlled movement duration and fluency. This led to a significant increase in writing speed.

1. Introduction

Children spend at least half of their school time in activities involving writing or fine motor control (Marr, Cermak, Cohn, & Henderson, 2003; Santangelo & Graham, 2016). Writing is a complex task that involves the acquisition of different kinds of motor and perceptual skills. Children must learn how to produce the movements that generate the appropriate letters. In addition, they have to learn how to process the visual and kinesthetic sensory information arising from their movements (Bard, Hay, & Fleury, 1990; Olive & Piolat, 2002; Feder & Majnemer, 2007; Danna & Velay, 2015). They also have to compute specific calculations on spatial parameters to produce the correct letter shapes. At the beginning of handwriting acquisition, the children start learning letter production by following a sort of "grammar of action" (Bruner, 1971; Goodnow & Levine, 1973; Bara & Bonneton-Botte, 2015; Séraphin-Thibon, Gerber, & Kandel, 2017). This constitutes a set of rules that specifies procedural knowledge on how to write the letters. The rules define where to start writing each letter and the direction of the following strokes that are needed to write a given character (e.g., "start at a leftmost and topmost point", "draw vertical lines from top to bottom", "draw horizontal lines from left to right"). The rules that the children learn at school are hierarchical. Some rules have to be applied before others. For example, to write a T, first we apply

* Corresponding author at: Univ. Grenoble Alpes, GIPSA-lab (CNRS UMR 5216), 11 rue des Mathématiques – Grenoble Campus BP46, 38402 Saint Martin d'Hères – Cedex, France.
E-mail address: Sonia.Kandel@univ-grenoble-alpes.fr (S. Kandel).

https://doi.org/10.1016/j.humov.2018.04.008
Received 15 December 2017; Received in revised form 11 April 2018; Accepted 17 April 2018
0167-9457/ © 2018 Elsevier B.V. All rights reserved.

Please cite this article as: Séraphin Thibon, L., Human Movement Science (2018), https://doi.org/10.1016/j.humov.2018.04.008

Fig. 1. Examples of upper-case letters produced by a 6 year-old child at the beginning of 1st grade. Left: Illustration of difficulties with pointing movements required for producing letter T. Right: Illustration of difficulties with rotation movements required for producing letter O.

"draw vertical lines from top to bottom" and then "draw horizontal lines from left to right".

This hierarchy has a certain number of implications regarding the difficulty producing certain letters. For example, the letter L is composed of two straight lines. By following the rules, children will produce the vertical line from top to bottom and then trace the horizontal line from left to right. This left to right movement is continuous with the vertical line and is done without lifting the pen. Letter T also consists of two straight lines, but to produce the horizontal line on the top, one has to perform a pen lift and then a pointing movement to trace the horizontal line from left to right. The pointing movement renders letter T more cognitively demanding than letter L. Indeed, there is a supplementary movement. In addition, the child has to visualize the position of the target. This visualization process is not the same for all the letters requiring pointing movements. For example, the target for the horizontal movement to produce letter T is different than for letter A. Hence, some letters may be more difficult to produce than others because certain movement sequences involve finer motor control and/or visuo-spatial coordination. During our interactions with children just starting to learn to write, we observed that the letters requiring pointing movements such as the ones we have to execute when producing the horizontal bar on a T seem particularly demanding. At the beginning of the acquisition period the children also have difficulties with rotations to produce curved lines like in an O. Fig. 1 presents examples of upper-case letters O and T produced by a 6 year-old child at the beginning of 1st grade.

To produce T, there is an initial movement that traces a straight line from top to bottom. Then, there is a pointing movement that takes the pen tip to the location where the following line has to be produced. Finally, letter T is finished with a horizontal left to right straight line. This task may be cognitively demanding because reaching the correct "target" – i.e., where the pen has to touch the surface again- requires programming a pen lift and calculating the exact location in space to start writing again. On the left part of Fig. 1, one can observe that the child "missed" the target because the two lines do not touch each other and the vertical line is not centered with respect to the horizontal line. On the right side of Fig. 1, it is clear that the child had difficulties producing the rotation movement of the letter O. The curved line is very irregular even if legible. In addition, the letter O is generally a closed circle, but here the production is rather a vertical ellipse whose beginning and end do not join. Given these difficulties, the goal of the present study was to gain more understanding on the impact of pointing and rotation movements on letter production at the beginning of writing acquisition. Elementary school children produced letter sequences on a digitizer so several kinematic measures could be examined. The sequences varied in the number of pointing and rotation movements.

1.1. Learning how to write letters

This research was conducted in France with a Latin alphabet. In France, writing is formally taught in 1st grade, at the beginning of elementary school, when the children are around 5–6 years-old. When children start 1st grade, they already know how to use the hand-arm system in many different kinds of everyday tasks, like eating or brushing their teeth. They also know how to use pens, markers and pencils to draw. Thus, when starting elementary school the children must learn to further specialize their hand-arm system for writing. Learning to write letters involves the integration of a series of skills and it takes several years to be proficient in all of them (Chartrel & Vinter, 2004). Therefore, learning how to write should be considered within the framework of general motor learning and maturation. Motor maturation allows children to coordinate the proximal and distal articulations (de Ajuriaguerra et al., 1964) but as they are starting to learn to write they mainly use their proximal articulations. Their movements are impulsive. This is why the amplitude of their movements is generally quite large and lacks precision. With motor maturation, the children will be able to control the distal aspects of movement production and will therefore control their movements with more precision. The amplitude of the movements will decrease, while velocity and fluency will increase (Meulenbroek & van Galen, 1988; Mojet, 1991; Zesiger, 1995).

General motor learning also requires the elaboration of motor programs (Halsband & Lange, 2006). The first motor programs for letter writing are generated when the teachers introduce the rules of the "grammar of action". First, they present the model of the letter so that the children know what shape they have to reproduce. Next they indicate where to start the first stroke, followed by the

stroke direction. This process will repeat in correct stroke order until all the strokes of the letter are written. Like any motor learning situation, at the beginning the movements are produced slowly and lack smoothness or fluency. At this stage the children are still elaborating the links between sensory information and the resulting movements (Wolpert, Ghahramani, & Jordan, 1995). The objective of this intense visual and kinesthetic sensory control is to determine which motor patterns generate the letter shapes that best comply with the geometrical parameters of the model. This process is very demanding in both attentional resources (Atkinson, 1989; Petersen, Corbetta, Miezin, & Shulman, 1994; Shadmehr & Mussa-Ivaldi, 1994) and working memory (Deiber et al., 1997). With practice, the information on letter shape, stroke order and direction are memorized with progressively increasing detail. This information enriches the content of the motor programs. When the motor programs contain all the procedural information needed to execute a given letter, they are considered stable. They are stored in a long-term motor memory. When the child has to produce a given letter, he/she activates the corresponding motor program to retrieve the information on letter shape, stroke order and direction. This is done in a feed-forward manner, on the basis of previous knowledge. This feed-forward strategy decreases the need for sensory control and attentional processes (Meulenbroek & van Galen, 1986; Meulenbroek & van Galen, 1988; Meulenbroek & van Galen, 1989a). The control of the writing movements becomes more ballistic, rendering letter production faster and more precise. Automation is achieved when each letter is retrieved as a learned action and has a stable motor program (Halsband & Lange, 2006).

An important aspect of letter acquisition – as for motor learning in general- is that the components of motor program elaboration are learnt through different kinds of processes. Certain components are acquired explicitly and others implicitly (Halsband & Lange, 2006). When the teachers instruct the children to follow rules for letter production, motor learning is explicit. Rules indicating movement onset and stroke direction are explicit because the child is conscious of having to respect them to write correctly. In the present study, we investigated components of motor learning that are not taught explicitly but are essential for letter production. These implicit components are related to the execution of pointing and rotation movements. There is no information on explicit instruction of pointing and rotation movements in the French teachers' manuals (see Ministère de l'Education Nationale, EduSCOL, 2015). This is surprising because as we mentioned earlier, these movements may be more cognitively demanding than, for instance, producing simple straight lines from top to bottom. The children learn how to execute pointing and rotation movements implicitly in drawing activities during the three years of kindergarten. Learning is mostly based on trial and error strategies. To our knowledge, there are very few studies investigating pointing and rotation movements in handwriting and even fewer with a developmental approach.

1.2. Pointing movements in letter production

Pointing movements are not specific to writing. However, many letters of most writing systems and styles require pointing movements (Meulenbroek & van Galen, 1986; Wann, 1986). In the Latin alphabet, producing upper-case letters and writing in lower-case print style requires many pointing movements to put all the lines together (e.g., make the two lines of an *h* touch each other), finish certain letters (e.g., putting the dot on letter *j*) and passing from the end of a letter to the onset of the following one. The reason why they are called pointing movements is that their objective is to reach a specific target or spatial location. To do so, there is a moment in which the pen is in the air and does not touch the paper. In this sense, the movement to start writing a letter, its onset, is also a pointing movement. In this study we did not consider letter onset movements as pointing movements. The pointing movements we studied are the in-air movements that are done within a letter after the initial stroke. They are movements that produce the subsequent strokes to finish a letter. Pointing movements in adults are ballistic and therefore very fast (Teulings, 1996). One of the reasons for the speed difference with other writing movements is that the hand is in the air. There is no friction with the paper during its production, so there is no physical resistance to slow down the movement. Pointing movements are produced with almost no sensory feedback. For the target to be reached correctly, there has to be a thorough visuo-spatial analysis of its location. This means that before executing the in-air movement we also have to integrate the information resulting from visual and proprioceptive feedback. This requires coordination from several distinct processing levels. Therefore, it should be cognitively demanding when the children start learning to write.

Meulenbroek and van Galen (1988) conducted an experiment in which the children had to write the 26 cursive letters of the alphabet on a digitizer. The kinematic data indicated that the children of ages 5–6 tend to write with sequences of ballistic movements. Since feedback is limited the probability of missing the location of the target is high. Although the children try to follow the grammar of action for letter production, movement control lacks accuracy. This is probably the reason why the child writing the letter in Fig. 1 did not reach the target correctly when he did the pointing movement. Then there is a transition around ages 6–7, where the writing is modulated by close sensory feedback. The children gain in accuracy because they generate sensory-motor links between their movements and the shape of the models they have to reproduce. Around ages 8–9, once the child knows which is the correct movement to produce the correct shape, the movements become more ballistic but also integrate sensory feedback. This pattern of results indicates that the involvement of sensory feedback changes as the children practice writing.

There are very few developmental studies investigating the role of sensory feedback during movement control of pointing movements. Ferrel, Bard, and Fleury (2001) manipulated visual feedback in an experiment where children from 6 to 11 years old and adults had to execute pointing movements. The visual feedback was provided by a computer screen located in front of the participant. The age 6 children had serious difficulties in reaching the targets when they could not see their hand directly and when the angle of the position of the target was modified. Visual feedback was clearly necessary for programming the pointing movements. The 8 year-old children instead produced fewer pointing errors. They could program their movements even when the feedback was modified spatially. The results suggest that the role of visual feedback during movement programming evolves as the children learn to represent their pointing movements in space. Another study by Pellizzer and Hauert (1996) on spatial localization supports the idea of a

major change for visual and motor coordination at age 8. Children from ages 6 to 10 had to point with their hand to a target that varied in eccentricity. The results revealed that at age 8 spatial localization processes change. This has an impact on the way visual feedback information is translated into motor representations. The authors suggested that this could be due to the maturation of the left hemisphere.

For writing, research by Klein, Guiltner, Sollereder, and Cui (2011) provided empirical evidence on the importance of visual feedback in a developmental perspective. Children aged 8 to 11 had to do a copying task. The results revealed that visual information accounted for 26% of the variance of writing speed. According to Marquardt, Gentz, and Mai (1996, 1999) visual feedback is particularly useful to adjust the writing movements to spatial constraints such as letter size. For Grossberg and Paine (2000) feedback is of course essential to regulate the movement amplitude but they also point to an important role of visual information for controlling the orientation of the movements. This is in line with another experiment done with children of ages 8–10 and adults indicating that the absence of visual feedback results in a performance decrease. There was a decline on all kinematic measures (Chartrel & Vinter, 2006). In sum, visual feedback regulates movement control in tasks involving pointing movements as well as writing. This could explain why having to produce letters with many pointing movements is so demanding in cognitive resources.

1.3. Rotation movements in letter production

All writing systems involve curved lines. Some writing styles like cursive handwriting, use more curved lines than others because the writing is continuous and there are hardly any spaces between letters. In cursive handwriting, the curves are generally loops and sequences of ellipses. There are few straight lines. Circles are also infrequent because when they are produced at high speed the biomechanical constraints of the hand make them more oval-like (Dounskaia, Van Gemmert, & Stelmach, 2000; Danna, Enderli, Athènes, & Zanone, 2012). In addition, the letters are connected to one another by connection strokes that are short curved lines. To write letters made of curved lines we have to produce rotation movements with the fingers, the wrist or both. These rotations have to be very precise, so that the rounding gesture is smooth, regular and traces a trajectory with a satisfactory radius of curvature. The number of studies on motor control for the production of curved lines is extremely limited.

Research on drawing and writing has indicated that producing curved lines requires a decrease in velocity. We have known since Binet and Courtier (1893) that movement speed increases when tracing straight lines and decreases when producing curved lines. The reason for this velocity decrease is related to the bio-mechanic constraints of motor production. This functional relation between spatial and motor constraints has been studied extensively and is known through its mathematical description as the 2/3 power law (Viviani & Terzuolo, 1982). It stipulates that the tangential velocity of the writing and drawing movements is a function of the radius of curvature of the figure. Although writing movements do not comply perfectly with the 2/3 power law (Thomassen & Teulings, 1985) and it is not functional before age 13 (Viviani & Schneider, 1991), simple observation of writing behavior clearly shows that children slow down their movements when producing letters with curved lines.

Some studies related to the execution of curved lines concerned circle production (Van Sommers, 1984; Meulenbroek, Vinter, & Mounoud, 1993; Vinter, 1994; Rueckriegel et al., 2008). At the beginning the children start tracing circles from the bottom. Then with practice, the onset of the circles will be located on the top. The consequence of this change in onset location switches the rotation from clock-wise to counter-clock-wise. The rule the children are taught at school is to start writing letter ○ in the 12 o'clock position with a counter-clock-wise rotation. These changes in onset location and rotation direction require different ways of coordinating the fingers and the wrist. This may also explain why writing curved lines slows down the movement with respect to writing straight lines.

Bernstein (1967) proposed a motor learning model based on degrees of freedom and their coordination (i.e., muscle synergies). Kelso (1982) further developed this theory of movement by indicating that muscles and joints do not work in isolation but in coordinated groups. On this basis, Grossberg and Paine (2000) proposed a model for learning to produce curved movements. Each movement is the result of a motor program that is controlled by a planning vector. These vectors control the speed for a whole sequence of curves. At the beginning of the acquisition process, children produce many movements that are segmented and lack fluency. They go back and forth between the position of their hand and the location of the point they have to reach. This process is repeated multiple times so that the children can readjust the planning vectors until they learn to produce the sequences of curves correctly. This kind of processing could be applied to writing but should be taken with caution since the children differentiate between drawing and writing very early, before even knowing how to read and write (Lavine, 1977; Goodnow, 1986; Karmiloff-Smith, 1992; Brenneman, Massey, Machado, & Gelman, 1996; Adi-Japha & Freeman, 2001; Tolchinsky-Landsmann, 2003).

In the present study we examined the impact of pointing and rotation movements on letter production during writing acquisition. The children wrote pseudo-word letter sequences on a digitizer. The sequences were presented in upper-case letters and the children had to reproduce them in upper-case as well. The reason for this instruction was to maximize the number of pointing movements during letter production. Upper-case letters and print require many pointing movements whereas the continuous character of cursive handwriting minimizes them. In French kindergartens the children are informally introduced to writing with print upper-case letters. Then, in 1st grade (around age 6) they are formally instructed to write in cursive style. There is no instruction for writing script lower-case letters. Therefore, with an upper-case letter writing task we were sure that all the children were familiar with the target models and how to execute them, even the younger ones.

2. Method

2.1. Participants

A total of 108 children participated in the experiment. There were 25 6-year-olds (mean = 6;6, SD = 0;2), 23 7-year-olds (mean = 7;4, SD = 0;3), 19 8-year-olds (mean = 8;6, SD = 0;5), 19 9-year-olds (mean = 9;8, SD = 0;4) and 22 10-year-olds (mean = 10;9, SD = 0;3). They were all right-handed and had normal or corrected-to-normal vision. They were native French-speakers and attended a public elementary school in the suburbs of Grenoble. Reading and writing skills were taught from the beginning of the school year (i.e., September) in 1st grade (age 6). The experiment took place in March so the 1st graders could do the task correctly. All the children attended the grade that was expected for their age. Any children with motor or hearing impairments, learning disabilities, brain or behavioral problems were excluded from the study. We required parental written consent for participation. This study respected all the ethical guidelines of the Grenoble ethical committee (CERNI authorization 2015-11-10-75).

2.2. Materials

The stimuli consisted of 24 pseudo-words written in upper-case letters. We chose to use the Calibri upper-case font for this experiment because we thought it was the font that complied the most to the upper-case handwritten letter patterns that are taught in French schools (e.g., E, T, A, F). Fonts like "Times New Roman" often have serifs that do not appear in handwritten forms. The letter examples we present are in Calibri font so that the reader gets a clear image of the model the child was instructed to reproduce. The letter sequences were presented in font size 72. They were made up of five letters making a total of 14 strokes. A stroke is a motor sequence that is limited by two tangential velocity minima at maximum curvature (Meulenbroek & Van Galen, 1990; Séraphin-Thibon et al., 2017). For the letters that are made up of straight lines, each line is considered as a stroke (e.g., L has two strokes because it has two straight lines; see Appendix A). Some letters require pen-lifts such as the horizontal line to finish letter T. These pen-lifts are pointing movements that are produced "in-air" (Rosenblum, 2003). Letter T has two strokes consisting of two straight lines and a pointing movement. In our study, the number of within-letter pen-lifts producing pointing movements was determined by a previous study on upper-case letter production in adults (Séraphin Thibon et al., in press; Appendix A). Other letters are made up of curved lines that are produced by rotation movements (e.g., C). To segment curved lines into strokes, we referred to the stroke definition mentioned above. Following this criteria, letter C also has two strokes (see Séraphin-Thibon et al., 2017 for an illustration of the stroke segmentation procedure).

To avoid repetition and make the pseudo-words "word-like", half of them had a CVCVC structure (where C = consonant and V = vowel) and the other half a VCVCV structure. The production of all the pseudo-words required four between-letter pen lifts that are also pointing movements. Since all the letter sequences were equivalent regarding this point, we constructed our experimental material by counting the within-letter pen lifts. In the *Pointing condition*, there were eight pseudo-words (Appendix B). We selected letters that required at least one within-letter pen-lift. To produce these letters correctly, the child had to lift the pen and then place it at a precise spatial location. For example, the pseudo-word FAXET is made out of the following stroke sequence: F = 3 strokes, A = 3 strokes, X = 2 strokes, E = 4 strokes, T = 2 strokes. There are six within-letter pointing movements: F = 2, A = 1, X = 1, E = 2, T = 1. None of the letters in the pseudo-words of the Pointing condition contained rotation movements. Many letters of the alphabet require pointing movements. Therefore, for the eight pseudo-words in the *Control condition*, we selected letter sequences that contained only one or two pointing movements (Appendix A). In other words, the Pointing and Control conditions differed in the number of within-letter pen-lifts. In the *Rotation condition*, the eight pseudo-words were made up of letters with curved lines that required at least one rotation movement (Appendix B). Curved movements were described by Edelman and Flash (1987) as movements that produce "trajectories consisting of two low-curvature segments connected by a high-curvature one." (pp. 26). For example, the pseudo-word UBOSO contains nine rotations: U = 1, B = 2, O = 2, S = 2, O = 2. It is noteworthy that letter O is made up of two rotations because it is generally produced with an ovoid shape and is never a perfect circle. In the Control condition we selected letter sequences that contained only one rotation movement (Appendix A). Therefore, the Rotation and Control conditions differed in the number of rotation movements.

2.3. Procedure

The children were instructed to write the pseudo-words in upper-case letters on a lined sheet of paper that was stuck to the digitizer (spacing between lines = 2.5 mm). The digitizer was a Wacom Intuos 3 size A5, with a sampling frequency of 200 Hz and an accuracy of 0.02 mm. The writing instrument was an Intuos Inking Pen so that the children could see their productions while they were writing on the digitizer. We used the *Ductus* software (Guinet & Kandel, 2010) to present the pseudo-words on the screen of the laptop. Before the pseudo-words appeared on the screen, there was a fixation point for 1500 ms. We did not give speed instructions but we asked the children to start to "write as soon as you can". The pseudo-word did not disappear from the screen until the child finished writing it. The children first became familiar with the digitizer and the pen by writing their name. There were four practice items. The pseudo-words were randomized across participants. The children did the experiment individually in a quiet room at school. The experiment lasted 25 to 30 min.

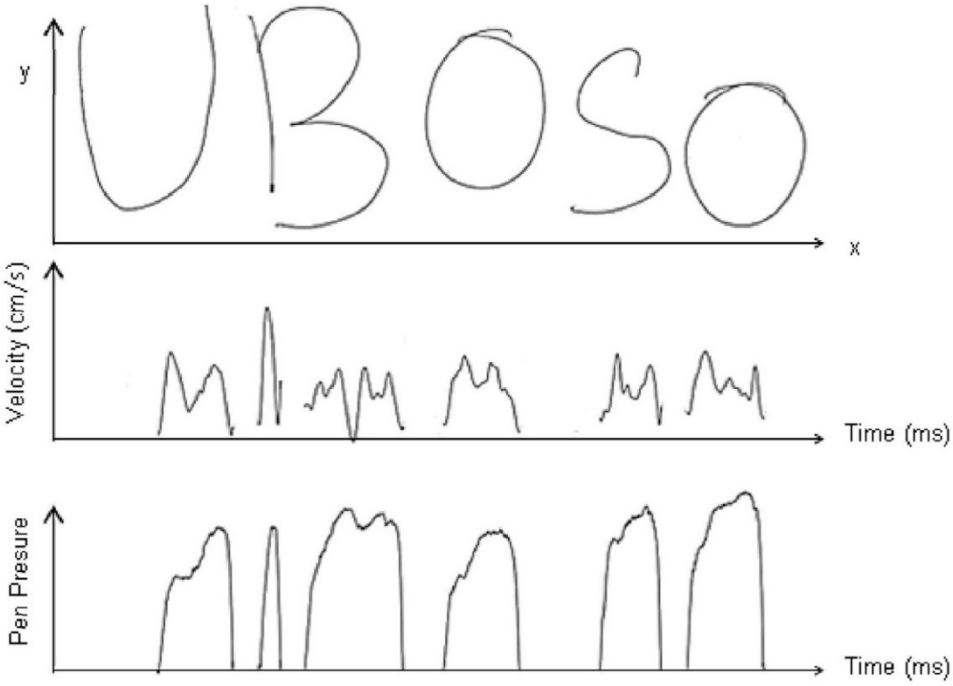

Fig. 2. Upper part: Production of pseudo-word UBOSO by a child of age 7. Central part: Velocity as a function of time. Lower part: Pen pressure as a function of time.

2.4. Data processing

The data were analyzed with the analysis module provided by *Ductus* (Guinet & Kandel, 2010). The data were smoothed with a Finite Impulse Response filter (Rabiner & Gold, 1975) with a 12-Hz cutoff frequency. Each pseudo-word started with the production of the first letter (pressure > 0) and ended with the final stroke of the fifth letter (pressure = 0; see Fig. 2).

We examined several measures. Their modulations are indicators of the cognitive load involved in motor execution. Duration concerned the time (ms) the children took to write each letter sequence. It refers to the time the pen touched the surface of the digitizer (pressure > 0). It does not include the time when the pen was in the air. The number of absolute velocity peaks observed for each letter sequence reflects movement fluency during the time the pen touched the surface of the digitizer (pressure > 0) (Meulenbroek & van Galen, 1989b). Smooth movements have fewer velocity peaks than dysfluent ones. In-air movement duration (ms) refers to the time the pen tip is not touching the digitizer. It corresponds to pressure = 0 and is an indicator of cognitive load in handwriting production. Dysgraphic children who have difficulties with the mechanics of handwriting have the pen in the air longer than typically developing children (Rosenblum, 2003). Trajectory (cm) refers to the length of the pen tip path on the surface of the digitizer to produce the target letter. Mean velocity refers to the ratio between the trajectory and time (cm/s). We also measured mean maximal and minimal velocity (cm/s). These values indicate how fast or slow the child can write while producing the pointing and rotation movements.

2.5. Data analysis

We recorded 2592 data points. There were 4 productions that we could not exploit for technical reasons so we excluded them from the analysis (0.15% of the data). When the children made mistakes, did corrections or crossed out their productions, we asked them to start again as many times as necessary. Our analyses only concern the trials without errors. We also excluded the data that exceeded +/-2.5 standard deviations from the mean for each participant across all sequences for each condition as follows: 69 data points for movement duration (2.66% of the data), 85 data points for number of velocity peaks (3.27% of the data), 62 data points for in-air movement duration (2.39% of the data), 63 data points for trajectory (2.4% of the data), 54 data points for mean velocity (2.08% of the data), 49 data points for maximum velocity (1.89% of the data), 60 data points for minimal velocity (2.31% of the data).

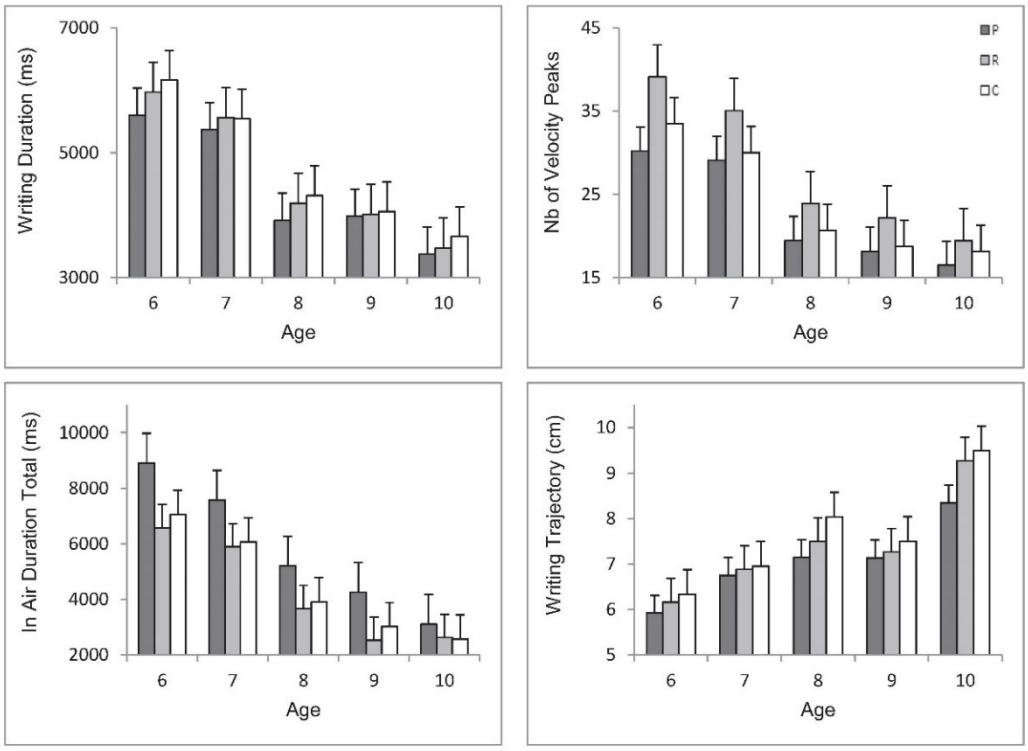

Fig. 3. Mean writing duration (ms), number of velocity peaks, in-air movement duration (ms), and writing trajectory (cm) for the Pointing (P), Rotation (R) and Control (C) conditions as a function of age (ages 6 to 10). Bars indicate standard error.

For the statistical analyses we did a logarithmic transformation on all the data. We then conducted a mixed linear model with the lme4 package provided by R (version RStudio, version 3.0.1; Bates, Maechler, & Bolker, 2011). The model we used included two fixed-effect factors: Age (6, 7, 8, 9 and 10), Condition (Pointing, Rotation, Control) and their interaction. We evaluated the impact of the terms using the function ANOVA of the lmerTest package (Satterthwaite, 1941). The participants were considered as a random effect factor. Multiple comparisons were also conducted with R using the glht function of the multcomp package and the lsmeans function of the lsmeans package (Russell & Hervé, 2015). We report the significant differences ($p < .05$).

To quantify the changes through development, we calculated for each measure the percentage of increase or decrease from the beginning of the acquisition period (age 6) to the middle of the acquisition period (age 8), and in turn to the end (age 10). For the younger children, this was calculated as ((m8-m6)/m6)∗100, where m6 is the mean of the 6-year-olds and m8 of the 8-year-olds for each condition. Likewise, for the older children we did (m10-m8)/m8)∗100, where m10 is the mean for the 10-year-olds. A positive result means that there was an increase of the measure during the period, whereas a negative result refers to a decrease of the measure.

3. Results

Fig. 3 presents writing duration (ms), number of velocity peaks, in-air movement duration (ms), and writing trajectory (cm) for the Pointing, Rotation and Control conditions as a function of age.

Fig. 4 presents mean velocity, as well as the maximal and minimal velocity (cm/s) for the Pointing, Rotation and Control conditions as a function of age.

3.1. Duration

The effect of condition was significant, $F(2, 2410.93) = 38.81$, $p < .001$. Writing durations were shorter for Pointing than the Control condition, $z = -8.65$, $p < .001$; they were shorter for Pointing than the Rotation condition, $z = -6.19$, $p < .001$; and they were shorter for Rotation than the Control condition, $z = -2.47$, $p < .05$. Writing duration decreased with age, $F(4, 107.77) = 14.00$, $p < .001$. The durations were longer for the children of age 7 than age 8, $z = -3.09$, $p < .05$. The interaction

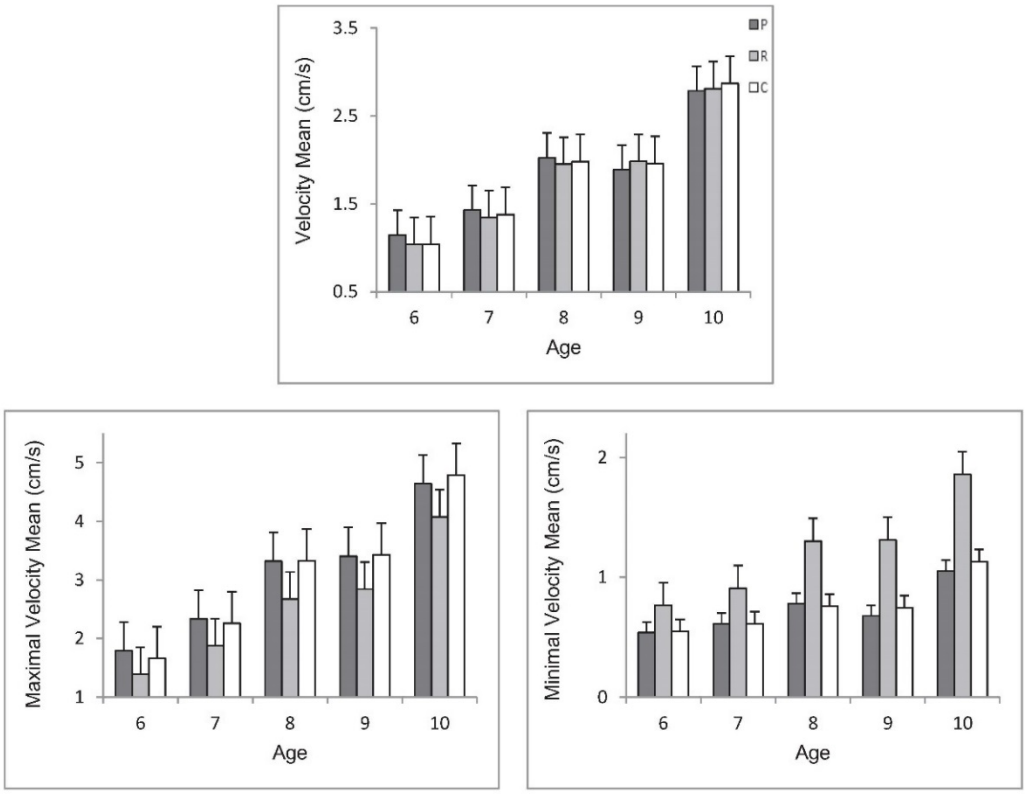

Fig. 4. Mean velocity, maximal and minimal velocity (cm/s) for the Pointing (P), Rotation (R) and Control (C) conditions as a function of age (ages 6 to 10). Bars indicate standard error.

between the two variables was significant, $F(8, 2410.93) = 2.17$, $p < .05$. Multiple comparisons revealed that durations were shorter for Pointing than the Control condition at most ages: age 6, $t(2421.33) = -6.37$, $p < .001$; age 7, $t(2421.08) = -2.48$, $p < .05$; age 8, $t(2421.07) = -5.06$, $p < .001$; and age 10, $t(2421.54) = -3.95p < .001$. Durations were shorter for Rotation than the Control condition at age 10, $t(2421.06) = -2.15$, $p < .05$. Durations were higher for Rotation than Pointing at most ages: age 6, $t(2421.23) = 4.54$, $p < .001$; age 7, $t(2421.10) = 2.50$, $p < .05$; and age 8, $t(2421.11) = 3.92$, $p < .001$.

In further analyses we quantified the percentage of duration decrease from the beginning of the writing acquisition period (age 6) to the middle and from the middle to the end of elementary school (age 10). For the younger children, the durations decreased 30% in the Pointing, 30% in Rotation, and 30% in Control conditions. For the older children, the durations decreased 14% in the Pointing, 17% in Rotation, and 15% in Control conditions.

3.2. Dysfluency

The effect of condition was significant, $F(2, 2394.86) = 173.79$, $p < .001$. The Pointing condition produced less dysfluency than the Control ($z = -6.57$, $p < .001$) or Rotation conditions, $z = -18.65$, $p < .001$. Rotation produced more dysfluency than the Control condition, $z = 12.07$, $p < .001$. Dysfluency decreased with age, $F(4, 107.42) = 23.26$, $p < .001$. Dysfluency decreased from ages 7 to age 8, $z = -4.08$, $p < .001$. The interaction between the two variables was significant, $F(8, 2394.85) = 2.46$, $p < .05$. Multiple comparisons revealed less dysfluency in the Pointing than Control condition at most ages: age 6, $t(2405.31) = -5.11$, $p < .001$; age 8, $t(2405.21) = -2.31$, $p < .05$; and age 10, $t(2405.29) = -3.33p < .01$. Rotation produced more dysfluency than the Control condition at all ages: age 6, $t(2405.35) = 6.96$, $p < .001$; age 7, $t(2405.08) = 6.40$, $p < .001$; age 8, $t(2405.11) = 5.38$, $p < .001$; age 9, $t(2406.86) = 5.28$, $p < .001$; and age 10, $t(2405.44) = 2.84$, $p < .01$. There was more dysfluency in Rotation than Pointing at all ages: age 6, $t(2405.19) = 12.10$, $p < .001$; age 7, $t(2405.10) = 8.39$, $p < .001$; age 8, $t(2405.21) = 7.68$, $p < .001$; age 9, $t(2405.55) = 7.09$, $p < .001$; and age 10, $t(2405.92) = 6.16$, $p < .001$. Further analyses revealed that the 6-year-olds were 90% more dysfluent than the 10-year-olds.

In further analyses we quantified the percentage of dysfluency decrease. For the younger children, the dysfluency decreased 36% in the Pointing, 39% in Rotation, and 38% in Control condition. For the older children, the dysfluency decreased 15% in the Pointing, 19% in Rotation, and 12% in Control conditions.

3.3. In-air movement duration

The effect of condition was significant, $F(2, 2417.67) = 97.22$, $p < .001$. In-air durations were longer for Pointing than the Control condition, $z = 10.37$, $p < .001$; they were longer for Pointing than Rotation, $z = 13.01$, $p < .001$; and they were shorter for Rotation than the Control condition, $z = -2.65$, $p < .001$. In-air duration decreased with age, $F(4, 107.13) = 36.21$, $p < .001$. In-air duration decreased from ages 7 to age 8, $z = -4.37$, $p < .001$. The interaction between the two variables was significant, $F(8, 2417.68) = 2.33$, $p < .05$. Multiple comparisons revealed that in-air durations were longer for Pointing than the Control condition at all ages: age 6, $t(2428.32) = 5.04$, $p < .001$; age 7, $t(2428.57) = 4.56$, $p < .001$; age 8, $t(2428.17) = 4.57$, $p < .001$; age 9, $t(2428.35) = 5.59$, $p < .001$; and age 10, $t(2429.12) = 3.49$, $p < .01$. In-air durations were shorter for Rotation than the Control condition at age 8, $t(2427.97) = -2.74$, $p < .05$; and age 9, $t(2428.67) = -2.48$, $p < .05$. In-air durations were shorter for Rotation than Pointing at all ages: age 6, $t(2428.21) = -6.11$, $p < .001$; age 7, $t(2428.56) = -4.68$, $p < .001$; age 8, $t(2428.17) = -7.32$, $p < .001$; age 9, $t(2428.69) = -8.04$, $p < .001$; and age 10, $t(2428.24) = -3.23$, $p < .01$.

In further analyses we quantified the percentage decrease of in-air movement duration. For the younger children, the in-air movement duration decreased 42% in the Pointing, 44% in Rotation, and 45% in Control conditions. For the older children, the in-air movement duration decreased 40% in the Pointing, 28% in Rotation, and 34% in Control conditions.

3.4. Trajectory

The effect of condition was significant, $F(2, 2416.94) = 100.98$, $p < .001$. Trajectory was shorter for Pointing than the Control condition, $z = -13.73$, $p < .001$; it was shorter for Pointing than Rotation, $z = -7.50$, $p < .001$; and it was shorter for Rotation than the Control condition, $z = -6.21$, $p < .001$. Trajectory increased with age, $F(4, 107.81) = 7.47$, $p < .001$. Trajectory increased from ages 9 to age 10, $z = 2.68$, $p < .05$. The interaction between the two variables was significant, $F(8, 2416.93) = 6.48$, $p < .001$. Multiple comparisons revealed that trajectory was shorter for Pointing than the Control condition at age 6, $t(2427.07) = -6.03$, $p < .001$; age 8, $t(2427.05) = -8.58$, $p < .001$; age 9, $t(2427.06) = -5.61$, $p < .001$; and age 10 $t(2427.10) = -9.58$, $p < .001$. Trajectory was shorter for Rotation than the Control condition at most ages: age 6, $t(2427.08) = -4.03$, $p < .001$; age 8, $t(2427.13) = -3.89$, $p < .001$; age 9, $t(2427.46) = -2.85$, $p < .05$; and age 10, $t(2427.06) = -2.51$, $p < .05$. Dysfluency was higher for Rotation than Pointing at age 8, $t(2427.26) = 4.65$, $p < .001$; age 9, $t(2427.59) = 2.69$, $p < .05$; and age 10, $t(2427.09) = 7.10$, $p < .001$.

In further analyses we quantified the percentage of trajectory increase. For the younger children, the trajectory increased 21% in the Pointing, 22% in Rotation, and 27% in Control conditions. For the older children, the trajectory increased 17% in the Pointing, 24% in Rotation, and 18% in Control conditions.

3.5. Mean velocity

The effect of condition was not significant, $p = .30$. Mean velocity increased with age, $F(4, 107.83) = 25.95$, $p < .001$. It increased from age 7 to age 8, $z = 3.59$, $p < .01$; from age 9 to age 10, $z = 3.32$, $p < .01$. The interaction between the two variables was significant, $F(4, 1582.83) = 3.62$, $p < .01$. Multiple comparisons revealed that mean velocity was higher for Pointing than the Rotation condition at age 6, $t(2436.22) = 3.21$, $p < .01$; for age 7 the differences failed to reach significance, $t(2436.06) = 2.24$, $p = .06$.

In further analyses we quantified the percentage of mean velocity increase. For the younger children, the mean velocity increased 76% in the Pointing, 88% in Rotation, and 90% in Control conditions. For the older children, the mean velocity increased 37% in the Pointing, 44% in Rotation, and 45% in Control conditions.

3.6. Maximal velocity

The effect of condition was significant, $F(2, 2430.95) = 180.16$, $p < .001$. There were no significant differences between Pointing and the Control conditions, $p = .9$. Maximal velocity for Pointing and the Control conditions was higher than for Rotation, $z = 16.63$, $p < .001$ and $z = -16.23$, $p < .001$, respectively. Maximal velocity increased with age, $F(4, 107.87) = 28.13$, $p < .001$. It increased from ages 7 to 8, $z = 3.60$, $p < .01$; and from ages 9 to 10, $z = 2.96$, $p < .05$. The interaction between the two variables was not significant, $p = .22$.

In further analyses we quantified the percentage of maximal velocity increase. For the younger children, the maximal velocity increased 85% in the Pointing, 92% in Rotation, and 100% in Control conditions. For the older children, the age 10 children presented a 40% increase in the Pointing, 52% increase in Rotation, and 44% increase in Control conditions.

3.7. Minimal velocity

The effect of condition was significant, $F(2, 2419.87) = 898.46$, $p < .001$. Minimal velocities were lower for Pointing than the Control condition, $z = -3.84$, $p < .001$; they were lower for Pointing than Rotation, $z = -36.99$, $p < .001$; and they were higher for Rotation than the Control condition, $z = 33.16$, $p < .001$. Minimal velocities increased with age, $F(4, 107.63) = 16.51$, $p < .001$. Minimal velocities increased from ages 7 to age 8, $z = 2.77$, $p < .05$; and from ages 9 to age 10, $z = 4.01$, $p < .001$. The interaction between the two variables was significant, $F(8, 2419.87) = 15.34$, $p < .01$. Multiple comparisons revealed that minimal velocities were lower for Pointing than the Control condition at age 9, $t(2430.20) = -4.35$, $p < .001$; and age 10, $t(2430.37) = -2.96$, $p < .01$. Minimal velocities were higher for Rotation than the Control condition at all ages: age 6, $t(2430.22) = 11.88$, $p < .001$; age 7, $t(2430.18) = 12.18$, $p < .001$; age 8, $t(2430.12) = 16.47$, $p < .001$; age 9, $t(2430.09) = 18.55$, $p < .001$; and age 10, $t(2430.17) = 17.45$, $p < .001$. Minimal velocities were higher for Rotation than Pointing at all ages: age 6, $t(2430.38) = 13.14$, $p < .001$; age 7, $t(2430.21) = 12.21$, $p < .001$; age 8, $t(2430.06) = 16.77$, $p < .001$; age 9, $t(2430.08) = 22.96$, $p < .001$; and age 10, $t(2430.75) = 20.32$, $p < .001$.

In further analyses we quantified the percentage of minimal velocity increase. For the younger children, the maximal velocity increased 45% in the Pointing, 70% in Rotation, and 38% in Control conditions. For the older children, the minimal velocity increased 35% in the Pointing, 43% increase in Rotation, and 49% increase in Control conditions.

4. Discussion

Learning how to write letters is one of the basic skills of writing acquisition. The goal of this study was to examine how letter production is acquired and evolves as children practice writing. By simple observation, we can clearly see that the 26 letters of the alphabet are not all equally easy or difficult to write. Letters requiring many pointing and rotation movements seem to be more cognitively demanding. Pointing movements require in-air movements and, while having the pen in the air, the child has to calculate the precise location within the letter where the pen has to land to start the next stroke. Rotation movements require a different kind of movement control. They are demanding because the curved lines need precision in order to be geometrically regular. This experiment was designed to observe the impact of these kinds of movements on letter production. The children wrote pseudo-words in upper-case letters on a digitizer. These letter sequences varied in number of rotation and pointing movements but had the same number of strokes. We observed that pointing and rotation movements affected letter production in different ways. Pointing movements essentially affected writing time by decreasing duration. Rotation movements instead, rendered letter production more dysfluent and affected velocity control. We also observed that the period of automation for letter writing starts at age 8.

4.1. The impact of pointing movements on letter production

The comparison between the pointing and control conditions indicated that the presence of more pointing movements in the letter sequences systematically decreased movement duration while writing. This was accompanied by a movement duration increase when the hand was in the air. This pattern of results reveals that there is a duration trade-off between movement on surface and movement in-air. It seems as though the on-surface movement is shortened to compensate for the additional time generated by the in-air movement. This suggests there is a sort of *tempo* for letter production that must be respected somehow, even when producing letters that are cognitively demanding as the ones that require pointing movements. One way of keeping letter duration stable is to increase movement speed, as it is observed in isochronic behavior (Viviani & Flash, 1995). Globally, the velocity data do not seem to support this idea because the speed differences between the pointing and control conditions did not reach significance. Mean velocity or maximal and minimal speed were equivalent in both conditions. When considering the learning process in two phases, we observed that at the beginning of writing acquisition (i.e., from 6 to 8 years old) mean velocity and maximal speed did not increase at the same pace for the pointing and control conditions. The mean velocity increase was substantial in both conditions (76 and 90%, respectively). However, it was 14% higher in the control than the pointing condition. Likewise, the evolution of the maximal velocity was 15% higher in the control than the pointing condition. In the second phase of the learning process, from ages 8 to 10, mean velocity continued to increase, but in a less pronounced manner (37% for pointing and 45% in the control condition). At this stage, the differences between the two conditions were very slight.

The dysfluency data also point to smoother movements in the pointing than the control condition. In the pointing condition the letters were all made up of straight lines whereas in the control condition there were some letters with rotation movements. This could explain the dysfluency differences, but it is unlikely because it would have shown at all ages and not just in three groups (ages 6, 8 and 10). Taken together, it seems that the need for an in-air pointing movement results in a general dysfluency decrease in the first movement that is done on the surface of the digitizer. In line with these results, the on-surface trajectory of the letters for pointing was also shorter than in the control condition. Since the same pattern of results was observed throughout all ages, it seems that this kind of compensatory behavior was already functional from the beginning of the acquisition period.

The general movement duration and dysfluency decrease could be due to the anticipatory character of writing behavior (Orliaguet & Boë, 1990 for adults; Kandel & Perret, 2015a for children). In other words, while the children were producing the movement on the surface of the digitizer they were anticipating the production of the in-air movement for pointing. Kandel & Perret (2015a) presented

data indicating that at ages 9–10 the children have proficiency in motor anticipation in handwriting. This could explain why the 9 and 10 year-old children produced lower minimal velocity in the pointing condition than the control condition. This is in line with Desmurget et al. (2005) who suggested that pointing movements are not restricted to ballistic movements. Target-reaching requires a correction phase. There is an on-line mechanism that considers the characteristics of the target and adapts the movement to be able to reach it. For the 6 and 7 year-old children this mechanism does not seem to be completely efficient yet.

4.2. The impact of rotation movements on letter production

The comparison between the rotation and control conditions revealed that the writing movements to produce curved lines are more dysfluent than the ones to produce straight lines. This dysfluency difference was mainly observed for the children between ages 8 and 10. The movements for rotation were 7% more dysfluent than in the control condition. This dysfluency did not systematically increase duration. Globally, mean velocity was equivalent for the rotation and control conditions. However, the analyses indicated that the maximal speed was lower but the minimal speed was systematically higher in the rotation condition. As for duration in pointing movements, there seems to be a trade-off for velocity in rotation movements. This pattern of results suggests that there would be a sort of compensation between maximal and minimal velocity. This idea is reinforced by the fluctuation of minimal and maximal velocity observed during the two phases of writing acquisition. For the younger children, the maximal velocity in the rotation condition increased 92% and 70% in minimal velocity. In the control condition, maximal velocity increased 100% but only 38% for minimal velocity. So there was a small difference in maximal velocity (8%) but an important difference in minimal velocity (32% higher for rotation than the control condition). These important differences were not observed for the older children. The maximal velocity in the rotation condition increased 52% and 43% in minimal velocity. In the control condition, maximal and minimal velocity increased 44% and 49% respectively. This means that for the 8–10 year old children, the maximal velocity was 8% higher and the minimal velocity 6% lower in the rotation than the control condition. This tendency to decrease differences between accelerations and decelerations would render the writing movements more smooth and fluent. Reducing velocity variability and rendering it more stable would allow for better movement control when tracing curved lines. Finally, the results also revealed that the trajectory in the rotation condition was globally shorter than the control condition.

In sum, the results point to an increase in dysfluency when producing letters with curved lines. This is also accompanied by a significant decrease in maximal velocity. This suggests that the children limit the ballistic component of movement production and privilege sensory-motor feedback. However, the global *tempo* of letter production seems to be respected because producing curved letters does not increase movement duration. This suggests a different way of organizing movement production. Producing curved lines generates a decrease in maximal velocity but it does not show globally as a mean velocity difference because minimal and maximal velocity compensate for one another. This decrease could be linked to a functional relation between curvature and movement speed that has been observed extensively in previous research (Binet & Courtier, 1893; Fitts, 1954; Viviani & Terzuolo, 1982).

4.3. Comparing pointing and rotation movements

We observed that writing duration was longer for rotation than pointing movements from ages 6 to 8. At ages 9 and 10 movement duration differences were very slight and no longer reached significance. The inverse pattern was observed for trajectory. At ages 6–7 the trajectories were equivalent for pointing and rotation movements. From 8 to 10 years-old the trajectories in the rotation condition were longer than in the pointing condition. This suggests that there was a general improvement of movement control at age 8. Movement *control* improved probably because the timing differences disappeared. Movement *precision* improved because the trajectory for pointing movements decreased. This is in line with previous research indicating that movement automation starts at age 8 (e.g., Mojet, 1991; Kandel & Perret, 2015a,b; Séraphin-Thibon et al., 2017). Furthermore, at the beginning of the acquisition period the letters in the rotation condition seemed to require more movement control than in the pointing condition. Rotation movements seemed to be more cognitively demanding than the ones that are made of sequences of straight lines. This idea is reinforced by the fact that at all ages letter writing was more dysfluent in the rotation than the pointing conditions. Moreover, the maximal velocities were systematically higher in the pointing than the rotation condition. In addition, the minimal velocities were lower for pointing than for rotation. Rotation movements may also be slowed down because curved lines involve friction, both of the hand on the paper and of the pen on the paper, neither of which obtain in the pointing movement.

It is also noteworthy that the differences between pointing and rotation movements were more pronounced for the older children. At the beginning of the learning process, there were only speed differences between the two conditions. Mean velocity, maximum and minimum velocity increases were higher in the rotation than the pointing condition. At the end of elementary school, pointing and rotation movements not only differed in speed parameters but also on in-air duration and trajectory.

4.4. The evolution of letter production

In this last section we would like to comment the age effect, which was significant for all the measures irrespective of condition. We observed two periods during elementary school. The first one concerned the children through ages 6 to 7 and the second one from 8 to 10. For the younger children there was a decrease in movement duration –on-surface and in-air– and dysfluency. These measures remained stable for the older children. The velocity analyses also point to a turning point when the children are 8 years old. Mean velocity, maximal and minimal velocities increased at age 8, then remained stable from 8 to 9 and then increased again at age 10.

These periods of stability suggest that the period of automation for letter writing starts at age 8. It seems as though the acquisition period extends from ages 6 to 7. Then, the children become proficient on letter writing at age 8. There is a period of stabilization from 8 to 9 years-old in which the children practice letter writing to improve proficiency. Full proficiency at age 10 will lead to automation. When the writing movements become fully automatic, writing speed increases. This is the reason why we conducted further analyses to quantify the percentage of increase or decrease of each measure for the younger children (ages 6–8) and the older ones (ages 8–10). Globally, the data revealed that writing automation resulted in a 40% duration decrease, a 47% movement dysfluency decrease and a 162% speed increase.

The pattern of results of the present study are in line with several experiments on writing acquisition (Meulenbroek & van Galen, 1988; Meulenbroek & van Galen, 1989a; Mojet, 1991; Zesiger, Mounoud, & Hauert, 1993; Kandel & Perret, 2015a,b; Séraphin-Thibon et al., 2017). There is a clear improvement in movement control at 8 years-old that constitutes the beginning of automation in letter writing. The fact that the control of writing movements starts to become more efficient does not mean that the movements are fully automatic. It does mean that the children have the ability to control their movements and are proficient in letter writing. At this stage of the learning process the children become progressively faster and their movements smoother. Full automation is achieved when the children are able to increase movement velocity and be more precise.

This non-linear evolution could also be related to changes in motor control. Meulenbroek and van Galen (1986), Meulenbroek and van Galen (1988) observed that at around ages 8–9 there was a decline in several measures. They accounted for this decline by arguing that the younger children tend to privilege proactive control and ballistic movements. A decline in speed and movement fluency at around 8 years old would be due to the introduction of sensory-motor feedback. The objective of this change of movement control strategy would be to render movements more precise. Once the children can control proactive strategies with sensory-motor feedback, there would be an increase in all the measures and the writing movements would be fully automatic. Although this explanation is appealing, it does not fully account for our data because we did not observe a decline in any measure. Moreover, the empirical evidence presented by Mojet (1991) as well as Zesiger (1995) failed to confirm the decline at ages 8–9. We believe that explanations in terms of neuro-motor maturation (see Halsband & Lange, 2006 for a review; Marcelli & Cohen 2012) or decrease of cognitive load are more likely. This idea is supported by research on pointing movements (Pellizzer & Hauert, 1996; Ferrel et al., 2001) indicating quantitative and qualitative changes in movement regulation. Further research should be conducted to gain more understanding on the changes that take place at ages 8–9.

5. Conclusion

We observed that the acquisition of letter writing generally occurs between ages 6 and 7. At 8 years old, the children shift focus to improving movement control. This period marks the beginning of writing automation. Full automation seems to be achieved around age 10, when the children can speed up their movements. This study also sheds some light on the organization of movement control for letter writing. We observed a global tendency to keep stability in the *tempo* of writing for all the letters irrespective of their individual characteristics and at all ages. Pointing movements were organized in such a way that a decrease of the on surface movement duration compensated for the duration increase generated by the in-air movement. Likewise, we observed that the rotation movements to write letters with curved lines were produced with low maximal velocity but this was compensated by a higher minimal velocity. In sum, both pointing and rotation movements require compensatory strategies in specific kinematic variables: pointing movements require a duration trade-off whereas rotation movements present a trade-off on velocity.

Our results find direct application in the classroom for handwriting intervention. We observed that the *learning period* for pointing and rotation movements extends from 6 to 7 years-old. During this period, the children must understand that this kind of writing movements should respect a precise tempo. This requires regulating duration and speed, which is extremely hard to do because the movements are hard to control. Handwriting intervention should therefore focus on setting the idea of a "tempo" for writing. This can be done by associating hand clapping to specific writing movements. For example, one could imagine a game consisting of writing letters in the air and instructing the children to clap every time they have to start a line in a new position, like in pointing movements. The tempo idea could be extended to music rhythms. Specific songs can "mimic" rotation and pointing movements. Rhythm changes could, for example, illustrate changes in rotation direction (e.g., like the ones in letter S) which are particularly difficult for the age 6 children. From age 8 on, handwriting intervention should be devoted to making the children practice writing gestures as much as they can. Repeated writing activities improve movement control and consolidate compensating strategies for pointing and rotation movements. This leads to an increase in writing speed. This is essential for efficient writing. Efficient writing refers to an essential aspect of writing automation. It involves a compromise between readability and writing speed.

Finally, these findings can be linked to a recurrent debate in educational policies regarding writing style. Do the children learn better how to write in print or cursive style? There is yet no clear-cut answer on this issue. Bara and Morin (2009) for example examined this question and did not reach a convincing conclusion. Perhaps the reason is that print requires more pointing movements and cursive handwriting more rotation movements. In other words, both writing styles require the proficiency of compensatory behaviors that start to become automatic around 8 years-old.

Acknowledgments

We are extremely grateful to the Directrice Académique de l'Education Nationale de l'Isère, school directors and teachers for their precious collaboration in the experimental part of this study. We acknowledge financial support from the Agence Nationale de la Recherche (grant ANR ECRIRE 14-C30- 0013-01) attributed to Sonia Kandel.

Appendix A

Number of strokes per letter. Rotation: indicates the number of strokes that are rotation movements. Pointing: indicates the number of in-air pointing movements that are required to produce the letter; the in-air movements are not counted as strokes.

Letter	Strokes	Rotation	Pointing
A	3	0	1
B	5	2	1
C	2	1	0
D	3	1	1
E	4	0	2
F	3	0	2
G	3	1	1
H	3	0	2
I	1	0	2
J	2	1	1
K	3	0	2
L	2	0	0
M	4	0	0
N	4	0	0
O	2	2	0
P	3	1	1
Q	3	2	1
R	4	1	1
S	3	2	0
T	2	0	1
U	2	1	0
V	2	0	0
W	4	0	0
X	2	0	1
Y	2	0	1
Z	3	0	0

Appendix B

Non-words used in the Pointing, Rotation and Control conditions. Rotation: indicates the number of strokes that are rotation movements. Pointing: indicates the number of in-air pointing movements that are required to produce the letter. All the non-words were made up of 14 strokes. The font presented in the table is the one that was presented on the screen.

Pointing condition			Rotation condition			Control control		
	Rotation	Pointing		Rotation	Pointing		Rotation	Pointing
FAXET	0	7	RUGOS	7	1	ZAVUM	1	1
TEFAX	0	7	ROGUS	7	1	VUZAM	1	1
TAXEF	0	7	SOGUR	7	1	MAVUZ	1	1
FEXAT	0	7	GUSOR	7	1	ZUVAM	1	1
ATAXE	0	6	UBOSO	9	1	AMUVA	1	2
AXETA	0	6	USOBO	9	1	UVAMA	1	2
ETAXA	0	6	OSOBU	9	1	UMALA	1	2
ATEXA	0	6	OSUBO	9	1	ALAMU	1	2

References

Adi-Japha, E., & Freeman, N. H. (2001). Development of differentiation between writing and drawing systems. *Developmental Psychology, 37*(1), 101–114.

Ajuriaguerra, J. (de), Auzias, M., Coumes, I., Lavondes-Monod, V., Perron, R., & Stambak, M. (1964). L'écriture de l'enfant: Vol. 1. L'évolution de l'écriture et ses difficultés. Paris: Delachaux et Niestlé.

Atkinson, J. (1989). New tests of vision screening and assessment in infants and young children. In J. H. French, S. Harel, & P. Casaer (Eds.). *Child neurology and development disabilities* (pp. 219–227). Baltimore, MD: Paul H. Brookes Publishi.

Bara, F., & Bonneton-Botte, N. (2015). Est-il nécessaire d'enseigner le sens du tracé des lettres en capitale d'imprimerie en maternelle? *A.N.A.E. 139*, 583–592.

Bara, F., & Morin, M.-F. (2009). Est-il nécessaire d'enseigner l'écriture script en première année ? Les effets du style d'écriture sur le lien lecture/écriture. *Nouveaux C@hiers de La Recherche En Éducation, 12*(2), 149.
Bard, C., Hay, L., & Fleury, M. (1990). Timing and accuracy of visually directed movements in children: Control of direction and amplitude components. *Journal of Experimental Child Psychology, 50*(1), 102–118.
Bates, D., Maechler, M., & Bolker, B. (2011). lme4: Linear mixed-effects models using S4 classes. R package.
Bernstein, N. (1967). *The coordination and regulation of movement.* London: Pergamon Press.
Binet, A., & Courtier, J. (1893). Sur la vitesse des mouvements graphiques. Revue Philosophique de la France et de l'Etranger, 35, juin, 664–671.
Brenneman, K., Massey, C., Machado, S. F., & Gelman, R. (1996). Young children's plans differ for writing and drawing. *Cognitive Development, 11*, 397–419.
Bruner, J. S. (1971). *The relevance of education.* New York: Norton.
Chartrel, E., & Vinter, A. (2004). L'écriture: Une activité longue et complexe à acquérir. *Approche Neuropsychologique de l'Apprentissage 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.
Danna, J., Enderli, F., Athènes, S., & Zanone, P. G. (2012). Motor coordination dynamics underlying graphic motion in 7- to 11-year-old children. *Journal of Experimental Child Psychology, 111*(1), 37–51.
Danna, J., & Velay, J. L. (2015). Basic and supplementary sensory feedback in handwriting. *Frontiers in Psychology, 6*, 169.
Deiber, M., Wise, S. P., Honda, M., Catalan, M. J., Grafman, J., & Hallett, M. (1997). Frontal and parietal networks for conditional motor learning: A positron emission tomography study. *Journal of Neurophysiology,* 977–991.
Desmurget, M., Turner, R. S., Prablanc, C., Russo, G. S., Alexander, G. E., & Grafton, S. T. (2005). Updating target location at the end of an orienting saccade affects the characteristics of simple point-to-point movements. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance, 31*(6), 1510–1536.
Dounskaia, N., Van Gemmert, A. W., & Stelmach, G. E. (2000). Interjoint coordination during handwriting-like movements. *Experimental Brain Research, 135*(1), 127–140.
Edelman, S., & Flash, T. (1987). A model of handwriting. *Biological Cybernetics, 57*(1–2), 25–36.
Feder, K. P., & Majnemer, A. (2007). Handwriting development, competency, and intervention. *Developmental Medicine and Child Neurology, 49*(4), 312–317.
Ferrel, C., Bard, C., & Fleury, M. (2001). Coordination in childhood: Modifications of visuomotor representations in 6- to 11-year-old children. *Experimental Brain Research, 138*(3), 313–321.
Fitts, P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology, 47*(6), 381–391.
Goodnow, J. J., & Levine, R. A. (1973). "The grammar of action": In children's sequence and syntax. *Cognitive Psychology, 98*(4), 82–98.
Goodnow, J. J. (1986). Cognitive and other factors in reading and writing with words and pictures. In M. Fisher, & D. Wrolstad (Eds.). *Towards a new understanding of literacy*. New York: Praeger Publishers.
Grossberg, S., & Paine, R. W. (2000). A neural model of cortico-cerebellar interactions during attentive imitation and predictive learning of sequential handwriting movements. *Neural Networks, 13*(8–9), 999–1046.
Guinet, E., & Kandel, S. (2010). Ductus: A software package for the study of handwriting production. *Behavior Research Methods, 42*(1), 326–332.
Halsband, U., & Lange, R. K. (2006). Motor learning in man: A review of functional and clinical studies. *Journal of Physiology, 99*(4–6), 414–424.
Kandel, S., & Perret, C. (2015). How do movements to produce letters become automatic during writing acquisition? Investigating the development of motor anticipation. *International Journal of Behavioral Development, 39*(2), 113–120.
Kandel, S., & Perret, C. (2015). How does the interaction between spelling and motor processes build up during writing acquisition? *Cognition, 136*, 325–336.
Karmiloff-Smith, A. (1992). *Beyond modularity: A developmental perspective in cognitive science.* Cambridge, MA: MIT Press.
Kelso, J. S. (1982). The process approach to understanding human motor behavior: An introduction. *Human motor behavior: An introduction*(pp. 3–19). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
Klein, S., Guiltner, V., Sollereder, P., & Cui, Y. (2011). Relationships between fine-motor, visual-motor, and visual perception scores and handwriting legibility and speed. *Physical & Occupational Therapy in Pediatrics, 31*(1), 103–114.
Lavine, L. O. (1977). Differentation of letter-like forms in pre-reading children. *Developmental Psychology, 13*, 89–94.
Marcelli, D., & Cohen, D. (2012). *Enfance et Psychopathologie* (9e éd). Paris: Masson.
Marquardt, C., Gentz, W., & Mai, N. (1996). On the role of vision in skilled handwriting. In M. L. Simner, G. Leedham, & A. J. W. M. Thomassen (Eds.). *Handwriting and drawing research*(pp. 87–97). Amsterdam: IOS Press.
Marquardt, C., Gentz, W., & Mai, N. (1999). Visual control of automated handwriting movements. *Experimental Brain Research, 128*(1–2), 224–228.
Marr, D., Cermak, S., Cohn, E. S., & Henderson, A. (2003). Fine motor activities in Head Start and kindergarten classrooms. *American Journal of Occupational Therapy, 57*(5), 550–557.
Meulenbroek, R. G. J., & van Galen, G. P. (1986). Movement analysis of repetitive behaviour of first, second and third grade primary school children. In H. S. Kao, G. P. Van Galen, & R. Hoosain (Eds.). *Graphonomics: 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. (1989a). 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. 105–118). Singapore: World Scientific.
Meulenbroek, R. G. J., & Van Galen, G. P. (1989b). Variations in cursive handwriting performance as a function of handedness hand posture and gender. *Journal of Human Movement Studies, 16*(5), 239–254.
Meulenbroek, R. G., & Van Galen, G. P. (1990). Perceptual-motor complexity of printed and cursive letters. *Journal of Experimental Education, 58*(2), 95–110.
Meulenbroek, R. G. J., Vinter, a, & Mounoud, P (1993). Development of the start-rotation principle in circle production. *British Journal of Developmental Psychology, 11*, 307–320.
Ministère de l'Education Nationale (2015). EduSCOL. L'écriture à la Maternelle: la forme des lettres. *Ressources maternelles, graphisme et écriture*. [Online] http://media.education.gouv.fr/file/Ecriture/43/5/Ress_c1_Ecriture_forme-lettres_456435.pdf.
Mojet, W. (1991). Characteristics of developing handwriting skills in elementary education. In J. Wann, A. Wing, & N. Sovik (Eds.). *Development of graphic skills* (pp. 53–75). London: Academic Press.
Olive, T., & Piolat, A. (2002). Suppressing visual feedback in written composition: Effects on processing demands and coordination of the writing processes. *International Journal of Psychology, 37*(4), 209–218.
Orliaguet, J.-P., & Boë, L.-J. (1990). Régulation temporelle des mouvements d'écriture en fonction des contraintes spatiales. In V. Nougier, & J. P. Blanchi (Eds.). *Pratiques sportives et modélisation du geste*(pp. 163–177). Grenoble: Grenoble Sciences.
Pellizzer, G., & Hauert, C. A. (1996). Visuo-manual aiming movements in 6- to 10-year-Old children: evidence for an asymmetric and asynchronous development of information processes. *Brain and Cognition, 30*(30), 175–193.
Petersen, S. E., Corbetta, M., Miezin, F. M., & Shulman, G. L. (1994). PET studies of parietal involvement in spatial attention: comparison of different task types. *Canadian Journal of Experimental Psychology, 48*(2), 319.
Rabiner, L. R., & Gold, B. (1975). *Theory and application of digital signal processing.* Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
Rosenblum, S. (2003). The in air phenomenon: Temporal and spatial correlates of the handwriting process. *Perceptual and Motor Skills, 96*(3), 933.
Rueckriegel, S. M., Blankenburg, F., Burghardt, R., Ehrlich, S., Henze, G., Mergl, R., & Hernáiz Driever, P. (2008). Influence of age and movement complexity on kinematic hand movement parameters in childhood and adolescence. *International Journal of Developmental Neuroscience, 26*(7), 655–663.
Russell, V. L., & Hervé, M. (2015). lsmeans: Least-Squares Means. R package version 2.16. [On line] http://CRAN.R-project.org/package=lsmeans.
Santangelo, T., & Graham, S. (2016). A comprehensive meta-analysis of handwriting instruction. *Educational Psychology Review, 28*(2), 225–265.
Satterthwaite, F. E. (1941). Synthesis of variance. *Psychometrika, 6*(5), 309–316.
Séraphin Thibon, L., Gerber, S. & Kandel, S. (in press). Analyzing variability in upper-case letter production in adults. In: C. Perret & T. Olive (eds.). Studies in Writing. NL: Brill Editions.

Séraphin-Thibon, L., Gerber, S., Kandel, S. (2017, published on-line). Learning how to write letters: The elaboration of motor programs for handwriting movement automation. *Acta Psychologica*.

Shadmehr, R., & Mussa-Ivaldi, F. A. (1994). Adaptive representation of dynamics during learning of a motor task. *The Journal of Neuroscience, 14*(5), 3208–3224.

Teulings, H. L. (1996). Handwriting movement control. In S. W. Keele, & H. Heuer (Vol. Eds.), *Motor Skills: . Vol. 2. Handbook of perception and action* (pp. 561–613). London: Academic Press.

Thomassen, A. J., & Teulings, H. L. (1985). Time, size and shape in handwriting: Exploring spatio-temporal relationships at different levels. *Time, mind, and behavior* (pp. 253–263). Berlin Heidelberg: Springer.

Tolchinsky-Landsmann, L. (2003). *The cradle of culture and what children know about writing and numbers before being taught.* Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Van Sommers, P. (1984). *Drawing and cognition: Descriptive and experimental studies of graphic production processes.* Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Vinter, A. (1994). Hierarchy between graphic production rules in the drawing of elementary figures. In C. Faure, P. Keuss, G. Lorette, & A. Vinter (Eds.). *Advances in handwriting and drawing: A multidisciplinary approach* (pp. 275–292). Paris: Europia.

Viviani, P., & Flash, T. (1995). Minimum-jerk, two-thirds power law, and isochrony: Converging approaches to movement planning. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 21*(1), 32.

Viviani, P., & Schneider, R. (1991). A developmental study of the relationship between geometry and kinematics in drawing movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 17*(1), 198–218.

Viviani, P., & Terzuolo, C. (1982). Trajectory determines movement dynamics. *Neuroscience, 7*(2), 431–437.

Wann, J. P. (1986). Handwriting disturbances: Developmental trends. In H. T. A. Whiting, & M. G. Wade (Eds.). *Themes in motor development* (pp. 207–226). Dordrecht: Nijhoff.

Wolpert, D. M., Ghahramani, Z., & Jordan, M. I. (1995). An internal model for sensorimotor integration. *Science, 269*, 1880–1882.

Zesiger, P. (1995). *Ecrire: Approches cognitive, neuropsychologique et développementale.* Paris: Presse Universitaires de France.

Zesiger, P., Mounoud, P., & Hauert, C. A. (1993). Effects of lexicality and trigram frequency on handwriting production in children and adults. *Acta Psychologica, 82*(1–3), 353–365.

DISCUSSION GÉNÉRALE

CHAPITRE 8

Discussion, limites et perspectives

Ce travail doctoral avait pour but d'approfondir nos connaissances sur la mise en place des processus d'automatisation des mouvements d'écriture chez l'enfant à l'école élémentaire. Comme toute activité motrice, le processus d'écriture débute par l'activation des programmes moteurs. Les travaux sur la production de l'écriture chez l'adulte ont décrit ces programmes moteurs comme des mémoires procédurales contenant des informations sur la forme de la lettre, l'ordre et la direction des strokes. L'objectif de la première étude que nous avons réalisée était de comprendre comment les programmes moteurs seraient élaborés dans la période du développement entre 6 à 9 ans. Nous avons focalisé notre attention sur l'augmentation progressive du nombre de strokes susceptibles d'être stockés en mémoire. Puis, nous avons réalisé une étude descriptive chez l'adulte qui visait à déceler des patterns de traçage de lettres de l'alphabet en termes de production de strokes et de mouvements en l'air ainsi qu'à évaluer la variabilité inter-individuelle des gestes d'écriture. Cela nous a permis de dégager un certain nombre d'éléments qui restent constants dans la production de lettres malgré les différences inter-individuelles dans l'exécution des gestes. Ces constantes peuvent être considérées comme faisant partie de la « grammaire de l'action » enseignée à l'école pendant les premières années lors de l'apprentissage de l'écriture et maintenues dans les programmes moteurs à l'état « stable » chez l'adulte. Ces programmes moteurs sont le résultat de l'intégration de cartes sensori-motrices qui, peu à peu, grâce aux retours visuo-kinesthésiques vont s'enrichir et permettre, aux mouvements générés, de devenir fluides, automatiques et de produire les formes de lettres souhaitées. La troisième étude visait à comprendre comment s'élaboraient les cartes sensori-motrices pour des gestes particulièrement coûteux pour les enfants, en particulier au début du processus d'acquisition : les mouvements de rotation et de pointage.

8.1 Étude 1 : Étude de l'évolution de la taille des programmes moteurs des lettres

L'objectif de cette étude était de comprendre comment s'opérait l'évolution d'une stratégie de programmation stroke par stroke à une programmation de plusieurs strokes voire, d'une lettre entière, comme c'est le cas chez l'adulte (Teulings et al., 1983). Ces stratégies dépendent directement de la taille du programme moteur de chaque lettre. Des enfants de 6 à 9 ans ont reproduit des séquences écrites en lettres cursives, incluant des lettres qui variaient en complexité quant à leur nombre de strokes (de deux à cinq strokes). L'idée de cette

manipulation expérimentale était que si l'unité de programmation motrice était le stroke, comme l'observation sur le terrain auprès d'enfants de 5-6 ans l'indique, alors nous devions observer un impact du nombre de strokes sur les données cinématiques. Cet impact reflétant le coût cognitif engagé dans la production motrice, la durée et la dysfluence du mouvement, ainsi que la trajectoire devaient être plus importantes lors de la production de lettres qui ont plus de strokes. En revanche, si l'unité de programmation était la lettre, nous ne devions pas observer d'impact de l'augmentation du nombre de strokes, comme cela a été observé chez l'adulte (Teulings et al., 1983).

Les résultats ont mis en évidence une augmentation de la durée et de la dysfluence du mouvement en fonction du nombre de strokes chez les enfants les plus jeunes, entre 6 et 7 ans. L'impact du nombre de strokes des lettres était moins important pour les enfants de 8 et 9 ans. La vitesse moyenne a diminué principalement au passage de deux à trois strokes pour tous les âges, mais l'impact de l'augmentation du nombre de strokes est aussi plus important chez les plus jeunes. La trajectoire semble être un indicateur moins sensible. Chez les enfants de 6 ans, nous avons observé une augmentation progressive de la trajectoire en fonction du nombre de strokes, mais à partir de 7 ans cet impact était beaucoup moins important.

Par ailleurs, il a été observé un effet principal de l'âge indiquant une diminution de la durée, du nombre de pics de vitesse et de la trajectoire entre 6 et 8 ans, avec une phase de stabilisation entre 8 et 9 ans. Les données sur la vitesse moyenne ont révélé une augmentation sensible entre 6 et 8 ans puis une stabilisation de ce paramètre entre 8 et 9 ans. Ceci laisse à penser qu'un début d'automatisation de la production motrice dans les tâches d'écriture se profile aux alentours de 8 ans, précédant une phase de stabilisation qui s'étale entre 8 et 9 ans. C'est aussi pendant cette période, qu'à l'école, l'écriture n'est plus considérée comme un objet d'apprentissage explicite mais devient un outil de communication langagière à part entière.

D'un point de vue descriptif, quelle que soit la complexité en nombre strokes de la lettre d'intérêt, les résultats nous ont renseignés sur la grande dispersion des données des enfants les plus jeunes (en particulier à 6 ans) sur les composantes cinématiques de l'écriture. Cela semble indiquer que l'élaboration des programmes moteurs est très variable en début d'apprentissage. A l'inverse, plus les enfants avançaient en âge et moins les données étaient hétérogènes. Ceci suggère qu'une fois que les programmes moteurs des lettres commenceraient à se stabiliser, les productions des enfants s'orienteraient plus vers une augmentation de la vitesse moyenne des mouvements. Ceci est confirmé par l'analyse en composantes principales, qui nous a permis de constater que l'évolution des indicateurs en fonction de l'âge obéissaient à une progression des

données cinématiques qui changeaient significativement entre 6 et 7 ans et se stabilisaient pour les 7-8 ans, accompagnée de peu de variabilité sur la composante spatiale à tous les âges.

Ces résultats fournissent ainsi des données empiriques qui mettent en évidence l'augmentation de la taille du programme moteur au cours du développement. Afin de produire des séquences motrices rapidement, une sélection préalable d'un regroupement moteur de petites unités motrices, permettrait d'en réduire le coût cognitif lors de son exécution (Bo & Seidler, 2009 ; Verwey, Shea & Wright, 2014). Ce processus qui, grâce à la pratique, consiste à regrouper en une seule carte sensori-motrice plusieurs éléments d'une séquence de mouvements, a été documenté en de nombreuses occasions (Jiménez, 2008 ; Koch & Hoffmann, 2000 ; Verwey, 1996). Dans le cadre de notre expérience, l'analyse des résultats a montré que les mesures de durée augmentaient proportionnellement moins vite chez les enfants à partir de 8 ans que chez les enfants de 6 ans. Cela suggère qu'à partir de 8 ans, les programmes moteurs des lettres regrouperaient plusieurs strokes. Ces chunks de strokes permettraient de réduire le temps entre les constituants des sous-séquences. Ce principe de chunking serait principalement acquis par la pratique et n'est pas spécifique à l'écriture. Il aurait pour conséquence une réduction de la durée et une augmentation de la fluidité (Verwey, 1994, 2001). Ceci semble confirmé par les résultats que nous avons obtenus sur le nombre de pics de vitesse qui ont progressé linéairement chez les enfants de 8 et 9 ans. Ce n'est pas le cas chez les plus jeunes où l'augmentation de la dysfluence était proportionnellement supérieure à celle des 8-9 ans, notamment pour les lettres de cinq strokes. En effet, les cartes sensori-motrices s'enrichiraient avec des chunks de strokes et pourraient alors être considérés comme des unités de traitement à part entière au fil de l'apprentissage. Les résultats ont révélé toutefois que les lettres les plus complexes, composées d'un nombre important de strokes, ne semblaient pas être programmées dans leur ensemble chez certains enfants. Il apparait, par exemple, que le nombre de strokes élevé de la lettre *Z* ne permettrait pas encore aux enfants de regrouper la totalité des segments.

Ces chunks de strokes seraient ainsi stockés dans la mémoire à long terme sous forme de programmes moteurs ou cartes sensori-motrices, comme le suggèrent Halsband et Lange, (2006). Autrement dit, il y aurait une étape entre le début et la fin de l'apprentissage de la production des lettres où les représentations motrices ne consisteraient pas en une collection de strokes, ni en une lettre entière, mais plutôt en un assemblage de plusieurs strokes en chunks. La récupération en mémoire bénéficierait alors, d'un gain de temps à leur initiation motrice. Mais il est probable qu'un deuxième mécanisme intervienne également dans la facilitation de la récupération des programmes moteurs au cours du développement. Il s'agit du processus de

« concaténation » (Verwey, 2001 ; Wright, Black, Immink, Brueckner & Magnuson, 2004). La concaténation semble être indispensable pour permettre une transition fluide entre les différents chunks moteurs. Ce processus, parallèle à celui du chunking, permettrait de réduire le délai entre les sous-séquences motrices regroupées. Comme pour l'anticipation (Kandel & Perret, 2015), c'est pendant la production de la sous-séquence en cours que se produirait la programmation de la sous-séquence suivante, réduisant ainsi le délai entre les deux sous-séquences. Grâce à la pratique, on pourrait observer une réduction du temps entre les sous-séquences notamment aux points de concaténation (point de liaison entre deux chunks). Si dans le cadre d'études sur l'apprentissage de séquence motrice telle l'écriture tapuscrite, le regroupement en chunks de quelques éléments d'une séquence motrice conduit à une exécution plus fluide et plus rapide des sous séquences ainsi produites (Verwey, 1994, 2001), la pratique permet également, un regroupement de plus en plus rapide et fluide des chunks eux-mêmes. Comme le soulignaient Teasdale et al. (1993) dans le cadre de l'écriture manuelle, grâce aux afférences sensori-motrices, la concaténation de programmes moteurs simples conduirait à une programmation motrice entièrement préparée. Ainsi une séquence motrice de deux lettres cursives (i.e. *ul*) pourrait non seulement bénéficier de chunks intra-lettres regroupant les strokes d'une lettre en une seule unité motrice, mais pourrait aussi conduire à une concaténation des deux chunks, permettant l'exécution plus rapide et plus fluide entre le *u* et le *l*. La durée d'écriture entre les deux lettres se verrait alors réduite. Ainsi, dans notre étude, les enfants les plus âgés, auraient peut-être non seulement regroupé les strokes en chunks, mais ils auraient probablement appliqué ce principe de concaténation entre les lettres. Rien ne permet néanmoins, au regard de nos résultats, de différencier, ce qui relève du processus du chunking seul, de celui qui relève de la concaténation seule.

Les résultats de notre étude ont indiqué par ailleurs que les grandes évolutions cinématiques dans la pratique grapho-motrice se dérouleraient sur une période qui s'étale entre 6 et 8 ans. En effet, l'écart des durées entre les classes d'âge s'est réduit principalement entre 6 et 8 ans et il n'était plus significatif entre 8 et 9 ans. Il en est de même avec le nombre de pics de vitesse car les plus grandes différences se sont exprimées entre 6 et 8 ans. À partir de 8 ans, il n'y avait plus de différence avec le nombre de pics de vitesse des enfants de 9 ans. Quant aux résultats sur la trajectoire, même s'ils semblent moins aisés à interpréter, il apparait qu'à partir de 7 ans le contrôle des paramètres spatiaux se stabiliserait. Pris ensemble, les résultats de cette étude vont dans le sens d'un début d'automatisation à partir de 8 ans précédant une phase stabilisatrice entre 8 et 9 ans. La programmation stroke par stroke évoluerait vers un processus

d'assemblage en unités plus larges, de l'ordre de plusieurs strokes, voire d'une lettre entière, prenant de l'ampleur à partir de 8 ans.

Pour résumer, cette étude a permis de mettre en évidence que la taille des programmes moteurs des lettres évoluerait du stroke vers la lettre entière en passant par une période où plusieurs strokes seraient regroupés en chunks. Notre expérience a permis par ailleurs de confirmer ce que de précédentes études avaient notifié, à savoir que l'apprentissage des lettres se ferait entre 6 et 7 ans, l'automatisation des mouvements d'écriture commencerait autour de 8 ans et se stabiliserait vers 9 ans. Nous regrettons ne pas avoir inclus dans notre étude un groupe d'adultes, dont les programmes moteurs sont stables. En effet, cela nous aurait permis d'obtenir des compléments d'informations sur la production des lettres cibles que nous avons utilisées comme matériel expérimental. Toutefois, nos résultats fournissent des données empiriques indiquant que l'automatisation de la production de l'écriture manuscrite n'est possible que lorsque les mouvements sont fluides, exercés sans effort, et ne requièrent qu'un minimum d'implication attentionnelle (Hasher & Zacks, 1979 ; Tucha, Mecklinger, Walitza & Lange, 2006 ; Tucha et al, 2008).

Nous avons également observé que la nature du type de stroke pouvait avoir un impact sur la manière dont la lettre est réalisée. En effet, nous avons constaté que certains types de lettres étaient plus difficiles à produire que d'autres, indépendamment de leur nombre de strokes. En particulier, la production de strokes à traits courbés nécessitant des mouvements de rotation, ont semblé poser plus des difficultés notamment chez les enfants les plus jeunes. De même, les mouvements de pointage, comme par exemple ceux exécutés pour placer le point sur la lettre *j*, étaient plus coûteux que les simples up-stroke et down-stroke du *l*. Nous avons donc décidé de réaliser une étude pour approfondir nos connaissances sur ces deux types de mouvements. Or, pour ce faire, nous avons dû faire une étude descriptive préalable pour construire un matériel expérimental très contrôlé au niveau du nombre de strokes. C'était le but de l'étude 2.

8.2 Étude 2 : Étude descriptive de la production de lettres majuscules chez l'adulte

Le deuxième objectif de ce travail doctoral, était de caractériser chacune des lettres de l'alphabet en termes de nombre de strokes et de nombre de mouvements en l'air, afin de constituer un matériel expérimental plus contrôlé dans l'étude suivante. Il s'agissait également

de mesurer l'impact de la présence ou pas de modèle d'écriture sur la production d'écriture de participants adultes. Pour ce faire, les participants ont été répartis en deux groupes. Un groupe devait reproduire les lettres de l'alphabet telles qu'elles apparaissaient à l'écran, en respectant le modèle ; l'autre groupe de participants, devait écrire ces mêmes lettres comme ils/elles avaient l'habitude de les écrire. Un comptage du nombre de strokes et du nombre de mouvements en l'air a été réalisé pour chaque lettre, ainsi qu'une comparaison statistique des graphiques de distribution entre les conditions de chacune des lettres.

Dans le cadre de l'analyse du nombre de strokes préférentiel et du nombre de mouvements en l'air pour chacune des lettres, nous avons considéré qu'un nombre d'observations dont le taux était supérieur à 75% correspondait à une configuration stable, un taux d'observation de plus de 50% correspondait à une configuration peu variable, un taux inférieur à 50% des observations correspondait à une configuration variable. Dans la condition avec modèle, 13 des 26 lettres (*C*, *H*, *I*, *K*, *L*, *S*, *T*, *U*, *V*, *W*, *X*, *Y*, *Z*), dépassaient le seuil des 75% pour une seule configuration en nombre de strokes. Dans la condition sans modèle, elles passaient à 7 lettres sur 26 (*L*, *T*, *U*, *V*, *W*, *X*, *Z*). Ces résultats laissent penser qu'une présentation du modèle engendre moins de variabilité quant aux nombres de strokes. Par ailleurs, 17 lettres ont été produites sans mouvement en l'air (*B*, *C*, *D*, *G*, *J*, *L*, *M*, *N*, *O*, *P*, *R*, *S*, *U*, *V*, *W*, *Z*) dans les deux conditions. Seules 23 à 26% des lettres sont produites avec un ou deux mouvements en l'air. Ce sont le plus souvent des lettres composées de lignes droites ou horizontales (*A*, *E*, *F*, *H*, *K*, *Q*, *T*, *Y*, *X*). La comparaison des distributions entre les deux conditions a indiqué que la plupart des lettres de l'alphabet sont produites, chez les adultes, avec le même nombre de strokes indépendamment des instructions de passation. Seules 5 lettres (*A*, *D*, *I*, *J*, *Y*) présentent de la variabilité selon la présentation d'un modèle ou pas.

Le comptage des strokes et des mouvements en l'air a fourni les informations nécessaires à la réalisation du corpus des pseudo-mots utilisé dans l'étude 3.

8.3 Étude 3 : Étude des mouvements de rotation et de pointage en écriture

L'objectif de cette étude était d'examiner si le type de mouvement d'écriture était appréhendé différemment au cours du développement et si la mise en place des automatismes moteurs pouvait en être affectée. Cette étude partait de l'observation sur le terrain des difficultés rencontrées par les enfants à tracer certaines lettres, et plus précisément, les lettres qui

nécessitaient des mouvements de pointage et/ou de rotation. Dans cette optique, nous avons élaboré des listes de pseudo-mots écrits en lettres majuscules d'imprimerie qui présentaient le même nombre de strokes mais qui variaient en nombre de mouvements de pointage et de rotation. Des enfants de 6 à 10 ans devaient reproduire les pseudo-mots sur une tablette digitalisante.

Ce travail nous a permis de déterminer en quoi les mouvements de pointage et de rotation pouvaient être couteux dans des tâches d'écriture chez les enfants. Pour les gestes de pointage, les durées d'écriture en surface de la tablette étaient inférieures aux durées des autres conditions (rotation et contrôle). Les durées des mouvements en l'air étaient logiquement supérieures à celles des autres conditions expérimentales. Cela suggère que la réduction de la durée d'écriture en surface compenserait la durée du mouvement en l'air. Ceci s'appuie également sur une réduction de la trajectoire, la vitesse moyenne ne présentant pas de différences entre les conditions.

Les résultats ont indiqué également que les gestes de rotation destinés à produire des lettres présentant des traits courbés avaient un impact surtout sur la vitesse du mouvement. Dans la condition Rotation, la vitesse maximale était toujours plus basse que dans la condition de contrôle. En contraste, les mouvements de rotation présentaient une vitesse minimale plus importante que dans la condition de contrôle. Afin d'assurer une rotation permettant de tracer la courbe tout en gardant une bonne rétroaction visuelle, les enfants auraient tendance à maintenir la vitesse du mouvement constante, en réduisant l'écart entre les maxima et les minima de vitesse. Ce contrôle, très important au niveau de la gestion de la vitesse, a été accompagné de beaucoup de dysfluence, traduite par les nombreux pics de vitesse lors de la production des courbures.

Nous avons observé que les mouvements de pointage favorisaient une large amplitude entre les vitesses maximales et minimales alors que les mouvements de rotation tendaient à minimiser cet écart afin de rendre la vitesse plus constante. Cette grande opposition entre vitesse maximale et minimale dans la condition Pointage, par rapport à la condition Rotation, peut être due au fait que ces pseudo-mots étaient constitués de lignes droites, favorisant ainsi la prise de vitesse et une réduction de vitesse plus importante pour arrêter le tracé. De plus, les durées d'écriture produites par les gestes de pointage sont plus courtes que les durées des mouvements de rotation. Il apparait donc des différences de production entre ses deux types de mouvements sur des composantes cinématiques distinctes. Cela semble illustrer l'existence de stratégies compensatoires spécifiques pour chacun des deux mouvements, mais élaborées dans le même

objectif, probablement celui imposé par le *tempo* de l'écriture. On peut penser que les participants tendent à garder un rythme d'écriture coïncidant avec un rythme « naturel » (Collier & Wright, 1995). Ce rythme naturel serait à concevoir comme une structure temporelle sous-jacente, inscrite dans les programmes moteurs, permettant la production de séquences de mouvements de façon plus confortable (Summers, Sargent & Hawkins, 1984).

Si la stratégie de maintien de vitesse constante des mouvements de rotation permet plus de rétroaction sensori-motrice, cette stratégie s'accompagne de plus de dysfluence que lors de la production de mouvement de pointage. Il semble donc, que les mouvements de rotation soient plus exigeants que ceux de pointage. Cette interprétation est renforcée par les données de la trajectoire qui nous indiquent que, malgré des valeurs équivalentes de longueur de tracé pour les deux types de mouvements chez les plus jeunes, la trajectoire des mouvements de pointage se réduit chez les enfants les plus âgés à partir de 8 ans. Cette réduction de trajectoire marque non seulement une amélioration de la précision du geste de pointage et le début de son automatisation, mais cela rend compte d'une maîtrise plus précoce pour les mouvements de pointage. Cela suggère que les programmes moteurs ne contiennent pas seulement des informations sur la forme de la lettre, de l'ordre et de la direction des strokes à produire (Van Galen, 1991) mais qu'ils détiennent également des informations en matière de gestion de la vitesse et de la durée en fonction des caractéristiques du mouvement à produire. Ceci constitue une des principales contributions de ce travail doctoral.

Comme pour l'étude 1, les résultats de ce travail sur les gestes de rotation et de pointage nous ont également permis de distinguer des « périodes » dans le processus d'acquisition de l'écriture. Il y aurait une amélioration des performances très importante en début de période d'acquisition (6-8 ans) par rapport à la fin de la période d'acquisition (8-10 ans). En effet, il a été observé une réduction plus importante de la durée d'écriture, du nombre de pics de vitesse et une augmentation plus importante de la vitesse moyenne chez les enfants les plus jeunes, ce qui permet de corroborer l'idée selon laquelle l'automatisation des mouvements d'écriture se met en place vers 8 ans. Entre 8 et 10 ans, une phase stabilisatrice permettrait d'asseoir les acquis. D'un point de vue développemental, l'évolution des données cinématiques présentent des paliers récurrents. Il apparait que, dans l'intervalle des 6-8 ans, l'évolution des performances est plus sensible. La durée d'écriture, le nombre de pics de vitesse, le nombre de mouvements en l'air, chutent environ deux fois plus que dans l'intervalle des 8-10 ans ; la vitesse moyenne augmente deux fois plus que dans l'intervalle des 8-10 ans. Entre 8 et 10 ans, l'évolution se poursuit avec des paliers de stabilisation ente 8 et 9 ans, notamment en ce qui concernent la

durée d'écriture, la vitesse moyenne, les maxima et minima de vitesse. Le nombre de pics de vitesse diminue régulièrement ainsi que le nombre de mouvements en l'air.

Notons enfin que nous n'avons pas observé de discontinuité dans l'évolution des données cinématiques, comme relevé par Meulenbroek et Van Galen (1986, 1988) dans une étude sur la production de l'écriture dans les mêmes tranches d'âge. Ces auteurs avaient relevé des déclins dans plusieurs mesures, dont la vitesse moyenne et la dysfluence. Pour notre part, nous avons observé des phases de stabilisation entre 8 et 9 ans sur ces mesures. Les phases de stabilisation nous semblent illustrer le fait que les jeunes apprenants assoient leurs acquis afin de les faire encore évoluer par la suite avec la pratique répétée de l'écriture. Nos résultats rejoignent donc ceux des études de Mojet (1991) ou de Zesiger et al. (1993), qui ne signalent pas de déclin.

Pour résumer, l'analyse des données a mis en exergue que les mouvements de pointage affectaient principalement la gestion de la *durée* des mouvements d'écriture : la durée d'écriture en surface était réduite par rapport à la condition de contrôle, alors que la durée des mouvements en l'air était plus importante. Les mouvements de rotation affectaient principalement la gestion de la *vitesse* des mouvements car ils étaient produits avec une vitesse maximale moins importante que dans la condition de contrôle et avec une vitesse minimale plus importante. Notons également que la production des mouvements de rotation produit plus de dysfluence que celles des mouvements de pointage, ce qui suggère que la gestion des gestes de rotation est plus coûteuse que celle exigée par le pointage, notamment pour les enfants les plus jeunes. En ligne avec les résultats de l'étude 1, nous constatons une période d'acquisition avec une évolution très importante des données cinématiques entre 6 et 7 ans. Le début de l'automatisation apparaît vers 8 ans, avec une stabilisation de certains paramètres. À partir de cet âge, l'automatisation semble se consolider, avec la plupart des données cinématiques qui restent invariables entre 9 et 10 ans.

L'approfondissement de l'analyse de nos données sur les mouvements de rotation et de pointage nous amène à proposer une évaluation différentielle de la difficulté des mouvements de rotation et de pointage. Nous ne nous attendions pas à faire état de stratégies compensatoires et encore moins à qu'elles se manifestent sur des versants différents selon le type de mouvement. Nous avons constaté que ces stratégies compensatoires au niveau de la durée et de la vitesse étaient à l'œuvre très tôt dans le développement, ce qui suggère que ces compensations permettraient de conserver le *tempo* ou le rythme de l'écriture, ce qui rendraient l'écriture plus régulière pour toutes les lettres. Ces constats apportent ainsi une vision

complémentaire aux études précédentes sur l'acquisition de l'écriture, qui n'ont, à notre connaissance, pas considéré la gestion du rythme de l'écriture comme une difficulté majeure dans le processus d'apprentissage. Cet aspect constitue une des contributions principales de cette thèse, qui peut avoir des applications pédagogiques directes en milieu scolaire.

Nous tenons également à remarquer que les résultats de ce travail montrent clairement la différence de traitement entre les mouvements de rotation et de pointage. Néanmoins, afin d'améliorer notre compréhension, il serait opportun de poursuivre l'analyse des données en catégorisant par type de lettres. En effet, rien ne dit que les deux mouvements de rotation du *O* sont de même nature que les deux mouvements de rotation de la lettre *B*. De même, rien ne permet de distinguer les mouvements de pointage du *T*, où le début du trait horizontal peut être variable sur la ligne (plus ou moins à droite ou à gauche), des mouvements de pointage du *F*, pour lesquels le début du tracé de chacun des traits horizontaux doit se faire obligatoirement sur le tracé du trait vertical, ce qui implique beaucoup plus de précision du fait de la présence d'un point d'ancrage (i.e., du point de départ du tracé du stroke). De plus, il serait important d'analyser les mouvements en l'air inter-lettre (cf. Lagarrigue, 2011). En effet, il est probable que la longueur du tracé en l'air inter-lettre de la fin d'un *O* (finissant en son sommet) à un début d'un *B* (débutant en son sommet) soit différente de celle du mouvement inter-lettre entre un *B* (finissant sur sa base) à un *O* (débutant en son sommet). Des analyses complémentaires permettraient d'affiner ces résultats. Enfin, comme nous l'avons signalé pour l'étude 1, l'analyse des tracés d'adultes nous aurait permis d'infirmer ou de confirmer l'existence de ces stratégies compensatoires que nous avons observées chez l'enfant. Une étude chez les scripteurs experts permettrait de déterminer si ces stratégies compensatoires sont intégrées dans les programmes moteurs comme automatiques ou si elles ne sont, chez les enfants, que temporaires dans une perspective d'acquisition de stratégies plus économiques et efficientes.

8.4 L'inhibition, un autre indicateur d'automatisation ?

Avant de clore ce manuscrit nous tenons à faire part d'une observation que nous avons faite tout au long du travail doctoral mais que nous n'avons pas pu étudier faute de temps. Elle constitue un des projets à venir. Il apparait que les capacités à inhiber un mouvement lors de la production de l'écriture soient un des éléments majeurs dans le processus d'automatisation des gestes. En d'autres termes, les enfants, notamment les plus jeunes, auraient des difficultés importantes à arrêter leurs mouvements en cours de route. Savoir arrêter son mouvement en fin

de lettre, ou en fin de stroke précédant un mouvement en l'air, sont autant de mouvements qui doivent être intégrés afin d'atteindre l'automatisation et donc l'expertise. Par exemple, avant de lever le crayon pour tracer de la barre horizontale sur le *T*, l'enfant doit apprendre à arrêter son tracé à la fin de la droite verticale, donc à inhiber la réponse motrice en cours, pour pouvoir amorcer une nouvelle réponse motrice. D'ailleurs, il est fort probable que l'une des raisons pour lesquelles les mouvements de pointage posent des difficultés aux enfants ne soit pas seulement due à la préparation du mouvement en l'air et la localisation du point de redémarrage (i.e., pour produire la barre horizontale du *T*) mais également à l'inhibition du tracé précédant (i.e., la droite verticale du *T*).

Boujon (2002) définissait l'inhibition comme étant un processus actif qui vise à la suppression d'une action et non pas comme une simple absence d'une action excitatrice. En ce sens, l'inhibition ne se limite pas à la négation ou au freinage d'une action mais elle est constructive. Arriver à la maîtrise de l'inhibition cognitive et motrice pendant l'enfance, c'est contribuer à l'élaboration des futurs mécanismes cérébraux et moteurs de l'adulte. On sait déjà que le rôle de l'inhibition cognitive est indispensable pour discriminer des lettres identiques qui se différencient par leur orientation en miroir (Ahr, Houdé & Borst, 2016). Sur le plan moteur, les processus d'inhibition motrice peuvent être évalués à partir de tâches comme celle du Stop-Task, qui consistent à mesurer le laps de temps entre le temps de réaction et le signal d'arrêt d'une réponse motrice déjà mise en route. Dans cette tâche, sont mis en compétition deux processus : l'un concernant l'exécution d'une tâche motrice et le deuxième concernant l'inhibition de cette même tâche motrice (Logan & Cowan, 1984). Plus le délai est long entre le signal et l'arrêt de la conduite motrice, plus la capacité d'inhibition est faible. Ce type de tâche d'inhibition motrice fait appel aux fonctions inhibitrices dites « froides » (Kim, Nordling, Yoon, Boldt & Kochanska, 2013 ; Tservmentseli & Poland, 2016) en ce sens qu'elles ne font pas appel à des processus émotionnels, comme la motivation ou l'attention, qui peuvent avoir une grande influence sur l'inhibition. Ainsi, l'analyse des capacités d'inhibition du mouvement d'écriture permettrait de compléter nos connaissances sur les processus d'automatisation.

CONCLUSION

Ce travail de thèse nous a permis d'approfondir nos connaissances sur le processus d'automatisation des mouvements d'écriture manuscrite. Nous nous sommes interrogés dans un premier temps sur la nature de l'unité de représentation du mouvement. Ceci est un point majeur car la production motrice repose sur l'activation préalable d'une mémoire procédurale –connue sous le terme programme moteur ou encore carte sensori-motrice– qui détermine la manière dont le mouvement sera exécuté. Il est bien établi depuis plusieurs années que chez l'adulte, cette représentation du mouvement en mémoire est de la taille d'une lettre entière. Ainsi, chaque allographe a son propre programme moteur, qui code la forme, l'ordre et la direction des strokes à produire. Les cartes sensori-motrices élaborées gardent ainsi les informations de façon pérenne.

Notre objectif était de comprendre comment ces programmes moteurs s'élaboraient au cours de l'apprentissage de l'écriture chez l'enfant. Nous avons demandé à des enfants scolarisés à l'école élémentaire de produire des lettres qui variaient en nombre de strokes sur une tablette digitalisante. Les résultats de notre première étude ont mis en évidence que la taille des cartes sensori-motrices impliquées dans la production de l'écriture augmente de façon progressive entre 6 et 9 ans. Chez les plus jeunes, l'unité de programmation motrice serait de l'ordre du stroke. Chaque allographe serait produit par l'activation du premier stroke, puis du deuxième stroke et ainsi de suite jusqu'à la réalisation de la lettre complète. La production de chaque lettre serait ainsi la résultante de l'activation successive de strokes. Avec la pratique et la maturation neuro-musculaire, les enfants regrouperaient la programmation de ces strokes en chunks. Ces chunks augmenteraient en taille progressivement pour aboutir, à la fin du processus d'automatisation, à une production du mouvement lettre à lettre, comme cela est observé chez l'adulte. Il faudrait noter toutefois que les lettres complexes, comme par exemple le *z*, resteraient représentées en chunks même chez les enfants les plus âgés, qui semblent avoir automatisé leur production écrite pour les lettres plus simples (e.g., *l*). Ainsi, les programmes moteurs ne contiendraient pas uniquement des informations sur la forme, l'ordre et la direction de strokes, mais aussi d'autres informations. En effet, certaines lettres apparaissent plus difficiles à produire que d'autres et cela pourrait être indépendant du nombre de strokes.

Les résultats de cette première étude ne sont donc pas à interpréter seulement en termes de strokes et de chunks de strokes. Tous les strokes ne se valent pas. L'observation des

productions d'enfants en classe, notamment les plus jeunes et ceux qui ont des difficultés dans le développement de la grapho-motricité, nous a permis de constater que certains gestes nécessaires à la production de strokes spécifiques sont extrêmement coûteux en ressources attentionnelles et mnésiques. Par exemple, les lettres majuscules *L*, *T* et *U* ont deux strokes. Or, à nombre de strokes égal, les lettres *T* et le *U* posent beaucoup plus de difficultés aux enfants que le *L*. Ces différences seraient dues au fait que le *T* et le *U* requièrent des strokes qui impliquent des mouvements de pointage et de rotation, respectivement. Sur la base de ce constat, nous avons conduit une autre étude afin de vérifier si les caractéristiques spécifiques des strokes impactaient la production écrite des enfants.

Nous avons demandé à des enfants entre 6 à 10 ans de produire des séquences de lettres majuscules. Nous avons focalisé la manipulation expérimentale sur les mouvements de pointage et de rotation. Nous avons utilisé un matériel très contrôlé grâce à l'apport méthodologique de l'étude 2. Les résultats ont révélé que les lettres nécessitant des pointages requièrent une gestion très fine de la durée du mouvement. En effet, la durée du mouvement sur la surface d'écriture doit être réduite, car elle doit s'accompagner d'une augmentation de la durée du mouvement en l'air. Les gestes de rotation, quant à eux, impliquent des modulations très précises de la vitesse du mouvement. Nos résultats indiquent que la production des strokes réalisant les tracés courbés impose une vitesse maximale plus basse que pour les autres types de strokes. En revanche, la vitesse minimale était plus importante que dans les autres conditions. Vraisemblablement, cette tendance à réduire les écarts entre vitesse maximale et minimale, aurait pour but d'assurer une vitesse la plus constante possible dans la production globale de la lettre. La réalisation des mouvements de pointage et de rotation demanderait des ressources cognitives, attentionnelles et mnésiques importantes car elle impliquerait des stratégies de compensation de durée et de vitesse. Il est probable que le respect d'un *tempo* spécifique soit le fil conducteur des processus engagés lors de la production écrite, mais des recherches ultérieures seraient nécessaires pour le confirmer. Notons également que les résultats de cette étude ont révélé que les mouvements de rotation apparaitraient comme étant plus coûteux que les mouvements de pointage et ces derniers, à leur tour seraient plus coûteux que les autres types de mouvements.

Notre travail met ainsi en évidence qu'avec l'âge et la pratique l'écriture, l'enfant sera capable de traiter –et donc de programmer– des chunks d'informations plus importantes, mais cette augmentation en taille de la mémoire procédurale n'est pas seulement quantitative, elle s'accompagne d'une gestion différentielle en fonction du type de stroke à réaliser. Le contenu

du programme moteur ne se limiterait donc pas à des informations sur la forme, l'ordre et la direction des strokes (Van Galen, 1991). Il coderait également des informations permettant la mise en place de stratégies cinématiques compensatoires pour des gestes spécifiques comme ceux de rotation et de pointage. Les programmes moteurs s'élaborent pendant le processus d'apprentissage, qui s'étale sur la période 6-7 ans. À partir de 8 ans, ces acquisitions commencent à s'automatiser avec la pratique et l'augmentation des capacités cognitives, attentionnelles et mnésiques. L'automatisation semble être acquise entre 9 et 10 ans, en tout cas pour la plupart des lettres, afin que le langage écrit devienne un outil de communication langagière à part entière et permette la fixation des connaissances sous forme écrite.

Ces résultats nous semblent directement applicables en milieu scolaire. En effet, il serait judicieux d'initier les enfants, dès l'école maternelle, à la gestion d'enchaînements de mouvements de plus en plus complexes en nombre de strokes. Les premières séquences motrices seraient par exemple, des séquences de mouvements en l'air visant à produire une juxtaposition de deux gestes (e.g., un lever de doigt vertical suivi d'une translation horizontale du doigt). Les premiers essais seraient lents, puis peu à peu, les performances évolueraient vers une vitesse plus importante et donc une plus grande dextérité manuelle, en particulier des doigts. Ce type d'enchaînement serait réalisé par la suite sur feuille avec un outil scripteur pour que l'enfant prenne conscience que les gestes appris peuvent être utilisés également pour écrire des lettres. Dans un second temps, il faudrait ajouter progressivement des gestes dans la séquence de mouvements jusqu'à un maximum de quatre ou cinq, en prenant bien évidemment en compte l'âge des enfants et leurs ressources attentionnelles et mnésiques. Ainsi, petit à petit, les enfants développeraient leurs capacités à construire une représentation en mémoire du code moteur des séquences motrices réalisées. C'est de manière implicite qu'ils/elles vont élaborer les cartes sensori-motrices qui spécifient la procédure correcte pour tracer les séquences, mais c'est de façon explicite que l'on peut les guider dans cette approche.

La période d'acquisition s'étalant principalement entre 6 et 7 ans, il serait tout à fait opportun d'envisager également des séquences d'entraînement à l'écriture offrant une appréhension de ce fil conducteur qu'est le *tempo*. Un frappé de main, de la musique ou les battements d'un métronome pourraient être utilisés dans le cadre d'exercices réguliers de motricité fine. Les enfants pourraient par exemple tracer des boucles en l'air, produisant ainsi des mouvements de rotation en rythme. Aussi, sur une surface plane à la verticale type chevalet ils/elles pourraient produire des gestes de pointage sur des cibles de plus en plus petites en taille tout en suivant un rythme défini par une comptine. Ces mouvements de rotation et de pointage

seraient progressivement réduits à la dimension d'une feuille pour ensuite être réalisés dans des tâches de coloriage et puis d'écriture de lettres. Cela permettrait la régulation des vitesses du tracé en adoptant un rythme spécifique déterminé par l'enseignant. Chaque enfant pourrait par la suite se « caler » sur son propre *tempo*. Pour les mouvements de pointage, on peut imaginer des exercices de coordination oculo-motrice incitant les enfants à positionner leur index, de plus en plus rapidement, à l'intérieur de cercles de diamètres de plus en plus petits ou encore à relier des points entre eux afin de révéler une image. Ceci pourrait par la suite être transposé à un exercice du pointage demandant un lever de stylo suivi d'une atteinte de cible (i.e., comme pour produire la lettre *İ*). Une fois que l'enfant parvient à réaliser les pointages simples, on pourrait lui demander de positionner la pointe de son stylo sur d'autres points préalablement tracés sur une feuille, le but étant de développer implicitement la notion de point d'ancrage (e.g., les deux barres obliques du *A* majuscules doivent se toucher pour que la lettre soit réalisée correctement). Il serait important de réaliser tous ces exercices en musique, avec des rythmes différents, afin que l'enfant puisse apprendre progressivement à mettre en place des stratégies compensatoires de durée et de vitesse sur un tempo imposé. La pratique de ces exercices, combinée à une répétition régulière de tâches d'écriture participeraient à la consolidation des programmes moteurs au niveau de la quantité de strokes à coder mais également au niveau de la gestion des stratégies compensatoires exigées par certains types de strokes. Cela permettrait, vers 9-10 ans, une meilleure automatisation des mouvements d'écriture.

RÉFÉRENCES

Abbott, R. D., Berninger, V. W., & Fayol, M. (2010). Longitudinal relationships of levels of language in writing and between writing and reading in grades 1 to 7. *Journal of Educational Psychology*, *102*(2), 281-298.

Afonso, O., Alvarez C., & Kandel, S. (2015). Effects of Grapheme-to-Phoneme probability on writing durations. *Memory et Cognition*, *43*, 579-592.

Afonso, O., Suárez-Coalla, P., & Cuetos, F. (2015). Spelling impairments in Spanish dyslexic adults. *Frontiers in Psychology*, *6*, 1-10.

Ahr, E., Houdé, O., & Borst, G. (2016). Inhibition of the mirror generalization process in reading in school-aged children. *Journal of Experimental Child Psychology*, *145*, 157-165.

Ajuriaguerra, J., Auzias, M., Coumes, F., Denner, A., Lavondes-Monod, V. Perron, R. & Stambak, M. (1964). *L'écriture de l'enfant, I : L'évolution de l'écriture et ses difficultés*. Neuchâtel : Delachaux et Niestlé.

Alamargot, D., Chesnet, D., Dansac, C., & Ros, C. (2006). Eye and Pen: a new device to study reading during writing. *Behavior Research Methods*, *38*(2), 287-299.

Albaret, J.-M., & Santamaria, A. (1996). Utilisation des digitaliseurs dans l'étude des caractéristiques motrices de l'écriture. *Évolutions Psychomotrices*, *8*(33), 115-119.

Albaret, J.-M., Soppelsa R., Danna J. & Kaiser M.-L. (2013). Évaluation de l'écriture. In J.-M. Albaret, M.-L. Kaiser, & R. Soppelsa (Eds.), *Troubles de l'écriture chez l'enfant : Des modèles à l'intervention* (pp. 135-153). De Boeck/Solal. Bruxelles.

Amundson, S, & Weil, M. (1996). Prewriting and handwriting skills. In J. Case-Smith, A. Allen, & P. N. Pratt (Eds.), Occupational therapy for children (3rd ed., pp. 524-541). St. Louis: Mosby-Year Book.

Ashtamker, L., & Karni, A. (2015). Limits on movement integration in children: The concatenation of trained subsequences into composite sequences as a specific experience-triggered skill. *Neurobiology of Learning and Memory*, *123*, 58-66.

Auzias, M., & de Ajuriaguerra, J. (1986). Les fonctions culturelles de l'écriture et les conditions de son développement chez l'enfant. *Enfance*, *39*(2), 145–167.

Baldy, R., Chatillon, J.-F., Cadopi, M. & Chanquoy, L. (1996). Vision and mental representation in geometric design drawing by nine-year olds. *Cahiers de Psychologie Cognitive/Current Psychology of Cognition, 15*(6), 599-613.

Bara, F. & Gentaz, E. (2011). Haptics in teaching handwriting: the role of perceptual and visuo-motor skills. *Human. Movement Science, 30*(4), 745-759.

Bates, D., Maechler, M., & Bolker, B. (2011). lme4: Linear mixed-effects models using S4 classes. R package.

Bates, E., Benigni, L., Bretherton, I., Camaioni, L., & Volterra, V. (1979). *The emergence of symbols: Cognition and communication in infancy.* New York: Academic Press.

Baxter, D. M., & Warrington, E. K. (1986). Ideational agraphia: a single case study. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry, 49*, 369-374.

Benbow M., Hanft, B., & Marsh D. *(*1992). Handwriting in the classroom: improving written communication. In Royeen CB (Ed.). *AOTA Self Study Series: Classroom Applications for School-based Practice,* (pp. 1-60). *Rockville, MD: American Occupational Therapy Association.*

Bergson, H. (1939). *Matière et mémoire*. Paris: PUF.

Berninger V.W, Whitaker D, Feng Y, Swanson HL, & Abbott R. (1996). Assessment of planning, translating, and revising in junior high writers. *Journal of School Psychology*. *34*, 23-52.

Berninger, V. W., & Alsdorf, B. (1989). Are there errors in error analysis? *Journal of Psychoeducational Assessment, 7*(3), 209-222.

Bernstein, N. (1967). *The coordination and regulation of movements*. Oxford, UK: Pergamon.

Berthoz, A. (2009). *La simplexité*, Odile Jacob.

Binet, A., & Courtier, J. (1893). Sur la vitesse des mouvements graphiques. *Revue Philosophique de la France et de l'Etranger, 35*, 664-671.

Bo, J., & Seidler, R. D. (2009). Visuospatial working memory capacity predicts the organization of acquired explicit motor sequences. *Journal of Neurophysiology, 101*(6), 3116-3125.

Boë, L. J., Orliaguet, J. P., & Belhaj, R. (1991). Effet de contexte inter-lettre sur le déroulement temporel des mouvements d'écriture : Similarités avec la parole [Inter-letter context effect on the time course of written movements: Similarities with speech]. Proceedings

of the XIIth International Congress of Phonetic Sciences. Aix-en-Provence, France, 19-24 August, 5, 22-25.

Boujon, C. (2002). *L'inhibition au carrefour des neurosciences et des sciences de la cognition. Fonctionnements normal et pathologique*. Marseille.

Boyd, L. A., Edwards, J. D., Siengsukon, C. S., Vidoni, E. D., Wessel, B. D., & Linsdell, M. A. (2009). Motor sequence chunking is impaired by basal ganglia stroke. *Neurobiology of learning and memory, 92*(1), 35-44.

Bruner, J. (1983). *Child's talk: Learning to use language*. New York: Norton.

Buchwald, A., & Falconer, C. (2014). Cascading activation from lexical processing to letter-level processing in written word production. *Cognitive Neuropsychology, 31*(7-8), 606-621.

Bullinger A. (2004). L*e développement sensorimoteur de l'enfant et ses avatars*, Ramonville-Saint-Agne, Érès.

Burton, A. W., Pick, H. L., Holmes, C., & Teulings, H. L. (1990). The independence of horizontal and vertical dimensions in handwriting with and without vision. *Acta Psychologica, 75*, 201-212.

Cabrejo-Parra, E. (1992). Deixis et opérations symboliques. In M.-A. Morel, & L. Danon-Boileau (Eds.), *La deixis* (pp. 409-414). Paris : P.U.F.

Caramazza, A., Miceli, G., Villa, G., & Romani, C. (1987). The role of the graphemic buffer in spelling: Evidence from a case of acquired dysgraphia. *Cognition, 26*(1), 59-85.

Charles, M., Soppelsa, R. et Albaret, J.-M. (2003). *BHK – Échelle d'évaluation rapide de l'écriture chez l'enfant*. Paris : Éditions et Applications Psychologiques.

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*(1), 43-63.

Chenu, F., Pellegrino, F., Jisa, H., & Fayol, M. (2014). Interword and intraword pause threshold in writing. *Frontiers in Psychology, 5*, 1-7.

Chick, G. (2015). Anatomie de la main. Repéré à https://www.la-main.ch/2015/01/anatomie-de-la-main-2/

Coghill, G. E. (1929). *Anatomy and the problem of behavior*. Oxford, England: Macmillan.

Collier, G. L., & Wright, C. E. (1995). Temporal rescaling of simple and complex ratios in rhythmic tapping. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 21*(3), 602-627.

Conel, J.L. (1939). *The postnatal development of the human cerebral cortex*. Cambridge, Harvard University Press.

Conel, J.L. (1947). The cerebral cortex of the 3-month infant. *Anat Rec 97*(3): 382.

Cornhill, H., & Case-Smith, J. (1996) Factors that relate to good and poor handwriting. *American Journal of Occupational Therapy, 50*, 732-739.

Costa, V., Fischer-Baum, S., Capasso, R., Miceli, G., & Rapp, B. (2011). Temporal stability and representational distinctiveness: Key functions of orthographic working memory. *Cognitive Neuropsychology, 28*(5), 338-362.

Danna, J., Velay, J.-L., & Albaret, J.-M. (2016). Dysgraphies. In S. Pinto, & M. Sato (Eds.), *Traité de neurolinguistique* (pp. 337-346). Louvain-la-Neuve : De Boeck

Desmurget, M., & Grafton, S. (2000). Forward modeling allows feedback control for fast reaching movements. *Trends in Cognitive Sciences, 4*(11), 423-431.

Dennis, J. L., & Swinth, Y. (2001). Pencil grasp and children's handwriting legibility during different-length writing tasks. *American Journal of Occupational Therapy, 55*, 175-183.

Detable, C., & Vinter, A. (2003). Les activités graphiques d'enfants et d'adolescents présentant un retard mental : étude du respect d'une règle syntaxique. *Revue Européenne de Psychologie Appliquée, 53*(3-4), 179-187.

Di Pietro, M., Schnider, A., & Ptak, R. (2011). Peripheral dysgraphia characterized by the co-occurrence of case substitutions in uppercase and letter substitutions in lowercase writing. *Cortex, 47*(9), 1038–1051.

Dounskaia, N., Van Gemmert, A. W., & Stelmach, G. E. (2000). Interjoint coordination during handwriting-like movements. *Experimental Brain Research, 135*(1), 127-140.

Doyon, J., Bellec, P., Amsel, R., Penhune, V., Monchi, O., Carrier, J., … Benali, H. (2009). Contributions of the basal ganglia and functionally related brain structures to motor learning. *Behavioural Brain Research, 199*(1), 61-75.

Dumont, D. (2013) *Le système d'écriture des minuscules latines manuscrites en usage dans les écoles françaises : intérêt de la prise en compte de ce système pour l'enseignement de l'écriture manuscrite* (Doctoral dissertation, Université Paris V, Paris). Retrieved from http://app.parisdescartes.fr/gedfs/these/2013/12/19085415/vd_dumont_dassaud_daniele.pdf

Écriture. (2003). In J. R. Rey-Debove et A. Rey (Dir.), *Le nouveau petit Robert. Dictionnaire alphabétique et analogique de la langue française*, Paris, Dictionnaires Le Robert (Vol 1, p. 832). Paris, France : Dictionnaires Le Robert.

Écriture. (n.d.). In *Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales*. Retrieved from http://www.cnrtl.fr/definition/%C3%A9criture

Elliott, J. M., & Connolly, K. J. (1984). A classification of manipulative hand movements. *Developmental Medicine and Child Neurology, 26*, 283-296.

Ellis, A. W. (1988). Normal writing processes and peripheral acquired dysgraphias. *Language and Cognitive Processes, 3*(2), 99-127.

Exner, C. (1989) Development of hand functions. In P. N. Pratt, & A. S. Allen (Eds.), O*ccupational Therapy for Children* (pp. 235-259). St Louis, MO: Mosby-Year Book.

Exner, C. (1995). Remediation of hand skill problems in children. In A. Henderson, & C. Pehoski (Eds.), *Hand function in the child: Foundations for remediation* (pp. 197-222). Sr. Louis: Mosby

Favart, M., & Olive, T. (2005). Modèles et méthodes d'étude de la production écrite. *Psychologie Francaise, 50*(3), 273-285

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 and Child Neurology, 49*(4), 312-317.

Ferland, F. (2005). *Le développement de l'enfant au quotidien. Du berceau à l'école primaire*. Montréal: Editions de l'Hôpital Sainte-Justine.

Fitts, P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology, 47*(6), 381-391.

Freeman, F. N. (1914). *The Teaching of Handwriting* (pp. 83-84). Boston, MA: Houghton-Mifflin, The Riverside Press Cambridge.

Gerth, S., Dolk, T., Klassert, A., Fliesser, M., Fischer, M. H., Nottbusch, G., & Festman, J. (2016). Adapting to the surface: A comparison of handwriting measures when writing on a tablet computer and on paper. *Human Movement Science*, *48*, 62-73.

Gobet, F., Lloyd-Kelly, M., & Lane, P. C. R. (2016). What's in a Name? The Multiple Meanings of "Chunk" and "Chunking." Frontiers in Psychology, 7(February), 1–5.

Goodnow, J. J., & Levine, R. A. (1973). "The grammar of action": Sequence and syntax in children's copying. *Cognitive Psychology*, *98*(4), 82-98.

Goodnow, J. J., Friedman, S., Bernbaum, M., & Lehman, E. B. (1973). Direction and sequence in copying: The effect of learning to write in English and Hebrew. *Journal of Cross-Cultural Psychology*, *4*, 263-282.

Graham, S., Berninger, V. W., Abbott, R. D., Abbott, S. P., & Whitaker, D. (1997). Role of mechanics in composing of elementary school students: A new methodological approach. *Journal of Educational Psychology*, *89*(1), 170-182.

Graven, S. N. (2004). Early neurosensory visual development of the fetus and newborn. *Clin Perinatol*. *31*(2), 199-216.

Greer, K. L., & Green, D. W. (1983). Context and motor control in handwriting. *Acta Psychologica*, *54*, 205-215.

Guinet, E., & Kandel, S. (2010). Ductus: A software package for the study of handwriting production. *Behavior Research Methods*, *42*(1), 326-332.

Gullaud, L., & Vinter, A. (1998). Rôle de la vision dans la direction de mouvements graphiques simples. *L'Année Psychologique*, *98*(3), 401-428.

Hadders-Algra, M., Brogen, E., & Forssberg, H. (1997). Nature and nurture in the development of postural control in human infants. *Acta Paediatrica Supplement*, *422*, 48-53.

Halsband, U., & Lange, R. K. (2006). Motor learning in man: A review of functional and clinical studies. *Journal of Physiology*, *99*(4-6), 414-424.

Hamstra-Bletz, E., De Bie, J., & den Brinker, B.P.L.M. (1987). Beknopte eoordelingsmethode voor kinderhandschriften (Une méthode rapide d'évaluation de l'écriture chez l'enfant). Lisse: Swets and Zeitlinger.

Hasher, L., & Zacks, R. T. (1979). Automatic and effortful processes in memory. *Journal of Experimental Psychology*, *108*(3), 356-388.

Henderson, S. E. (1987). The assessment of “clumsy” children: Old and new approaches. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *28*(4), 511-527.

Hubel, D. (1994). L’oeil, le cerveau et la vision. *Pour la science* (pp. 197-223). Paris : Belin

Husserl, E. (1907). *Chose et espace : Leçons de 1907.* Paris : PUF

Hulstijn, W., & Van Galen, G. P. (1988). Levels of motor programming in writing familiar and unfamiliar symbols. In A. M. Colley, & J. R. Beech (Eds.), *Cognition and Action in Skilled Behavior* (pp. 65-85). Amsterdam: North-Holland.

James, K. H., & Engelhardt, L. (2012). The effects of handwriting experience on functional brain development in pre-literate children. *Trends in Neuroscience and Education*, *1*(1), 32-42.

Jeannerod, M. (1988). *The neural and behavioural organization of goal-directed movements.* Oxford University Press.

Jiménez, L. (2008). Taking patterns for chunks: Is there any evidence of chunk learning in continuous serial reaction-time tasks? *Psychological Research*, *72*, 387-396.

Jones, D., & Christensen, C.A. (1999). Relationship between automaticity in handwriting and students’ability to generate written text. *Journal of Educational Psychology 91*, 44-49.

Kandel, S., & Perret, C. (2015). How do movements to produce letters become automatic during writing acquisition? Investigating the development of motor anticipation. *International Journal of Behavioral Development*, *39*(2), 113-120.

Kandel, S., Lassus-Sangosse, D., Grosjacques, G., & Perret, C. (2017). The impact of developmental dyslexia and dysgraphia on movement production during word writing. *Cognitive Neuropsychology*, *34(3-4)*, 219-251.

Kandel, S., Peereman, R., & Ghimenton, A. (2013). Further evidence for the interaction between central and peripheral processes: The impact of double in writing English words. *Frontiers in Psychology*, *4*, 1-8.

Kandel, S., Peereman, R., & Ghimenton, A. (2014). How do we code the letters of a word when we have to write it? Investigating double letter representation in French. *Acta Psychologica*, *148*, 56-62.

Kandel, S., Peereman, R., Grosjacques, G., & Fayol, M. (2011). For a psycholinguistic model of handwriting production: Testing the syllable-bigram controversy. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 37(4), 1310–1322.

Kao, H. S. R., Mak, P. H., & Lam, P. W. (1986). Handwriting pressure: Effects of task complexity, control mode and orthographic differences. In H. S. Kao, G. P. Van Galen, & R. Hoosain (Eds.), *Graphonomics: Contemporary research in handwriting* (pp. 47-66). Amsterdam, The Netherlands: North Holland.

Karlsdottir, R., & Stefansson, T. (2002). Problems in developing functional handwriting. *Perceptual and Motor Skills*, *94*, 623-662.

Keele, S. W. (1968). Movement control in skilled motor performance. *Psychological Bulletin*, *70*(6, Part 1), 387-403.

Keele, S. W., Ivry, R., Mayr, U., Hazeltine, E., & Heuer, H. (2003). The cognitive and neural architecture of sequence representation. *Psychological Review*, *110*(2), 316-339.

Kim, S., Nordling, J. K., Yoon, J. E., Boldt, L., & Kochanska, G. (2013). Effortful control in "Hot" and "Cool" task differentially predicts children's behavior problems and academic performance. *Journal of Abnormal Child Psychology*, *41*(1), 43-56.

Koch, I., & Hoffmann, J. (2000). Patterns, chunks, and hierarchies in serial reaction-time tasks. *Psychological Research*, *63*, 22-35.

Koziatek, S. M., & Powell, N. J. (2003). Pencil grips, legibility, and speed of fourth-graders' writing in cursive. *American Journal of Occupational Therapy*, *57*(3), 284-288.

Kymographe. (n.d.). *Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales*. Retrieved from http://www.cnrtl.fr/definition/kymographe

Lacquaniti, F., Ferrigno, G., Pedotti, A., Soechting, J. F., & Terzuolo, C. (1987). Changes in spatial scale in drawing and handwriting: kinematic contributions by proximal and distal joints. *Journal of Neuroscience*, *7*(3), 819-828.

Lacquaniti, F., Terzuolo C., & Viviani P. (1983). The law relating the kinematic and figural aspects of drawing movements. *Acta Psychologica*, *54*, 115-130.

Lagarrigue, A. (2011). *Regroupement des lettres dans l'écriture : origine motrice et linguistique*. (Thèse de doctorat). Université de Toulouse, France.

Lambert, E., & Espéret, E. (2002). Assemblage des unités traitées par les processus graphomoteurs et orthographiques au début de l'apprentissage de l'écriture. *Revue de Psychologie de l'Éducation, 7,* 76-97.

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/Revue canadienne de psychologie expérimentale, 65*(3), 141-150.

Lambert, E., Sausset, S., & Rigalleau, F. (2015). The ortho-syllable as a processing unit in handwriting: The mute e effect. *Reading and Writing, 28,* 683-698.

Lashley, K. S. (1951). The problem of serial order in behavior. In L. A. Jeffress (Ed.), *Cerebral mechanisms in behavior* (pp. 112-136). New York: Wiley.

Laszlo, J., & Bairstow, P. J. (1984). Handwriting difficulties and possible solutions. *School Psychology International, 5*(4), 205-2013.

Levelt, W.J.M. (1989). Speaking: From intention to articulation. Cambridge, MA: MIT Press.

Logan, G. D., & Cowan, W. B. (1984). On the ability to inhibit thought and action: A theory of an act of control. *Psychological Review, 91*(3), 295-327.

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*(4), 1492-1500.

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 psychologica, 119*(1), 67-79.

Lotze, M., Scheler, G., Tan, H. R. M., Braun, C., & Birbaumer, N. (2003). The musician's brain: Functional imaging of amateurs and professionals during performance and imagery. *NeuroImage, 20*(3), 1817-1829.

Lurcat, L. (1983). Le graphisme et l'écriture chez l'enfant. In *Revue française de pédagogie, 65,* 7-18.

Lurçat, L. (1988). De la nécessité de l'écriture manuscrite comme écriture première. *Psychologie Scolaire,* n°66.

Maarse, F. J., & Thomassen, A. J. W. M. (1983). Produced and perceived writing slant: Difference between up and down strokes. *Acta Psychologica, 54,* 131-147.

Mai, N. & Marquardt. C. (1994). Treatment of writer's cramp. Kinematic measures as an assessment tool for planning and evaluating training procedures. In C. Faure, P. Keusse, G. Lorette, & A. Vinter (Eds.), *Advances in handwriting and drawing: A multidisciplinary approach* (pp. 445-461). Paris: Europia

Margolin, D. I. (1984). The neuropsychology of writing and spelling: Semantic, phonological, motor, and perceptual processes. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, *36*(3), 459–489.

Marquardt, C., Gentz, W., & Mai, N. (1996). On the role of vision in skilled handwriting. In M. L. Simner, C. G. Leedham, & A. J. W. M. Thomassen (Eds.), *Handwriting and drawing research: Basic and applied issues* (pp. 87-97). Amsterdam: IOS Press.

Marr, D., Cermak, S., Cohn, E. S., & Henderson, A. (2003). Fine motor activities in Head Start and kindergarten classrooms. *American Journal of Occupational Therapy, 57,* 550-557.

Marr, D., Windsor, M. & Cermak, S. (2001). Handwriting readiness: locatives and visuomotor skill in the kindergarten years. *Early Childhood Research and Practice*, *3*, 1-28.

Mazeau, M., & Pouhet, A. (2014) *Neuropsychologie et troubles des apprentissages chez l'enfant.* (2e éd). Paris : Elsevier-Masson

McCutchen, D. (1996) A capacity theory of writing: Working memory in composition. *Educational Psychology Review*, *8*(3), 299-325 [traduction (1998). Une théorie de la capacité pour la rédaction : la mémoire de travail dans la composition. In A. Piolat, & A. Pélissier (Eds.), *La rédaction de textes. Approche cognitive* (pp. 183-224). Lausanne : Delachaux & Niestlé].

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: Official Publication of the American Occupational Therapy Association*, *46*(10), 898-903.

Medwell, J., Strand, S., & Wray, D. (2007). The role of handwriting in composing for Y2 children. *Journal of Reading Writing and Literacy*, 2(1), 18-36

Meulenbroek, R. G. J., & Van Galen, G. P. (1986). Movement analysis of repetitive behaviour of first, second and third grade primary school children. In H. S. Kao, G. P. Van Galen, & R. Hoosain (Eds.), *Graphonomics: 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*.

Meulenbroek, R. G. J., & Van Galen, G. P. (1989). The production of connecting strokes in cursive handwriting: Developing co-articulation in 8 to 12-year-old children. In R. Plamondon, C.Y., Suen, & M. Simner (Eds.), *Computer Recognition and Human Production of Handwriting* (pp. 273-286). Singapore: World Scientific.

Meulenbroek, R. G. J., & Van Galen, G. P. (1990). Perceptual-motor complexity of printed and cursive letters. *Journal of Experimental Education, 58*(2), 95-110.

Meulenbroek, R. G. J., Vinter, A, & Mounoud, P. (1993). Development of the Start-Rotation Principle in circle production. *British Journal of Developmental Psychology, 11*, 307-320.

Miller, D. J., Duka, T., Stimpson, C. D., Schapiro, S.J., Baze, W. B., McArthur, M.J., & Sherwood, C. C. (2012). Prolonged myelination in human neocortical evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA, 109*(41), 16480-16485

Mojet, J. W. (1991). Characteristics of the developing handwriting skill in elementary education. In J. Wann, A. Wing, & N. Søvik (Eds.), *Development of graphic skills: Research, perspectives and educational implications* (pp. 53-75). London: Academic Press.

Newell, K.M., Kugler, P.N., Van Emmerik, R.E.A., & McDonald, P.V. (1989). Search strategies and the acquisition of coordinations. In S.A. Wallace (Ed.), *Perspectives on the coordination of movement* (pp. 85-122). North-Holland : Elsevier.

Niessen, F. (2000). Diagnostique et traitement du strabisme chez l'ancien prématuré. *Médecine et thérapeutique /pédiatrie, 3*(4), 287-92.

Nihei, Y. (1980). Developmental change in motor organization: Covert principles for the organization of strokes in children's drawing. *Tohoku Psychologica Folia, 39*, 17-23.

Nihei, Y. (1983). Developmental change in covert principles for the organization of strokes in drawing and handwriting. *Acta psychologica, 54*(1), 221-232.

Ninio, A., & Lieblich, A. (1976). The grammar of action: « Phase structure » in children's copying. *Child Development, 47*, 846-849.

O'Mahony, P., Dempsey, M., & Killeen, H. (2008). Handwriting speed: Duration of testing period and relation to socio-economic disadvantage and handedness. *Occupational Therapy International*, *15*(3), 165-177.

Olive, T. & Kellogg, R.T. (2002). Concurrent activation of high- and low-level production processes in written composition. *Memory and Cognition, 30,* 594-600.

Olive, T., Favart, M., Beauvais, C., & Beauvais, L. (2009). Children's cognitive effort and fluency in writing: Effects of genre and of handwriting automatisation. *Learning and Instruction*, *19*(4), 299-308.

Orliaguet, J.-P., & Boe, L.-J. (1990). Régulation temporelle des mouvements d'écriture en fonction des contraintes spatiales [Temporal regulation of handwriting movements as a function of spatial constraints]. In V. Nougier, & J. P. Blanchi (Eds.), *Pratiques sportives et modélisation du geste* [Sport practice and gestural modelling] (pp. 163-177). Grenoble, France : Collection Grenoble Sciences.

Osterrieth, P. A. (1944). Le test de copie d'une figure complexe, contribution à l'étude de la perception et de la mémoire [Test of copying a complex figure ; contribution to the study of perception and memory]. *Archives de Psychologie, 30,* 206-356.

Paillard, J. (1990). Les bases nerveuses du contrôle visuo-manuel de l'écriture. In C. Sirat, J. Irigoin, & E. Poulle (Eds.), *L'écriture, l'oeil et ma main* (pp. 23-52). Turnhout : Brepols.

Palluel-Germain R., Bara F., de Boisferon A. H., Hennion B., Gouagout P., & Gentaz E. (2007). A visuo-haptic device –Telemaque – Increases the kindergarten children's handwriting acquisition. In *IEEE* : *WorldHaptic*, pp. 72-77.

Pick, H. L., & Teulings, H. L. (1983). Geometric transformations of handwriting as a function of instruction and feedback. *Acta Psychologica, 54,* 327-340.

Plamondon, R., & Lamarche, F. (1986). Modelisation of handwriting: A system approach. In H. S. R. Kao, G. P. Van Galen, & R. Hoosain (Eds.), *Graphonomics: Contemporary Research in Handwriting* (pp.169-183). Amsterdam : North-Holland.

Planton, S., & Kandel, S. (2017). Substrats cérébraux de la production du langage écrit. *Neurolinguistique*, (January), 1-35.

Planton, S., Jucla, M., Roux, F. E., & Démonet, J. F. (2013). The 'handwriting brain': A meta-analysis of neuroimaging studies of motor versus orthographic processes. *Cortex*, *49*(10), 2772-2787.

Planton, S., Longcamp, M., Péran, P., Démonet, J.-F., & Jucla, M. (2017). How specialized are writing-specific brain regions? An fMRI study of writing, drawing and oral spelling. *Cortex, 8.*

Pontart, V., Bidet-Ildei, C., Lambert, E., Morisset, P., Flouret, L., & Alamargot, D. (2013). Influence of handwriting skills during spelling in primary and lower secondary grades. *Frontiers in Psychology*, *4*(november), 1-9.

Portier, S. J., Van Galen, G. P., & Meulenbroek, R. G. J. (1990). Practice and the dynamics of handwriting performance. *Journal of Motor Behavior*, *22*(4), 474-492.

Prunty, M., & Barnett, A. L. (2017). Understanding handwriting difficulties: A comparison of children with and without motor impairment. *Cognitive Neuropsychology*, *34*(3-4), 205-218.

Puranik, C., et Al Otaiba, S. (2012). Examining the contribution of handwriting and spelling to written expression in kindergarten children. *Reading and Writing*, *25*(7), 1523-1546.

Purcell, J. J., Turkeltaub, P. E., Eden, G. F. et Rapp, B. (2011). Examining the central and peripheral processes of written word production through meta-analysis. *Frontiers in Psychology*, *2*, 239-239.

Quémart, P., & Lambert, E. (2017). The influence of the morphological structure of words on the dynamics of handwriting in adults and fourth and sixth grade children. *Reading and Writing*, 1-21.

Rabiner, L. R., & Gold, B. (1975). Theory and application of digital signal processing. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.

Rabinowicz, T. (1980). The differentiated maturation of the human cerebral cortex. In F. Falkner, & J. M. Tanner (Eds.), *Human growth*. New York: Plenum. *3*, 97-123.

Raibert, M. H. (1977). *Motor control and learning by the state space model*. AI-M- 51, MIT. (Doctoral dissertation). Retrieved from https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/16462

Ransdell, S. E., & Levy, C. M. (1996). Working memory constraints on writing quality and fluency. In C. M. Levy, & S. E. Ransdell (Eds.), *The science of writing: Theories, methods, individual differences and applications* (pp. 93-106). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.

Rapp, B., Epstein, C., & Tainturier, M. J. (2002). The integration of information across lexical and sublexical processes in spelling. *Cognitive Neuropsychology*, *19*(1), 1-29.

Rey, A. (1941). L'examen psychologique dans les cas d'encéphalopathie traumatique. *Archives de Psychologie*, *28*, 286-340.

Rigal, R. (1996). *Motricité humaine. Tome 3 : Développement moteur*. (2nd ed.) Québec : Presses de l'Université du Québec.

Rigal, R. (2003). *Motricité humaine. Tome 2 : Développement moteur*. (3th ed.) Québec : Presses de l'Université du Québec.

Rigal, R., Abi Nader, A., Bolduc, G. et Chevalier, N. (2009). *L'éducation motrice et l'éducation psychomotrice au préscolaire et au primaire*. Presses de l'Université du Québec.

Rivière J. (2004). Le développement moteur et perceptivo-moteur du nourrisson. In R. Lécuyer (Ed.), *le Développement du nourrisson*, Paris, Dunod, *7*, 196-219.

Robinson, A. (1995). *The story of writing*. London: Thames and Hudson.

Rosenbloom, L., & Horton, M. E. (1971). The maturation of fine prehension in young children. *Developmental Medicine & Child Neurology*, *13*(1), 3-8.

Rosenblum, S. (2003). The In Air phenomenon: temporal and spatial correlates of the handwriting process. *Perceptual and Motor Skills*, *96*(3), 933.

Rosenblum, S., Parush, S., & Weiss, P. L. (2003). Computerized temporal handwriting characteristics of proficient and poor handwriters. *The American Journal of Occupational Therapy*, *57*, 129-138

Rosenblum, S., Weiss, P. L., & Parush, S. (2004). Handwriting evaluation for developmental dysgraphia: Process versus product. *Reading and Writing*, *17*(5), 433-458.

Roux S., McKeef T. J., Grosjacques G., Afonso O., & Kandel S. (2013). The interaction between central and peripheral processes in handwriting production. *Cognition 127*, 235-241.

Roux, F.-E., Dufor, O., Giussani, C., Wamain, Y., Draper, L., Longcamp, M., & Démonet, F., (2009). The graphemic/motor frontal area Exner's area revisited. *Annals of Neurology*, *66*(4), 537-545.

Ruitenberg, M. F., Abrahamse, E. L., & Verwey, W. B. (2013). Sequential motor skill in preadolescent children: The development of automaticity. *Journal of experimental child psychology*, *115*(4), 607-623.

Santangelo, T., & Graham, S. (2016). A comprehensive meta-analysis of handwriting instruction. *Educational Psychology Review*, *28*(2), 225-265.

Sarlegna, F., Blouin, J., Vercher, J.-L., Bresciani, J.-P., Bourdin, C., & Gauthier, G. (2004). Online control of the direction of rapid reaching movements. *Experimental Brain Research*, *157*(4), 468-471.

Sassoon, R., Nimmo-Smith, I., & Wing, A. M. (1986). An analysis of children's penholds. In H. S. R. Kao, G. P. Van Galen, & R. Hoosain (Eds.), *Graphonomics: Contemporary research in handwriting* (pp. 93-106). New York: North Holland.

Sassoon, R., Nimmo-Smith, I., & Wing, A. M. (1989). Developing efficiency in cursive handwriting: An analysis of « t » crossing behavior in children. In R. Plamondon, C. Y. Suen, C. Y., & M. L. Simner (Eds.), *Computer recognition and human production of handwriting* (pp. 287-297). Singapore: World Scientific.

Saunders, J. A., & Knill, D. C. (2005). Humans use continuous visual feedback from the hand to control both the direction and distance of pointing movements. *Experimental Brain Research*, *162*(4), 458-473.

Sausset, S., Lambert, E., Olive, T., & Larocque, D. (2012). Processing of syllables during handwriting: Effects of graphomotor constraints. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 65(10)*, 1872-1879.

Scardamalia, M. & Bereiter, C. (1986). Research on written composition. In M. Wittrock (Ed.), *Handbook of research on teaching* (3rd ed., pp. 778-803). New York: MacMillan.

Schillings, J. J., Meulenbroek, R. G. J., & Thomassen, A. J. W. M. (1996). Limb segment recruitment as a function of movement direction, amplitude, and speed. *Journal of Motor Behavior*, *28*(3), 241-254.

Schilperoord, J. (1996). *It's about time: Temporal aspects of cognitive processes in text production.* Amsterdam: Rodopi.

Schmandt-Besserat, D. (1996). *How writing came about*. University of Texas Press.

Schmandt-Besserat, D. (2007). *When writing met art*. University of Texas Press.

Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, *82*(4).

Schmidt, R. A. (1988). *Motor control and learning: A behavioral emphasis*. Champaign, IL: Human Kinetics.

Schmidt, R.A. (1993). *Apprentissage moteur et performance*. Paris : Vigot.

Schmidt, R. A., and Lee, T. D. (2005). *Motor control and learning. A behavioral emphasis*, 4th Ed. Champaign, IL:Human Kinetics.

Schmidt, R. A., Zelaznik, H., Hawkins, B., Frank, J. S., & Quinn Jr, J. T. (1979). Motor-output variability: A theory for the accuracy of rapid motor acts. *Psychological Review*, *86*(5), 415-451.

Schneck, C. M., & Henderson, A. (1990). Descriptive analysis of the developmental position for pencil and crayon control in nondynysfunctional children. *American Journal of Occupational Therapy*, *44*(c), 893-900.

Schomaker, L. R. B., & Plamondon, R. (1990). The relation between pen force and pen-point kinematics in handwriting. *Biological Cybernetics*, *63*, 277-289.

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.

Smyth, M. M., & Silvers, G. (1987). Functions of vision in the control of handwriting. *Acta Psychologica*, *65*(1), 47-64.

Simner, M. L. (1981). The grammar of action and children's printing. *Developmental Psychology*, *17*, 866-871

Skinner, B. F. (1958). Teaching machines. *Science*, *128*, 969-977.

Smits-Engelsman, B. C. M., Sugden, D., & Duysens, J. (2006). Developmental trends in speed accuracy trade-off in 6-10-year-old children performing rapid reciprocal and discrete aiming movements. *Human Movement Science*, *25*(1), 37-49.

Smits-Engelsman, B., Van Galen, G., & Duysens, J. (2002). The breakdown of Fitts' law in rapid, reciprocal aiming movements. *Experimental Brain Research*, *145*(2), 222–230.

Soppelsa, R., & Albaret, J.-M. (2014). Caractéristiques de la dysgraphie ou du trouble de l'apprentissage de la graphomotricité (TAG) au collège. *Approche Neuropsychologique des Apprentissages Chez l'Enfant, 26*(128), 53-58.

Søvik, N. (1974). Developmental trends of visual feedback control in copying and writing performances of children aged 7 through 11 years. *Perceptual and Motor Skills, 39*, 919-930.

Søvik, N., Arntzen, O., & Thygesen, R. (1987). Relation of spelling and writing in learning disabilities. *Perceptual and Motor Skillsd Motor Skills, 64*, 219-236.

Stelmach, G. E., Mullins, P. A., & Teulings, H. L. (1984). Motor programming and temporal patterns in handwriting. *Annals of the New York Academy of Sciences, 423*(1), 144-157.

Sudsawad, P., Trombly, C. A., Henderson, A., & Tickle-Degnen, L. (2002). Testing the effect of kinesthetic training on handwriting performance in first-grade students. *American Journal of Occupational. Therapy, 56* 26-33

Summers, J. J., Sargent, G. I., & Hawkins, S. R. (1984). Rhythm and the timing of movement sequences. *Psychological Research, 46*(1-2), 107-119.

Teasdale, N., Forget R., Bard C., Paillard J., Fleury M., & Lamarre Y. (1993). The role of proprioceptive information for the production of isometric forces and for handwriting tasks. *Acta Psychologica. 82* 179.

Teulings, H. L. (1996). Handwriting movement control. In S. W. Keele, & H. Heuer (Eds.), *Handbook of Perception and Action*, (*Vol 2*), (pp. 561-613). London: Academic Press.

Teulings, H. L., & Schomaker, L. R. B. (1993). Invariant properties between stroke features in handwriting. *Acta Psychologica, 82*(1-3), 69-88.

Teulings, H. L., Thomassen, A. J. W. M., & Maarse, F. J. (1989). A description of handwriting in terms of main axes. In R. Plamondon, C. Y. Suen, & M. L. Simner (Eds.), *Computer Recognition and Human Production of Handwriting* (pp. 193-211). Singapore: World Scientific.

Teulings, H. L., Thomassen, A. J. W. M., & Van Galen, G. P. (1983). Preparation of partly precued handwriting movements: The size of movement units in handwriting. *Acta Psychologica, 54*(1-3), 165-177

Teulings, H. L., Thomassen, A. J. W. M., & Van Galen, G. P. (1986). Invariants in handwriting: The information contained in a motor program. *Advances in Psychology*, *37*(C), 305-315.

Thelen, E., Fisher, D., & Ridley Johson, R. (1984) The relationship between physical growth and a newbone reflex. *Infant Behavior & Development, 7*, 479-493.

Thomassen, A. J. W. M., Meulenbroek, R. G. J., & Tibosch, H. J. C. M. (1991). Latencies and kinematics reflect graphic production rules. *Human Movement Science*, *10*(2-3), 271-289.

Thomassen, A. J. W. M., & Teulings, H. L. (1983). The development of handwriting. *The Psychology of Written Language*, 179-213.

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.

Thomassen, A. J. W. M., Meulenbroek, R. G. J., & Lelivelt, B. M. (1994). Multiple adaptations to externally controlled velocity in handwriting. In C. Faure, P. Keuss, G. Lorette, & A. Vinter (Eds.). *Advances in Handwriting Drawing: A multidisciplinary approach* (pp. 363-376). Paris: Europia.

Tseng, M. H. (1998). Development of pencil grip position in preschool children. *Occupational Therapy Journal of Research*, *18*, 207-224.

Tseng, M. H., & Cermak, S. A. (1993). The influence of ergonomic factors and perceptual-motor abilities on hand- writing performance. *American Journal of Occupational Therapy*, *47* (10), 919-926.

Tsermentseli, S., & Poland, S. (2016). Cool versus hot executive function: A new approach to executive function. *Encephalos*, *53*, 11-14.

Tucha, O., Mecklinger, L., Walitza, S., & Lange, K. W. (2006). Attention and movement execution during handwriting. *Human Movement Science*, *25*(4-5), 536-552.

Tucha, O., Tucha, L., & Lange, K. W. (2008). Graphonomics, automaticity and handwriting assessment. *Literacy*, *42*(3), 145-155.

Van der Fits, I.B.M., Otten, E., Klip, A.W.J. Van Eykern, L.A., & Hadders-Algra, M. (1999). The development of postural adjustments during reaching in 6- to 18-month-old infants. Evidence for two transitions. *Experimental Brain Research*, *126*, 517-528.

Van der Plaats, R. E., & Van Galen, G. P. (1991). Allographic variability in adult handwriting. *Human Movement Science, 10*(2-3), 291-300

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 and Writing, 5*, 281-293.

Van Emmerick, R. E. A., & Newell, K. M. (1989). The relationship between pen-point and joint kinematics in handwriting and drawing. In R. Plamondon, C. Y. Suen, & M. L. Simner (Eds.), *Computer Recognition and Human Production of Handwriting* (pp. 231-248). Singapore: World Scientific.

Van Emmerick, R. E. A., & Newell, K. M. (1990). The influence of task and organismic constraints on intralimb and pen-point kinematics in a drawing task. *Acta Psychologica, 73*, 171-190.

Van Galen, G. P., Teulings H.-L., & Sanders J. (1994). On the interdependence of motor programming and feedback processing in handwriting. In C. Faure, P. Keuss, G. Lorette, & A. Vinter *(*Eds.), *Advances in Handwriting and Drawing: A Multidisciplinary Approach*, pp. 403-419.

Van Galen, G. P. (1991). Handwriting: psychomotor Issues for a theory. *Human Movement Science, 10*, 165-191.

Van Galen, G. P., Smyth, M. Meulenbroek, R., & Hylkema, H (1989). The role of short-term memory and the motor buffer in handwriting under visual and non-visual guidance. *Computer recognition and human production of handwriting*, 253-271.

Van Mier, H., & Hulstijn, W. (1993). The effects of motor complexity and practice on initiation time in writing and drawing. Acta Psychologica, 84(3), 231–251.

Van Sommers, P. (1984). *Drawing and cognition: Descriptive and experimental studies of graphic production processes.* Cambridge [Cambridgeshire: Cambridge University Press]

Velay, J.-L., Longchamp, M., & Zerbato-Poudou, M.-T. (2004). Le stylo et le clavier. Notre mode d'écriture influence-t-il notre perception de l'écrit ? In A. Piolat (Ed.), *Écriture. Approches en sciences cognitives*. Aix-en-Provence : Presses universitaires de Provence, 37-54.

Vereijken, B., & Bongaardt, R. (1998). Complex motor skill acquisition. In Y. Vanden Auweele, F. Bakker, S. Biddle, M. Durand, & R. Seiler (Eds.), *Psychology for Physical Educators* (pp. 233-256). Champaign, Ill.: Human Kinetics.

Verwey, W. B. (1994). Evidence for the development of concurrent processing in a sequential keypressing task. *Acta Psychologica, 85*, 245-262.

Verwey, W. B. (1996). Buffer loading and chunking in sequential keypressing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 22*, 544-562.

Verwey, W. B. (2001). Concatenating familiar movement sequences: The versatile cognitive processor. *Acta Psychologica, 106*, 69-95.

Verwey, W. B., Shea, C. H., & Wright, D. L. (2014). A cognitive framework for explaining serial processing and sequence execution strategies. *Psychonomic Bulletin and Review, 22*(1), 54-77.

Vinter, A. (1994). Hierachy among graphic production rules. A developmental approach. In *Advances in handwriting and drawing : a multi disciplinarity approach* (pp. 275-291). Paris : Europia

Visser, M., Nel, M., de Vries, J., Klopper, E., Olën, K., & van Coller, J. (2014). In-hand manipulation of children aged four and five-years-old: translation, rotation and shift movements, in Bloemfontein. *South African Journal of Occupational Therapy, 44*(2), 22-28.

Viviani, P. (1994). Les habiletés motrices. In M. Richelle, J. Requin, & M. Robert (Eds.), *Traité de Psychologie Expérimentale* (pp. 777-857). Paris : PUF.

Viviani, P., & Schneider, R. (1991). A developmental study of the relationship between geometry and kinematics in drawing movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performances, 17*, 198-218.

Viviani, P., & Terzuolo, C. (1980). Space-Time invariance in learned motor skills. *Tutorials in Motor Behavior* (*Vol. 1*) (pp. 525-533). North-Holland.

Viviani, P., & Terzuolo, C. (1983). The organisation of movement in handwriting and typing. In B. Butterworth (Ed.), *Language Production: Development, writing, and other language processes* (pp. 104-146). Academic Press.

Weil, M., Cunningham, S., & Amundson (1994). Relationship between visuomotor and handwriting skills of children in kindergarten. *American Journal Occupational Therapy, 48*, 982-988.

Wing, A. M. (1980). The height of handwriting. *Acta Psychologica, 46*, 141-151.

Woodworth, R. S. (1899). The accuracy of voluntary movement. *Psychological Review, 3*, 1-119.

Wright, C. E. (1990). Generalized motor programs: Reexamining claims of effector independence in writing. In M. Jeannerod (Ed.), *Attention and performance XIII: Motor representation and control* (p. 294-320). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Wright, C. E. (1993). Evaluating the special role of time in the control of handwriting. *Acta Psychologica, 82*(1-3), 5-52.

Wright, D. L., Black, C. B., Immink, M. A., Brueckner, S., & Magnuson, C. (2004). Longterm motor programming improvements occur via concatenation of movement sequences during random but not during blocked practice. *Journal of Motor Behavior, 36*, 39-50.

Wynn-Parry, C. B. (1966). *Rehabilitation of the hand* (2nd ed.). London : Butterworth.

Zesiger, P. (1995). *Écrire : Approches cognitive, neuropsychologique et développementale*. Paris : Presses Universitaires de France.

Zesiger, P., Mounoud, P., & Hauert, C. A. (1993). Effects of lexicality and trigram frequency on handwriting production in children and adults. *Acta Psychologica, 82*(1-3), 353-365.

Ziviani, J. (1983). Qualitative changes in dynamic tripod grip between seven and 14 years of age. *Developmental Medicine & Child Neurology, 25*, 778-782.

Ziviani, J., & Elkins, J. (1986). Effects of pencil grip on handwriting speed and legibility. *Education Review, 38*, 247-257.

ANNEXE 1 – Agrément du CERNI

Pôle GRENOBLE cognition

Ingénierie, Instrumentation, Plates-formes
Langage, Communication, Interaction
Comportement, Cerveau, Pathologie
Traitements, Modèles, Systèmes

CERNI
Comité d'Ethique pour les Recherches Non Interventionnelles

Objet : Avis sur le projet « Mise en place des automatismes moteurs lors de la production écrite chez l'enfant » présenté par Sonia KANDEL du GIPSA-Lab (CNRS UMR 5216) à Grenoble.

Compte tenu des éléments fournis dans la demande par Sonia KANDEL, le Comité d'Ethique pour les Recherches Non Interventionnelles émet un AVIS FAVORABLE.

Il relève de la responsabilité des chercheurs de se conformer à leurs obligations légales notamment en ce qui concerne les aspects informatique et liberté, ou encore l'homologation du lieu de recherche.

Numéro de l'avis : 2015-11-10-78

A Grenoble, le 10 novembre 2015

La Présidente du CERNI,
Carole Peyrin
Chargée de Recherche CNRS
Laboratoire de Psychologie et NeuroCognition (CNRS UMR5105) et Université de Grenoble

ANNEXE 2 – Convention d'accueil

Convention type pour l'accueil d'un chercheur ou étudiant dans une école du 1er degré

Vu la charte académique relative aux conditions du partenariat entre les établissements scolaires du 1er et 2nd degré et les établissements de recherche ou de formation, signée par le recteur le 2 novembre 2015 et publiée sur le site internet de l'académie de Grenoble.

Article 1er : Parties à la convention

La présente convention règle les rapports entre :

- l'établissement de recherche …….. ……sis…… représenté par ……
- la directrice académique des services de l'éducation nationale (DASEN) de l'Isère Dominique FIS, par délégation du recteur de l'académie de Grenoble.
- Le chercheur responsable du projet : *(nom, prénom)*…….. (*avec coordonnées professionnelles)*

Article 2 : Objectifs du projet

2-1 Projet s'inscrivant dans le cadre de (*intitulé du sujet de recherche ou d'études*) ; le descriptif détaillé du projet et l'avis de l'autorité académique sont annexés à la présente convention. Il est transmis par le directeur d'école pour accord aux familles.
2-2 Activités confiées au chercheur ou à l'étudiant en fonction de l'objectif du projet (*description précise après avis du directeur d'école*)

Article 3 : Lieu et durée du projet

3-1 Lieu précis de déroulement du projet : école xxx
3-2 Dates de début et de fin du projet dans l'école (*attention aux congés scolaires et voyages scolaires*).

Article 4 : Suivi du chercheur/étudiant

L'établissement de recherche : Monsieur/Madame X chargé(e) du suivi du projet
Organisme d'accueil : le directeur de l'école. Le chercheur/l'étudiant doit respecter les consignes données par cette personne.

Le directeur d'école ne doit pas mettre le chercheur ou l'étudiant dans une situation de risque ou de danger et s'assure qu'à aucun moment la présence du chercheur ou de l'étudiant n'est source de perturbation ou de risque pour les élèves.
Le chercheur ou l'étudiant ne peut remplacer un personnel de l'école absent (notamment dans le cadre de la surveillance et de l'encadrement d'élèves qu'il ne peut assurer). De principe, il ne peut donc être seul avec un élève.

Article 5 : Protection sociale et responsabilité civile

Le chercheur/étudiant demeure sous le statut d'enseignant/étudiant de l'établissement de recherche pendant la durée du projet. A ce titre, il conserve la protection sociale dans le cadre de l'assurance maladie dont il est bénéficiaire dans le cadre de sa profession/formation, à titre personnel ou comme ayant-droit.

L'étudiant bénéficie de la législation sur les accidents du travail prévue à l'article L412-8 du code de la sécurité sociale. De son côté, le fonctionnaire chercheur bénéficie de la législation dur les accidents de service.
Chacun doit justifier d'une police d'assurance couvrant sa responsabilité civile personnelle.

Article 6 : Prestations

Le chercheur ou l'étudiant ne perçoit aucun salaire ni gratification de la part de l'éducation nationale.

Article 7 : Obligations du chercheur ou de l'étudiant

Le chercheur ou l'étudiant doit respecter les obligations décrites dans la charte académique mentionnée en visa et se soumettre au règlement intérieur de l'école.
Il doit également soumettre, préalablement, au directeur d'école toute demande de collecte de données personnelles, certaines pouvant nécessiter en amont un accord exprès des parents.

En cas d'absence, le chercheur ou l'étudiant doit informer l'établissement de recherche et le directeur d'école dans les 24H ouvrables précédant sa venue dans l'école.

Article 8 : Bilan

Le chercheur ou l'étudiant adresse au CARDIE et à l'IA-DASEN ayant validé le projet un exemplaire du bilan du projet. Un double est également transmis au directeur de l'école d'accueil, à sa demande.

Article 9 : Durée et résiliation de la convention d'accueil

La présente convention est en vigueur pour la période mentionnée en article 3.

Si l'une des trois parties décide d'interrompre définitivement le projet, elle doit en informer l'autre par un courrier motivé et en adresser une copie au directeur d'école. Un préavis peut être prévu (5 jours par exemple).
Toutefois, en cas de manquement à la discipline et/ou de faute grave du chercheur/étudiant, ou en cas de perturbation du fonctionnement de l'école, l'IA-DASEN, en lien avec le directeur d'école, se réserve le droit de mettre fin au projet sans préavis et en informe immédiatement l'établissement de recherche.

Fait à….., le….
(signature et tampon)

Le représentant de l'établissement de recherche	La directrice académique des services de l'éducation nationale, par délégation du recteur Dominique FIS

Le chercheur responsable du projet

Visa : *Inspecteur de circonscription*	*Visa :* *Directeur d'école*	*Visa :* *Etudiant/chercheur* *(visa apposé ultérieurement après transmission de l'avenant donnant le nom des membres de l'équipe de recherche)*

DESCRIPTIF DETAILLE DU PROJET
Cette partie doit être vulgarisée. Il s'agit de spécifier en quelques lignes : 1. Quelle est la thématique générale de la recherche et les objectifs de l'étude. Précisez si la recherche est soutenue par un organisme reconnu (Région, ANR, Europe…) 2. Quelle est la portée potentielle de l'étude pour le système éducatif (connaissances sur le développement de l'enfant, les apprentissages, les pratiques de classe…) 3. Décrire précisément quelles sont les tâches que les élèves devront effectuer et si celles-ci sont réalisées en collectif ou individuellement. 4. Indiquer le niveau de classe visé, le nombre d'élèves à évaluer, le temps de passation par élève. 5. Indiquer s'il s'agit d'une étude ponctuelle. Dans le cas d'une étude longitudinale : mentionner le nombre d'interventions à prévoir et leur étalement dans le temps. 6. Dans le cas d'entraînements : précisez quelles sont les dimensions entraînées, comment se font les entraînements (durée, fréquence, support (ordinateur, tablette, papier…), s'ils sont menés en classe entière, par groupe ou individuellement et qui les assure. 7. Mettre une copie de la lettre d'information aux parents 8. Indiquer les besoins : mise à disposition d'une salle, matériel expérimental à accueillir, … Date : Signature :

AVIS DU SERVICE ACADEMIQUE
Date : Service :

ANNEXE 3 – Lettre d'information aux familles

ETUDE DE LA MISE EN PLACE DES AUTOMATISMES MOTEURS LORS DE LA PRODUCTION ECRITE CHEZ L'ENFANT

Chercheur titulaire responsable scientifique du projet :

Sonia KANDEL (PR Université de Grenoble-Alpes, GIPSA-lab CNRS UMR 5216)

sonia.kandel@gipsa-lab.grenoble-inp.fr, sonia.kandel@upmf-grenoble.fr

Tel : 04 76 82 80 09

Lieu de recherche : Ecole dans laquelle est scolarisé votre enfant.

But du projet de recherche :

L'objectif de cette recherche est d'étudier comment les enfants apprennent à écrire. Notre projet vise à approfondir nos connaissances sur les processus qui permettent l'automatisation des gestes d'écriture.

Ce que l'on attend de votre enfant (méthodologie)

Si vous acceptez que votre enfant participe à cette étude, il sera amené à reproduire sur une feuille des modèles graphiques du type dessin ou des modèles d'écriture qui s'afficheront sur un écran d'ordinateur. Nous enregistrerons les tracés d'écriture sur une tablette graphique (environ 15 minutes ou deux fois 10-15 minutes dans le cas l'enfant doit passer l'étude en deux sessions). [Nous adapterons la durée de passation en fonction des caractéristiques de chaque étude].

Vos droits de retirer votre enfant de la recherche en tout temps

1/ Votre contribution à cette recherche est volontaire.

2/ Vous pourrez vous en retirer ou cesser la participation de votre enfant en tout temps.

3/ Votre décision de faire participer votre enfant, de refuser de faire participer votre enfant, ou de cesser la participation de votre enfant n'auront aucune incidence sur le parcours scolaire de votre enfant.

4/ Nous demanderons oralement à votre enfant son accord pour participer à l'étude. De plus, votre enfant lui-même, peut à tout moment, se retirer de cette étude. Il suffira qu'il le formule oralement.

Vos droits à la confidentialité et au respect de la vie privée

1/Les données obtenues seront traitées avec la plus entière confidentialité.

2/On voilera l'identité de votre enfant à l'aide d'un numéro aléatoire ; seules les dates de naissance et le niveau de la classe seront mis en correspondance avec chaque numéro aléatoire identifiant la série de données correspondant à un participant.

3/Aucun autre renseignement ne sera dévoilé qui puisse révéler son identité.

4/Toutes les données seront gardées dans un endroit sécurisé et seuls le responsable scientifique et les chercheurs adjoints y auront accès ; les données archivées seront à la fois des données papier (formulaires de consentement, tracés des items) et informatiques (données brutes et analyses).

5/L'anonymisation des données ne nous permettant pas de faire le lien entre un participant et ses informations, il ne sera pas possible de détruire des données spécifiques.

Bénéfices

Les bénéfices sont purement scientifiques et/ou pédagogiques : l'objectif général est d'acquérir de nouvelles connaissances sur les processus d'automatisation des taches d'écriture. En améliorant la compréhension de l'acquisition de l'écriture chez l'enfant, cela permettra à moyen terme d'aider à la mise en place de nouvelles pédagogies d'apprentissage de l'écriture à l'école primaire.

Risques possibles

À notre connaissance, cette recherche n'implique aucun risque ou inconfort autre que ceux liés aux tâches d'écriture. Les mouvements d'écriture sont enregistrés à l'aide d'une tablette graphique et d'un stylo adapté.

Diffusion

Cette recherche pourra être diffusée dans des colloques et elle pourra être publiée dans des actes de colloque et des articles de revue académique.

Vos droits de poser des questions en tout temps

Vous pouvez poser des questions au sujet de la recherche en tout temps en communiquant avec le responsable scientifique du projet par courrier électronique à : sonia.kandel@gipsa-lab.grenoble-inp.fr , sonia.kandel@upmf-grenoble.fr

Consentement à la participation

En signant le formulaire de consentement, vous certifiez que vous avez lu et compris les renseignements ci-dessus, qu'on a répondu à vos questions de façon satisfaisante et qu'on vous a avisé que vous étiez libre d'annuler votre consentement ou de vous retirer de cette recherche en tout temps, sans préjudice.

A remplir par les parents de l'enfant participant :

J'ai lu et compris les renseignements ci-dessus et j'accepte de plein gré que mon

enfant……..… participe à cette recherche.

Nom, Prénom – Signature