



THÈSE

En vue de l'obtention du
DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :
Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

Discipline ou spécialité :
Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives

Présentée et soutenue par :
Jérémy DANNA

Le vendredi 8 juillet 2011

DYNAMIQUE DE COORDINATION DANS LA FORMATION DE LA TRACE ECRITE
CHEZ L'ADULTE ET L'ENFANT

Membres du jury :

Jean-Michel ALBARET, MCU-HDR (PRISSMH, Université Toulouse 3)	Examineur
Jean-Christophe BUISSON, Professeur (IRIT, INPT-ENSEEIH, Toulouse)	Examineur
Edouard GENTAZ, Directeur de Recherche CNRS (LPNC, UPMF, Grenoble)	Rapporteur
Denis MOTTET, Professeur (M2H, Université Montpellier I)	Rapporteur
Jean-Luc VELAY, Chargé de Recherche CNRS (INCM, Université Aix-Marseille II)	Examineur
Pier-Giorgio ZANONE, Professeur (PRISSMH, Université Toulouse 3)	Directeur de Thèse

Ecole doctorale :
Comportement, Langage, Education, Socialisation, COgnition (CLESCO)

Unité de recherche :
Programme de Recherche Interdisciplinaire en Sciences du Sport et du Mouvement Humain
(PRISSMH) – EA 4561

Auteur : Jérémy DANNA

Titre : Dynamique de coordination dans la formation de la trace écrite chez l'adulte et l'enfant

Directeur de thèse : Pier-Giorgio ZANONE

Laboratoire : Programme de Recherche Interdisciplinaire en Sciences du Sport et de Mouvement Humain (EA-4561), UFR STAPS – Toulouse III, Université Paul Sabatier

Discipline : Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives (STAPS)

Ecole doctorale : Comportement, Langage, Education, Socialisation et COgnition (CLESCO)

Résumé :

L'écriture est un mouvement parmi les plus complexes et les plus rapides de notre répertoire moteur. Elle requiert l'activité coordonnée de nombreux muscles et articulations du membre supérieur pour produire une succession de formes conventionnelles, des lettres, de manière suffisamment précise pour être reconnues. Ce travail de thèse a pour objectif de comprendre 1) comment les individus arrivent à contrôler et à coordonner l'ensemble des éléments du système moteur (ici graphomoteur) pour accomplir une telle tâche et 2) comment s'acquiert cette habileté motrice. Les concepts et outils de l'approche dynamique de la coordination motrice permettent d'envisager la formation de la trace écrite comme un processus auto-organisé qui répond aux modèles d'oscillateurs couplés. A partir de la modélisation de l'écriture en termes de couplage non linéaire de deux oscillateurs orthogonaux abstraits, la phase relative entre ces deux oscillateurs permet d'observer, de comprendre et de prédire la formation, le maintien et la dégradation de la trace écrite. Dans notre première étude, centrée sur la coordination graphomotrice adulte dans la reproduction de formes géométriques simples, nous avons confirmé qu'une ellipse d'excentricité intermédiaire et un trait sont plus faciles à tracer que toutes les autres formes elliptiques. Nous avons de plus montré que la production préférentielle d'ellipses d'excentricité intermédiaire est biaisée en faveur de formes plus arrondies lorsque leur orientation devient contraignante. Dans notre deuxième étude, centrée sur la coordination graphomotrice chez l'enfant de 7 à 11 ans, nous avons révélé que les enfants sont plus précis et plus stables dans le tracé de cercles que dans le tracé d'ellipses, préférentiel chez l'adulte. Nos résultats confirment que, comme tout mouvement rythmique coordonné, la stabilité des modes de coordination (grapho)motrice détermine la manière d'écrire.

Mots clés : Graphomotricité ; Théorie des patrons dynamiques ; Auto-organisation ; Coordination motrice ; Oscillateurs Couplés ; Ecriture

Abstract:

Handwriting movement is through one of the fastest and the most complex known to human motor behaviors. This ability involves a sophisticated coordination of many muscles and joints recruited in order to produce a trace sufficiently consistent and precise to be recognized as letters. The aim of the present thesis is to understand 1) how we succeed in controlling and coordinating the motor (here graphomotor) system to realize this task and 2) how this motor behavior is acquired. Concepts and tools of the dynamical approach of the motor coordination permit to consider the written trajectory formation as a self-organized process resulting from the dynamics of non-linear coupled oscillators. From the modeling of handwriting movements in terms of the non-linear coupling of two abstract orthogonal oscillators, the relative phase between these oscillators make possible to observe, to understand and to predict the formation, the maintaining and the deterioration of the written trajectory. In a first study based on graphic coordination of adults in production of simple geometrical shapes, we confirmed that the ellipse with intermediate eccentricity and the line are easier to produce than all other shapes. Moreover, we demonstrated that the preferential production of intermediate ellipse is biased toward a more circular shape when orientation becomes a constraint. In a second study based on graphic coordination of 7 to 11 year-old children, we revealed that children are more precise and stable in circle drawing than in ellipse drawing, preferential in adults. Our results confirm that, as all cyclic coordinated movements, the stability of the motor coordination patterns determine the way of handwriting.

Keywords: Graphonomics; Dynamic patterns theory; Self-organization; Motor coordination; Coupled oscillators; Handwriting

Ce travail de thèse a été réalisé au sein du « Programme de Recherche Interdisciplinaire en Sciences du Sport et du Mouvement Humain » (EA 4561) à l'UFR STAPS à l'Université Toulouse III. Il a été financé par une allocation de recherche et une bourse de monitorat accordées par le Ministère délégué à l'Enseignement Supérieur et à la Recherche.

Tout d'abord, je ne remercierai jamais assez Pier-Giorgio Zanone qui a dirigé ce travail d'une main de maître et qui m'a permis de construire une thèse bien différente de la somme des chapitres qui la composent.

La réalisation de ce travail ne serait pas complète sans les Professeurs Edouard Gentaz et Denis Mottet qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'expertiser ce manuscrit, ainsi que Jean-Michel Albaret, Jean-Christophe Buisson et Jean-Luc Velay qui ont accepté d'être membres de mon jury de thèse.

Je remercie également tous les membres du laboratoire qui ont participé à la réflexion de mon travail, notamment Jessica Tallet et Viviane Kostrubiec. Un merci particulier à Bernard Thon pour m'avoir énormément appris et pour m'avoir aidé à devenir l'enseignant que je suis. Merci Michèle et Odile pour votre bonne humeur et votre gentillesse.

Merci aux travailleurs de l'ombre : Sylvie Athènes, Fabienne Enderli et mes « deux acolytes » de l'N7, Gaëtan André et Jean-Charles Quinton.

Un énorme merci aux « trois mousquetaires » du bureau sans qui je n'aurais pas vécu mes plus belles années de fac : Riri, Mat et Philippe.

Merci aux « Quatre Incommensurables » du bureau d'à côté : Yaya pour la Bienveillance ! Fabien pour la Compassion ! Lolo pour l'Equanimité ! Sylvain pour la Sympathie !

Enfin, je tiens à remercier mes amis les plus proches, dans le désordre : Gui & Elise, Dju & Audrey, Ben & Julie, Nico & Cécé, Raph & Marion, Keks & Gégé, Djé & Claire, Bruno, Domi, Robin, Nonot, Julien et tous ceux que j'ai honteusement oubliés.

Je garde bien évidemment une pensée particulière pour mes parents et pour mon frère... et toutes les autres pour ma puce.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	p 5
CHAPITRE I. Etude de la formation de la trace écrite	p 8
1.1. Introduction	p 9
1.1.1. Instruments et mesures	p 9
1.1.2. Les principales composantes de l'écriture	p 10
1.2. Du mouvement humain au mouvement graphique	p 12
1.2.1. Classe du mouvement de l'écriture	p 12
1.2.2. Le contrôle du mouvement de l'écriture	p 13
1.2.2.1. Le contrôle rétroactif de l'écriture	p 13
1.2.2.2. Programme moteur et contrôle proactif de l'écriture	p 14
1.3. Les invariances de l'écriture	p 15
1.3.1. L'isochronie	p 15
1.3.2. Les homothéties temporelle et spatiale	p 16
1.3.3. L'équivalence motrice	p 18
1.3.4. L'isogonie	p 19
1.4. La question de l'unité fondamentale de l'écriture	p 20
1.4.1. Modèles centrés sur les caractéristiques de la trajectoire	p 20
1.4.1.1. Modèles d'optimisation du geste d'écriture	p 20
1.4.1.2. Théorie cinématique du mouvement rapide d'écriture	p 21
1.4.2. Le graphème, unité symbolique de l'écriture	p 22
1.4.2.1. Le modèle d'Ellis et Young (1988)	p 22
1.4.2.2. Le modèle de Van Galen (1991)	p 23
1.4.2.3. Comment les modèles cognitifs définissent-ils la nature de l'unité fondamentale de l'écriture ?	p 24
1.4.2.4. Comment les modèles cognitifs définissent-ils la taille de l'unité fondamentale de l'écriture ?	p 24
1.5. Lien entre lecture et écriture	p 25
1.5.1. Un « a » est un « A »	p 26
1.5.2. Un « a » n'est pas un « a »	p 27
1.5.3. Intervention de la motricité dans la perception de formes graphiques	p 28
1.6. Les préférences de l'écriture	p 29
1.6.1. Préférences liées aux composantes du système effecteur	p 29
1.6.2. Des orientations préférentielles	p 30

1.6.3.	Orientations de départ et formes préférentielles	p 31
1.7.	De l'invariance à la stabilité	p 33
1.7.1.	Le bilan	p 33
1.7.2.	Le nœud du problème	p 34

CHAPITRE II. Dynamique de coordination graphomotrice

2.1.	Complexité et auto-organisation	p 36
2.1.1.	Concepts et notions clés	p 36
2.1.2.	Le phénomène d'auto-organisation	p 37
2.1.3.	Expérience principes des théories de l'auto-organisation	p 39
2.1.4.	Approche des systèmes dynamiques non linéaires	p 40
2.2.	Dynamique non linéaire de la coordination motrice	p 42
2.2.1.	Concepts et notions clés	p 42
2.2.2.	Dynamique non linéaire dans le domaine de la motricité : un exemple	p 43
2.2.3.	Le phénomène de synchronisation : cas des systèmes d'oscillateurs couplés. p 44	
2.2.4.	Techniques d'analyse issues de la théorie des patrons dynamiques de la coordination motrice	p 44
2.2.4.1.	La phase relative discrète	p 45
2.2.4.2.	La phase relative continue	p 46
2.2.5.	Expérience principes des théories des patrons dynamiques de la coordination motrice	p 47
2.2.6.	Le modèle HKB	p 48
2.2.7.	La méthode de scanning	p 50
2.3.	Dynamique non linéaire de la coordination graphomotrice	p 51
2.3.1.	Modélisation oscillatoire de la trace écrite	p 51
2.3.2.	Vers une théorie dynamique de la formation de trajectoire	p 54
2.3.3.	Dynamique de coordination graphomotrice spontanée	p 59
2.3.4.	Dynamique de coordination graphomotrice contrainte	p 63
2.4.	Problématique – Dynamique de coordination graphomotrice chez l'adulte	p 65

CHAPITRE III - Expérience 1- Dynamique de coordination

graphomotrice chez l'adulte

3.1.	Introduction – Effets de l'orientation et de l'excentricité sur la dynamique de coordination graphomotrice	p 67
3.2.	Méthode	p 68
3.2.1.	Participants	p 68
3.2.2.	Tâche et procédure	p 68
3.2.3.	Matériel	p 70
3.2.4.	Analyse de données	p 70
3.3.	Résultats	p 71
3.3.1.	Analyse géométrique	p 71

3.3.1.1.	Analyse de l'Erreur Spatiale	p 71
3.3.1.2.	Analyse de l'Erreur d'Excentricité	p 73
3.3.1.3.	Analyse de l'Erreur d'Orientation	p 74
3.3.2.	Analyse dynamique	p 75
3.3.2.1.	Analyse de l'Erreur Constante (EC)	p 75
3.3.2.2.	Analyse de la variabilité de la phase relative	p 76
3.3.2.3.	Analyse de l'Erreur Absolue (EA)	p 77
3.3.2.4.	Analyse de l'Erreur Constante et de l'Erreur Absolue aux deux orientations extrêmes	p 78
3.3.2.5.	Analyse de la fréquence	p 79
3.4.	Discussion	p 80
3.4.1.	Synthèse des principaux résultats	p 80
3.4.2.	Validation de l'hypothèse théorique	p 81
3.4.3.	Les patrons graphomoteurs préférentiels peuvent-ils être considérés comme des attracteurs ?	p 81
3.4.4.	Comment expliquer l'orientation préférentielle autour de 1h30 chez des adultes droitiers ?	p 82
3.4.5.	L'hypothèse d'un couplage d'oscillateurs non orthogonaux est-elle plausible ?	p 83
3.5.	Conclusion	p 84
3.6.	Perspectives – Comment s'acquiert la dynamique de coordination graphomotrice durant l'enfance ?	p 85

CHAPITRE IV - Expérience 2 - Dynamique de coordination

	graphomotrice chez l'enfant	p 86
4.1.	Introduction	p 86
4.1.1.	Etude ontogénétique de l'activité graphique et de l'écriture	p 86
4.1.2.	Evaluation de l'écriture chez l'enfant	p 88
4.1.3.	Approche cognitive de l'apprentissage de la graphomotricité	p 90
4.1.3.1.	Une différence entre le fond et la forme	p 90
4.1.3.2.	Le passage d'un contrôle visuel à un contrôle haptique	p 91
4.1.3.3.	Le passage d'un contrôle rétroactif à un contrôle proactif : vers une augmentation de la taille du programme moteur	p 92
4.1.4.	Développement moteur et apprentissage de la graphomotricité	p 93
4.1.4.1.	Le développement de la motricité	p 93
4.1.4.2.	Conséquences sur l'apprentissage de la graphomotricité	p 93
4.1.5.	Approche dynamique de l'apprentissage de la graphomotricité	p 95
4.1.5.1.	Hypothèse de l'emprunt d'une des deux routes d'acquisition	p 96
4.1.5.2.	Conséquences sur l'apprentissage de la graphomotricité – Problématique	p 97
4.2.	Méthode	p 98
4.2.1.	Participants	p 98
4.2.2.	Tâche et procédure	p 98
4.2.3.	Matériel	p 99

4.2.4.	Analyse de données	p 99
4.3.	Résultats	p 100
4.3.1.	Analyse de l'Erreur Constante (EC)	p 100
4.3.1.1.	Scan oblique	p 100
4.3.1.2.	Scan cardinal	p 101
4.3.2.	Analyse de la variabilité de la phase relative	p 102
4.3.2.1.	Scan oblique	p 102
4.3.2.2.	Scan cardinal	p 103
4.3.3.	Analyse de l'Erreur Absolue (EA)	p 103
4.3.3.1.	Scan oblique	p 104
4.3.3.2.	Scan cardinal	p 104
4.3.4.	Analyse de la fréquence	p 104
4.3.4.1.	Scan oblique	p 104
4.3.4.2.	Scan cardinal	p 105
4.4.	Discussion	p 105
4.4.1.	Synthèse des principaux résultats	p 106
4.4.2.	Validation de l'hypothèse théorique	p 107
4.4.3.	La différence entre le paysage dynamique graphomoteur de l'enfant et celui de l'adulte peut-elle être expliquée par la fréquence du mouvement ?	p 109
4.4.3.1.	Le point de vue de l'approche cognitive	p 109
4.4.3.2.	Le point de vue de l'approche dynamique de la coordination motrice	p 110
4.4.4.	Conclusion	p 111
4.4.5.	Perspectives – de la graphomotricité à l'écriture	p 111

CHAPITRE V – Discussion générale – Vers une dynamique de coordination de l'écriture	p 112
5.1. Vers une modélisation oscillatoire dynamique de la trace écrite	p 112
5.1.1. Du modèle classique...	p 112
5.1.2. ... à un modèle perfectionné	p 114
5.1.3. ... vers une modélisation dynamique ?	p 116
5.2. La phase relative comme unité motrice de l'écriture	p 116
5.2.1. D'une unité à l'autre : transition spontanée et transition intentionnelle	p 117
5.2.2. Conséquences en graphomotricité et en écriture	p 118
5.2.2.1. Transition intentionnelle	p 118
5.2.2.2. Transition spontanée	p 119
5.3. Premières analyses de la dynamique de coordination de l'écriture	p 121
5.4. Perspectives de recherche	p 124
Références bibliographiques	p 127

INTRODUCTION GENERALE

Nous sommes de plus en plus amenés dans notre vie quotidienne à interagir avec un environnement virtuel. Les principaux écrits sont informatiques ou téléphoniques, envoyés sous forme d'emails ou de « short message service ». Le support numérique, nouveau moyen d'accéder et de transmettre l'information, pose la question d'une révolution technique de l'écriture. L'utilité de l'apprentissage scolaire de l'écriture cursive en vient même à être débattue (voir, par exemple, l'article du 13 mars 2010 de la revue *Le Devoir* sur le débat entre apprentissage de l'écriture cursive versus script <http://www.ledevoir.com/societe/education/284908/l-ecole-comme-bouee-de-l-ecriture-manuscrite>). Les politiques précisent que cette révolution numérique ne concerne en fait que le support, comme la pellicule photo ou la bande magnétique avec l'image et le son. Jack Lang, alors ministre de l'Education Nationale, confirme dans le discours du 23 janvier 2002 l'urgence de « redonner toutes ses lettres de noblesse à l'activité d'écriture à l'école ». Si l'intention est clairement affichée, la manière d'y parvenir, elle, ne l'est pas. Des programmes détaillés et des instructions précises étaient autrefois adressés aux enseignants. Cela n'est plus le cas aujourd'hui. Le constat est là : près de 10% des enfants ont des dysgraphies, c'est-à-dire des troubles spécifiques de l'écriture sans dysfonctionnement cognitif. Peu d'enfants atteignent ce que les graphothérapeutes appellent le « stade calligraphique » (Bertrand, 2006 ; Thoulon-Page, 2009) où la maîtrise de la forme de l'écriture est suffisante pour permettre un mouvement personnel fluide et acquérir un rythme propre à chacun. Pour reprendre les mots de Bertrand (2006), l'enfant qui tente de personnaliser son écriture avant d'en maîtriser le geste se trouve dans la situation d'un pianiste qui voudrait jouer du Chopin avant de savoir monter ses gammes. La question, encore débattue à l'heure actuelle, est savoir quelles sont les gammes de l'écriture. Autrement dit, il s'agit de déterminer les fondements de l'écriture qui permettent une évaluation et une remédiation de ses troubles.

Datant de plus de 5300 ans, l'écriture manuscrite reste l'un des savoir-faire des plus anciens. Son apparition définit la frontière entre la préhistoire et l'histoire. Les premiers systèmes d'écriture s'attachaient à dessiner le monde ; ils construisaient le sens à partir de

signes symboliques. D'autres systèmes plus tardifs se préoccupèrent de fixer les sons du discours : ils dessinaient ainsi la parole. Qu'il soit idéographique ou phonétique, tout système d'écriture représente une alliance entre l'image et la parole. En 1990, Irigoin a étudié l'évolution de la structure des lettres entre le grec ancien et les lettres capitales de l'écriture cursive actuelle. Il a constaté que chaque système d'écriture est une structure qui atteint un équilibre entre deux tendances conflictuelles : une tendance à la simplification des traces par une réduction du nombre de traits qui les composent, plus simples à tracer et à combiner en lettres, et une tendance à la différenciation des lettres pour ne pas les confondre. Cette tendance à la simplification du tracé de lettre confirme l'importance de considérer que l'écriture est avant tout un mouvement, c'est-à-dire un processus qui se déroule dans le temps et dans l'espace, bien plus qu'une trace statique laissée sur le support.

L'écriture est un mouvement parmi les plus complexes et les plus rapides de notre répertoire moteur. Elle sollicite l'activité coordonnée de multiples muscles et articulations du membre supérieur pour produire une succession de formes graphiques de façon rapide et suffisamment précise pour être reconnues (van Emmerick & Newell, 1989). Comme pour l'ensemble de la motricité humaine, le problème est de savoir 1) *comment les individus arrivent à contrôler et à coordonner l'ensemble des éléments du système moteur (ici graphomoteur) pour accomplir une telle tâche motrice* et 2) *comment s'acquiert cette habileté motrice durant l'enfance*. Ces deux questionnements sont à la source des travaux expérimentaux de cette thèse.

Afin de comprendre comment les individus maîtrisent cette capacité d'écrire à la fois vite et de manière précise, notre intérêt s'est naturellement centré sur la production de la trace écrite chez l'adulte. Dès la fin du 18^{ème} siècle, les premières recherches centrées sur l'écriture ont identifié certaines régularités spatiale et temporelle. L'objectif était d'identifier la persistance de régularités spatio-temporelles dans les mouvements d'écriture en dépit de variations importantes de contexte et d'en comprendre leur signification. A partir de ce repérage, les invariances de l'écriture ont été interprétées à partir de l'activité cognitive mise en œuvre par l'individu dans le contrôle du mouvement humain (e.g. Viviani & Terzuolo, 1980). De manière parallèle, d'autres chercheurs ont observé que certaines traces sont plus simples à écrire que d'autres selon les caractéristiques individuelles ou selon les contraintes d'écriture (Van Sommers, 1984). Le premier chapitre de cette thèse exposera les travaux effectués sur l'analyse de la trace écrite dans le domaine des neurosciences et des sciences cognitives. Ils révèlent d'une part les invariances de la trace écrite, propre au caractère

universel de l'écriture, et d'autre part l'existence de tracés préférentiels, propre au caractère individuel de l'écriture.

Pour comprendre comment les individus arrivent à contrôler et à coordonner l'ensemble des éléments du système graphomoteur, nous utiliserons dans cette thèse les outils et les concepts issus de l'approche dynamique de la coordination (Kelso, 1995, 2009). Cette approche aborde en particulier le problème de la coordination motrice sous l'égide des théories d'auto-organisation appliquées à la motricité humaine (Kugler, Kelso, & Turvey, 1980). Ces théories permettent de comprendre comment des systèmes composés d'un nombre très élevé d'éléments peuvent néanmoins exprimer spontanément un petit nombre de comportements stables, ou patrons de coordination préférentiels, et comment ils changent de patrons en fonction de l'apprentissage. Le second chapitre démontrera comment cette approche de la coordination motrice nous permet de reconsidérer les invariances et les préférences dans la formation de la trace écrite grâce au concept de stabilité. Le troisième chapitre apportera des éléments empiriques pour observer comment les patrons de coordination préférentiels chez l'adulte sont influencés par l'orientation et l'excentricité d'une trace elliptique.

Pour appréhender comment s'acquiert cette habileté graphomotrice, le quatrième chapitre se centrera sur l'approche dynamique de l'apprentissage moteur (Kelso & Zanone, 2002 ; Schöner, 1989 ; Schöner & Kelso, 1988a, 1988b, 1988c ; Schöner, Zanone & Kelso, 1992 ; Zanone & Kelso, 1992, 1997). L'objectif est d'observer les différences fondamentales entre l'activité graphique enfantine et l'activité graphique adulte.

Enfin, le cinquième et dernier chapitre offrira des perspectives de recherche dans le domaine de l'écriture à partir des résultats de nos expériences dans le domaine de la graphomotricité et d'une expérience en cours dans le domaine de l'écriture. L'objectif est de proposer une « modélisation oscillatoire dynamique » de l'écriture à partir de l'évolution de la stabilité du mouvement coordonnée impliqué dans l'écriture.

CHAPITRE I

Etude de la formation de la trace écrite

Ecrire, c'est rédiger, élaborer des phrases, du texte, mais c'est aussi former des lettres et les lier. C'est dans cette seconde acception du terme que l'écriture nous intéresse ici, c'est-à-dire en tant qu'acte graphomoteur, ou geste graphique, un mouvement qui laisse des traces (Le Roux, 2005).



1.1. Introduction

Zesiger (1995) distingue l'ensemble des processus mis-en-jeu dans l'acte d'écrire selon trois échelles différentes. Un premier niveau d'analyse étudie les processus impliqués dans l'organisation du récit d'un texte, c'est-à-dire dans la construction de l'enchaînement des phrases qui doivent respecter une certaine logique pour en permettre sa compréhension. Les processus impliqués à ce niveau sont non spécifiques à l'écriture (la mémoire épisodique, la mémoire de travail, les processus syntaxiques dans la planification et l'organisation d'un texte etc.). Un deuxième niveau d'analyse se centre sur les processus impliqués dans la production de mots. Ces processus, dits orthographiques, concernent la structure et le fonctionnement du lexique et de la syntaxe ; il s'agit des processus responsables de la génération d'une représentation spécifiant la séquence de lettres qui forment le mot. Enfin, le troisième niveau implique des processus perceptivo-moteurs mis en œuvre dans la production de la lettre. C'est à ce dernier niveau que l'écriture nous intéresse ici, en tant que mouvement qui forme une trace.

1.1.1. Instruments et mesures

Dès la fin du 19^{ème} siècle, les premiers travaux centrés sur l'analyse de la trace écrite ont révélé les premiers principes de la graphomotricité (Binet et Courtier, 1893 ; Jack, 1895). Afin de connaître la cinématique de la trace, ces auteurs utilisaient la plume électrique d'Edison. Alfred Niaudet (1878) a effectué une description détaillée du fonctionnement de cet appareil représenté sur la Figure suivante.

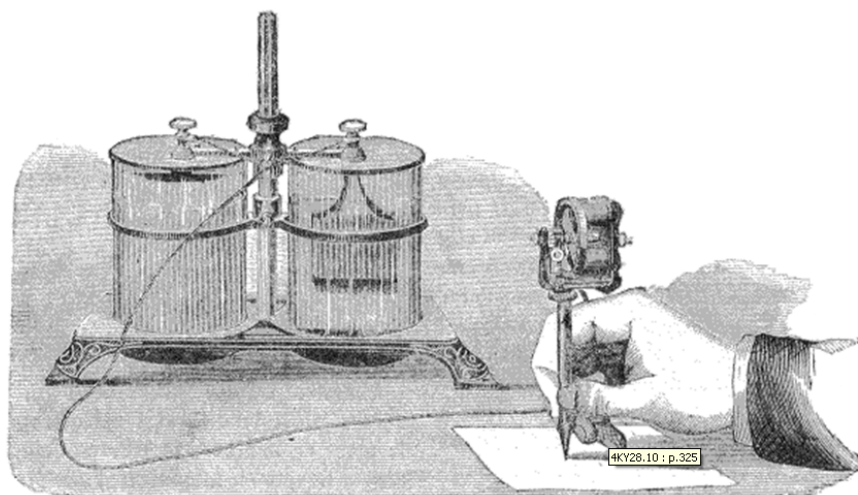


Figure 1 : Plume électrique d'Edison, avec sa pile (tiré de Niaudet, 1878, p. 325).

La plume d'Edison permettait de tracer des traits discontinus formés d'un très grand nombre de petits trous percés dans le papier. Ces trous étaient effectués par une pointe en acier animée d'un mouvement de va-et-vient à une fréquence de 180 battements par seconde (quand l'appareil ne subit aucun frottement). L'utilisation de ce type de stylo ne permettait pas une écriture à vitesse spontanée mais une écriture plus lente, telle que celle utilisée en calligraphie.

Depuis le début des années 1960, l'utilisation de la tablette graphique permet d'enregistrer avec une plus grande fiabilité et précision les coordonnées cartésiennes instantanées de la pointe du stylo glissant sur la surface de la tablette (cf. Figure 1). Les limites de précision spatiale qui peuvent être obtenues sont de l'ordre de 0,2 mm et celles de précision temporelle de 5 ms (200 Hz). Les projetés orthogonaux des déplacements de la pointe du stylo au dessus de la tablette peuvent également être enregistrés si celui-ci ne dépasse pas 2 à 3 cm. L'avantage considérable de l'utilisation de ces tablettes se situe dans l'accessibilité des données cinématiques, même si le changement de support (du papier à l'écran) peut influencer notre manière d'écrire, en particulier chez l'enfant.

1.1.2. Les principales composantes de l'écriture

Les mouvements d'écriture se caractérisent par un déplacement dans l'espace de l'effecteur, la main, pour produire une trace dans le plan d'écriture. Plus précisément, ils permettent de tracer des lettres et de les lier entre elles, d'effectuer une transition gauche-droite pour ce qui est de notre alphabet, d'exécuter des sauts (en avant pour séparer les mots et en arrière pour placer les signes diacritiques) et de contrôler la pression du stylo sur la surface d'écriture.

Ecrire sollicite l'activité coordonnée de multiples muscles et articulations du membre supérieur pour produire une succession de formes graphiques de façon rapide et suffisamment précise pour être reconnues. Selon van Emmerick & Newell (1989), l'écriture implique 26 degré de libertés¹ (ddl) et 43 muscles dans tout le membre supérieur. Le nombre élevé de ddl associés à ces mouvements a pour conséquence de nombreuses alternatives dans la sélection des groupes musculaires mobilisés pour effectuer un tracé. Le système « bras-main-doigts » possédant de nombreux ddl, de nombreux auteurs ont centré leurs recherches sur l'étude de l'activité des principales articulations impliquées dans l'acte d'écrire, s'accordant sur le fait

¹ Qu'il s'agisse de statistique, de cinétique, d'anatomie ou de mécanique, le terme degré de liberté est défini par Viviani comme « le nombre de variables, parmi celles décrivant un phénomène, que l'on peut faire varier de façon indépendante » (Viviani, 1994, p. 780). Ici, le terme est défini d'un point de vue anatomique : « Le nombre de ddl d'une articulation correspond au nombre de rotations indépendantes permises entre les segments qu'elle relie » (Viviani, 1994, p. 780). Par exemple, l'épaule sollicite 3ddl : la flexion/extension, l'abduction/adduction et la rotation interne/externe.

que dans la production de lettres à taille normale, seuls le poignet et les doigts sont fortement mobilisés (Denier van der Gon, Thuring et Strackee, 1962 ; Denier van der Gon et Thuring, 1965 ; Dounskaïa, Van Gemmert et Stelmach, 2000 ; Hollerbach, 1981 ; Teulings, 1996 ; Teulings, Thomassen, & Maarse, 1989).

Le système « poignet-doigts » a plus précisément été étudié à partir de l'activité de deux principaux ddl : la flexion/extension de la pince des doigts et la rotation autour de l'axe du poignet résultant d'une combinaison d'une flexion/extension palmaire, d'abduction/adduction selon le niveau de pronation/supination de l'avant-bras (Teulings *et al.*, 1989). Enfin, une dernière simplification du niveau d'analyse de l'écriture se situe dans la correspondance acceptée entre les composantes spatiales x et y des déplacements du stylo et les composantes biomécaniques qui génèrent les mouvements d'écriture (Athènes, Sallagoïty, Zanone & Albaret, 2004 ; Bullock, Grossberg, & Mannes, 1993 ; Hollerbach, 1981 ; Lelivelt, Meulenbroek & Thomassen, 1996 ; Meulenbroek, Thomassen, Schillings & Rosenbaum, 1996). Même si quelques différences notables ont été révélées par certains auteurs (Thomassen et Meulenbroek, 1998 ; van Emmerick et Newell, 1989), notamment entre l'angle théorique de 90° entre l'axe x et y et l'angle réel de l'activité du poignet et des doigts autour de 70° (Dooijes, 1983), les composantes spatiales, horizontales et verticales, correspondent approximativement aux mouvements d'adduction-abduction du poignet et de flexion-extension des doigts (Lelivelt *et al.*, 1996). Notons que cette correspondance dépend de l'orientation de l'avant-bras et du degré de pronation de l'avant-bras, ce dernier devant être placé parallèlement à l'axe y dans le cas d'une pronation maximale pour établir une forte correspondance (cf. Figure 2).

L'écriture peut être décrite par des déplacements de deux composantes principales (le poignet et la pince des doigts) afin de tracer des lettres sur un plan (déterminé par les axes x et y) et de les lier entre elles grâce une translation de la gauche vers la droite (dans le système alphabétique occidental) et d'éviter ainsi la superposition des lettres. La progression droite-gauche n'a jusqu'à présent suscité que peu d'intérêt. Elle a été considérée comme un facteur additionnel (Hollerbach, 1981) ayant un impact discutable sur les caractéristiques spatiales et temporelles de la trace produite (Thomassen & Meulenbroek, 1993 ; Thomassen, Meulenbroek, van Lieshout et Swinnen, 1997). Enfin, une troisième composante correspond aux « sauts » effectués lors de changement de mot, de ponctuation ou de retour à la ligne. Ces sauts sont effectués à la fin d'un mot ou après l'écriture successive de 8-9 lettres pour permettre le dépassement par la main de la position courante du stylo de telle manière à écrire un maximum de lettres sans lever le stylo (Thomassen, Meulenbroek, Schilling &

Steenbergen, 1996). L'espacement entre les lettres et les mots, est un indice de la qualité de production de l'écriture, si bien qu'il fait partie d'un des 13 critères d'analyse du test BHK construit par Charles, Soppelsa et Albaret (2003 ; Hamstra-Bletz, de Bie & den Brinker, 1987) qui constitue actuellement la référence en France dans la détection des dysgraphies. Au-delà des facteurs cinématiques, des facteurs cinétiques tels que la pression du stylo exercée sur la feuille influencent la qualité de l'écriture (Chang & Yu, 2009). Cependant, l'ensemble de ces facteurs ne seront pas développés dans le présent document, car notre étude du mouvement de l'écriture se centre sur le mouvement généré par la coordination de deux ddl du système « poignet-doigts », assimilés aux composantes spatiales x et y (respectivement) de la trajectoire du stylo.

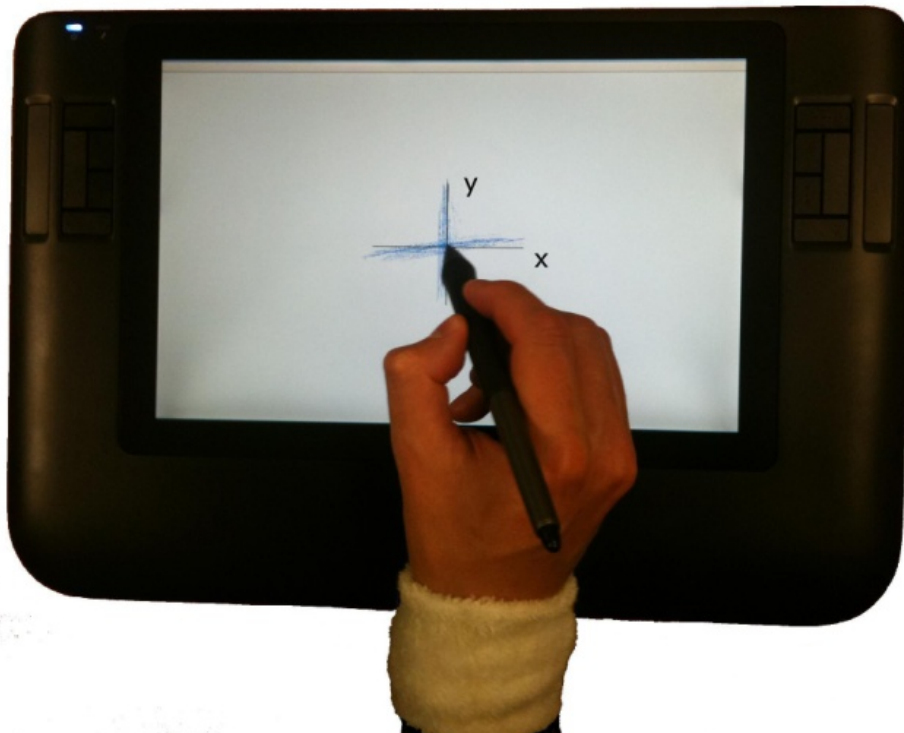


Figure 2 : Illustration de la correspondance entre les traces produites par les mouvements exclusifs du poignet et des doigts (en bleu) et les composantes principales (en noir) d'une tablette graphique (Wacom), respectivement horizontale et verticale.

1.2. Du mouvement humain au mouvement graphique

1.2.1. Classe du mouvement de l'écriture

Zesiger (1995) considère que les mouvements d'écriture appartiennent à la classe des mouvements séquentiels ou sériels. Selon Schmidt (1988), la classe des mouvements sériels est une classe intermédiaire entre la classe des mouvements discrets, qui présentent un début

et une fin identifiables par une vitesse initiale et finale nulle, et la classe des mouvements continus, tels que ceux effectués dans une tâche de poursuite visuo-manuelle périodique. Cette classification dépend non seulement du type de tâche effectuée mais également de la vitesse des mouvements. Classiquement, la « rapidité » des mouvements périodiques tels que l'écriture est mesurée par la fréquence de mouvement. Cette dernière correspond au nombre de cycles effectué par unité de temps, conventionnellement la seconde. La fréquence spontanée de l'écriture varie entre 0 et 7 Hz, avec une fréquence moyenne chez l'adulte autour de 5 Hz. Cette fréquence, relativement élevée, n'est pas sans conséquence quant à la question de la précision du geste et de son contrôle.

1.2.2. Le contrôle du mouvement de l'écriture

L'approche cognitive de la motricité distingue deux modes de contrôle du mouvement humain : un contrôle rétroactif à partir des informations sensorielles en retour et un contrôle proactif à partir des paramètres du mouvement mémorisés par l'apprentissage moteur sous forme de programme moteur (Schmidt, 1975).

1.2.2.1. Le contrôle rétroactif de l'écriture

Le contrôle rétroactif de l'écriture est principalement visuel et tactilo-kinesthésique. De nombreuses études ont montré que ces deux systèmes perceptifs avaient des rôles différenciés (e.g. Smyth & Silvers, 1987) même s'ils sont en étroite collaboration dans l'analyse de propriétés communes de l'environnement telles que la localisation, la forme, la taille et l'orientation d'un objet (Gentaz, 2009).

Le contrôle rétroactif visuel du mouvement d'écriture permet le contrôle spatial de l'écriture. Le contrôle spatial de l'écriture fait référence à l'agencement du texte dans l'espace de la feuille, des mots sur la ligne et des espaces entre les lettres. Smyth et Silvers (1987) ont analysé l'écriture produite par des participants sans contrôle visuel de la trace qu'ils produisaient. Les résultats révèlent qu'en l'absence de vision, l'agencement spatial général et l'orientation des mots étaient fortement dégradés. Par contre, la structure du mot et la qualité des lettres étaient peu affectées par l'absence de vision à l'exception des lettres à jambage (m, n, u et w) qui se confondaient à cause d'un nombre incorrect de « barres » ou de « jambes ». La première conclusion est que l'agencement spatial dans la feuille et la structure même de la trace seraient contrôlées différemment. La deuxième conclusion est qu'il y aurait une certaine invariance de l'écriture dans la structure de lettre et du mot qui ne dépendrait pas ou plus d'un contrôle visuel du mouvement chez l'adulte.

Le contrôle haptique ou tactilo-kinesthésique de l'écriture concerne toutes les informations tactiles et kinesthésiques en provenance du mouvement du membre effecteur en train de produire la trace. S'il est aisé d'observer où se pose le regard d'un individu, il est bien plus difficile de quantifier s'il prend en compte les informations haptiques mises en jeu dans le mouvement effectué. La particularité de la modalité haptique est que l'information prélevée est spécifiquement liée au mouvement d'écriture alors que le contrôle visuel de l'écriture s'effectue à la fois sur la trace en train de se produire et sur la trace produite. Parce que l'observation de la modalité haptique ne peut s'effectuer de manière directe, Bluteau, Coquillard, Payan et Gentaz (2008) se sont posé la question du guidage haptique des caractéristiques cinématiques et géométriques de la trace dans une tâche d'apprentissage de tracés d'ellipses chez l'adulte. Le principe du guidage haptique est d'ajouter des informations haptiques afin d'aider voire de diriger le mouvement via un dispositif à retour de force. Dans leur étude, ils ont révélé la supériorité d'un guidage à base de profils de forces sur un guidage à base de positions. Même si cette étude se limite à l'apprentissage de nouvelles traces chez l'adulte, considéré comme un expert en écriture, cette étude nous intéresse particulièrement car elle pose la question de la nature de la représentation de la lettre. La lettre pourrait être encodée en termes de profils de force et d'accélération, spécifiques à la cinétique et à la cinématique du mouvement plutôt qu'en termes de coordonnées cartésiennes. Aussi cette hypothèse pose la question de la nature du programme moteur mis en jeu dans l'écriture.

1.2.2.2. Programme moteur et contrôle proactif de l'écriture

A partir d'une certaine vitesse, le mouvement devient trop rapide pour être contrôlé via des feedback sensoriels. Le contrôle du mouvement s'effectuerait donc en amont, via une programmation motrice. Le concept de « programme moteur » a été initialement introduit par Keele (1968) comme étant « un groupe de commandes musculaires qui sont structurées avant que le mouvement commence et qui autorise le déroulement du geste sans aucune influence des retours sensoriels ». Ce concept fournit une réponse à la possibilité de produire un mouvement de type « balistique » ou « rapide », c'est-à-dire un mouvement dont la durée est trop courte pour que les retours d'informations sensorielles puissent l'influencer. Le programme moteur est donc mis en place avant l'initiation même du geste et conduit à un mode de contrôle dit proactif, par opposition à un mode de contrôle rétroactif qui implique l'utilisation de retours d'informations sensorielles pendant l'exécution du mouvement.

Schmidt (1976) compléta cette perspective du contrôle en boucle ouverte en introduisant la notion de programme moteur généralisé (PMG). Il s'agit d'un programme qui

n'est pas spécifique à un mouvement donné mais à toute une catégorie ou une classe de mouvements. La paramétrisation du PMG permettrait d'adapter le PMG propre à la classe du mouvement aux contraintes de l'environnement ou aux objectifs fixés préalablement (e.g. la force, la vitesse ou encore l'amplitude du mouvement).

Enfin, Viviani (1994) définit le programme moteur comme « une structure abstraite (...) qui spécifie les rapports topologiques et séquentiels entre ses composantes ; une fois sélectionnée, cette structure engendre une séquence de commandes, dont l'ordre préétabli n'est pas modifiable par les afférences sensorielles. Les déterminants métriques et temporels du geste, ainsi que les groupes musculaires impliqués dans son exécution, ne sont pas spécifiés explicitement par le programme. Celui-ci prévoit un ensemble de paramètres qualitatifs et quantitatifs qui, fixés au moment de l'exécution, déterminent les aspects spatio-temporels du geste et les synergies musculaires nécessaires, la fixation des paramètres étant assurée par des processus indépendants » (p. 785).

Cette dernière définition renforce la distinction entre l'invariance liée à la structure, la topologie du mouvement et la paramétrisation du mouvement. Concernant l'invariance du mouvement, notamment en graphomotricité, Viviani (Lacquaniti, Terzuolo & Viviani, 1983 ; Viviani & Terzuolo, 1980) fut un protagoniste central dans la découverte des principales invariances dans le mouvement. Il est à noter que, dans une vaste majorité, ces invariances ont été mises en évidence dans l'étude fine de la production graphique ou de l'écriture.

1.3. Les invariances de l'écriture

1.3.1. L'isochronie

Les propriétés d'invariance ont été rapidement identifiées dès les premières études centrées sur l'examen de la trace écrite. Les travaux précurseurs de Binet et Courtier (1893) ont montré la relation directe entre la grandeur d'une forme graphique, telle une lettre, et la vitesse à laquelle elle est tracée. Autrement dit, plus une lettre est grande, plus la vitesse du tracé est augmentée, de telle manière que la fréquence ou la durée de mouvement est maintenue relativement constante. Ce principe, appelé isochronie, a été confirmé par de nombreuses études (Denier van der Gon et Thuring, 1965 ; Michel, 1971). Notamment, Viviani et Terzuolo (1980, 1982) ont révélé que la taille d'écriture n'a pas d'effet sur le temps d'écriture.

Ce principe a également été retrouvé lors de mouvements périodiques simples, comme lors d'une tâche de traçage de cercle de façon répétée (Viviani & McCollum, 1983), lors d'imagerie mentale du mouvement graphique (Decety et Michel, 1989) et lors de tâche autre que graphique telle que la préhension (Jeannerod, 1988). Cependant, des études ont montré que le principe d'isochronie n'était retrouvé que dans des variations plutôt limitées de la taille d'écriture (Greer & Green, 1983 ; Thomassen & Teulings, 1985 ; Wing, 1980 ; Wright, 1990, 1993).

1.3.2. Les homothéties temporelle et spatiale

Dans une étude de l'écriture dactylographiée, Viviani et Terzuolo (1980) ont montré que pour un même mot tapé à différentes vitesses, l'intervalle temporel entre chaque frappe de lettres successives ne varie pas s'il est rapporté à la durée totale prise pour dactylographier l'ensemble du mot. Autrement dit, comme nous pouvons le voir sur la Figure 3, la proportion temporelle entre chaque frappe reste constante indépendamment du temps de production total. Ces auteurs parlent de « timing relatif » ou d'« homothétie temporelle » (Viviani & Terzuolo, 1980, 1982).

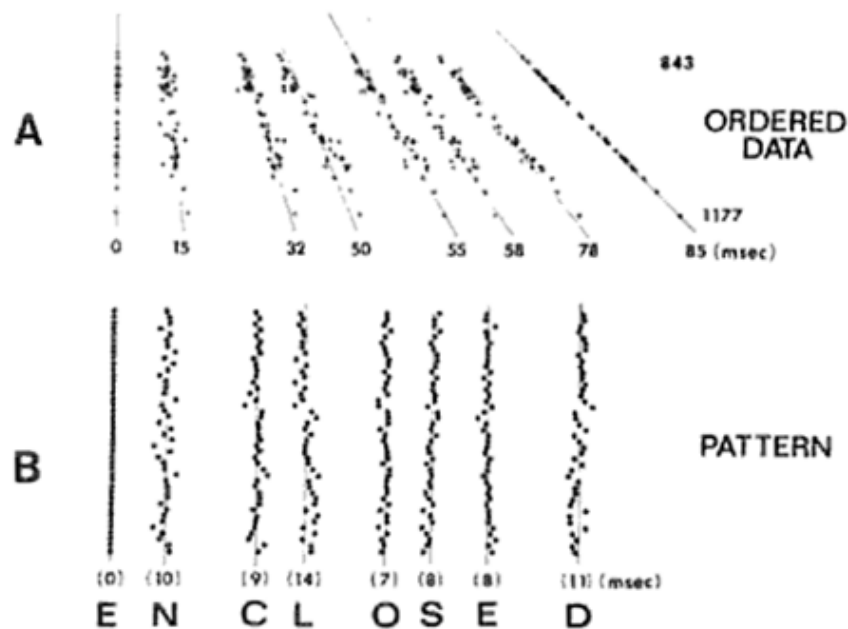


Figure 3 : Exemple d'homothétie temporelle en dactylographie. En A, exemple du maintien de la structure temporelle dans la séquence motrice du mot « ENCLOSED », exprimée par le ratio dans les intervalles de temps, malgré l'augmentation de la vitesse (à droite). En B, normalisation de chaque séquence de ce même mot par la durée moyenne (tiré de Viviani et Terzuolo, 1980).

Cette invariance n'est pas spécifique à l'écriture dactylographiée, mais se retrouve aussi dans l'ensemble des conduites graphomotrices, comme par exemple la production de logogrammes chinois (Nihei, 1984). Concernant l'écriture manuscrite, Cadopi & Viviani (1984) ont révélé que les rapports temporels entre les segments d'un même motif restent inchangés face à des modifications de la durée totale du motif.

A partir d'observations plus anciennes (Merton, 1972 ; Raibert, 1977), Viviani et Terzuolo (1980) ont décrit une invariance spatiale dans la production d'écriture. Cette invariance résulte de la capacité à maintenir constants les rapports géométriques entre les divers points remarquables de la trace (rebroussement, maxima de vitesse, etc.) face à une variation de la taille des lettres. Ils parlent ainsi d'homothétie spatiale. Notons cependant que certaines critiques ont nuancé cette propriété d'homothétie spatiale (Gentner, 1982 ; Wright, 1990). Par exemple, Wright (1990) a analysé les similarités des traces écrites en fonction de leur taille, de la main employée et de la présence d'informations visuelles. Il a montré que l'utilisation de la main non dominante entraînait des violations du principe d'homothétie spatiale associées à la disparition d'un trait graphique (la boucle).

En réalité, les homothéties spatiale et temporelle contribuent à la remarquable invariance que présente l'écriture, c'est-à-dire du maintien de la même structure spatio-temporelle de la lettre ou du mot, indépendamment de leur vitesse de production ou de leur taille (cf. Figure 4).

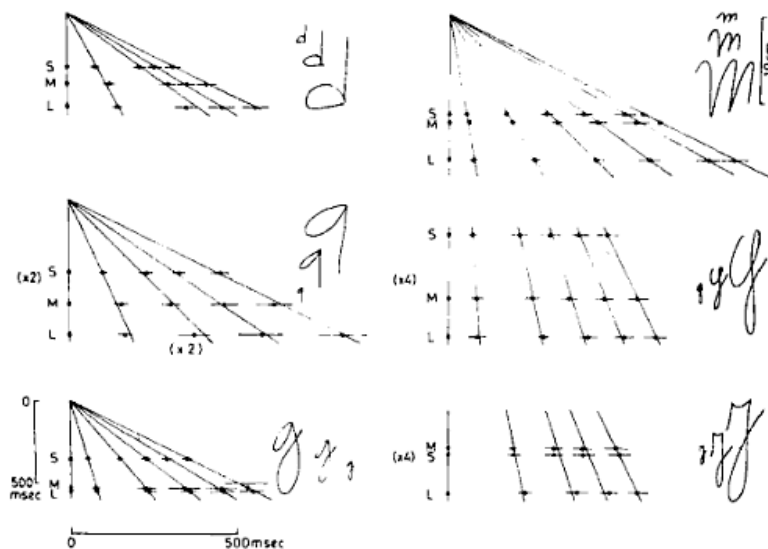


Figure 4 : Exemples d'invariance spatio-temporelle dans la production de six lettres de différentes tailles. A gauche de chaque lettre écrite, l'alignement des points illustré par les droites révèle une proportion temporelle constante de chaque partie de la lettre, indépendamment de la taille des lettres (tiré de Viviani et Terzuolo, 1980).

1.3.3. L'équivalence motrice

De manière générale, la capacité à maintenir la même structure spatio-temporelle d'une réponse motrice indépendamment de l'effecteur a été définie par Lashley (1930) comme l'équivalence motrice. En écriture, elle représente la constance dans la structure des lettres, dans l'inclinaison et l'allure générale de la trace graphique écrite par différentes parties de son corps ou différents instruments scripteurs. L'exemple ci-dessous du mot « Coordination » écrit par Bernstein (1947) en variant à la fois la taille du mot et les effecteurs illustre les phénomènes d'homothétie spatiale, facile à détecter à l'œil, et d'équivalence motrice, puisque la forme globale de la trace est maintenue même lorsqu'elle est produite par des segments corporels aussi incongrus que la bouche, le pied ou le coude. Notons que le principe d'équivalence motrice préconise qu'il est également possible de coordonner de différentes façons les mêmes articulations pour produire le même tracé graphique.

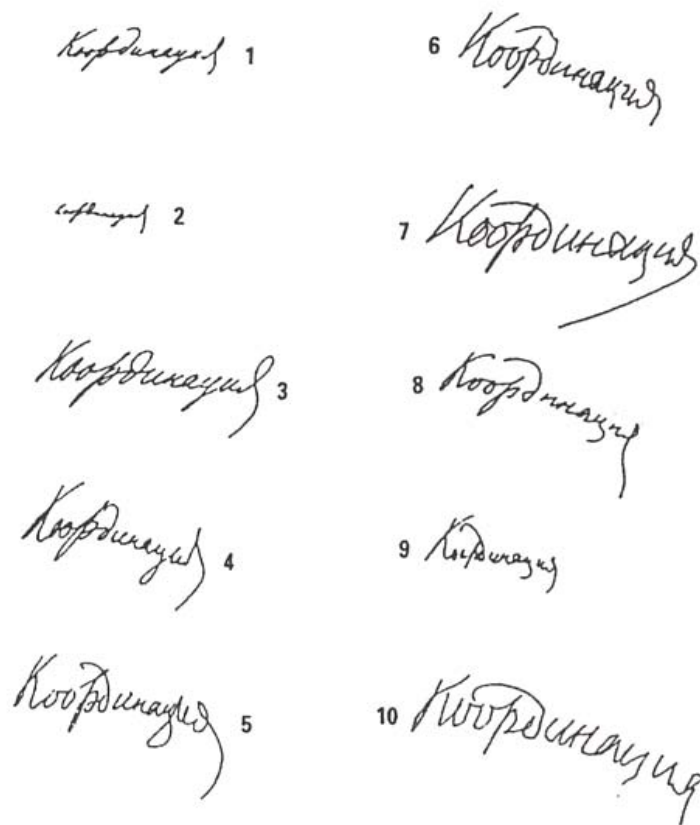


Figure 5 : Mot « coordination » écrit en russe par Bernstein en tenant le stylo avec les doigts de la main droite (1 : taille normale; 2 : petite taille), en bloquant les doigts (3), en attachant le stylo au-dessus du poignet (4), au coude (5), à l'épaule (6), au gros orteil du pied droit (7), en serrant le stylo entre les dents (8), en le tenant avec la main gauche (9), et attaché au gros orteil du pied gauche (10) (tiré de Bernstein, 1947).

1.3.4. L'isogonie

Au-delà du phénomène d'isochronie, les travaux précurseurs de Binet et Courtier (1893) et de Jack (1895) dans l'analyse de la trace écrite ont également décrit que « les jambages qui se font en ligne droite (...) sont plus rapidement tracés que les parties courbes des lettres » (Binet et Courtier, 1893) et que « les parties courbes des lettres et des figures sont formées plus lentement que les parties rectilinéaires, et (...) la vitesse d'une courbe varie approximativement avec le rayon de courbure » (cité et traduit dans Zesiger, 1995, p. 103). A partir des années 80, grâce aux instruments tels que les tablettes graphiques qui ont permis de mesurer la cinématique des déplacements de la pointe du stylo, la relation entre la courbure de la trace et la vitesse à laquelle la trace était produite a été établie par Viviani et collaborateurs (Lacquaniti, Terzuolo & Viviani, 1983 ; Viviani, 1986 ; Viviani & Terzuolo, 1982). Ces études ont abouti à la loi de puissance $2/3$ reliant les composantes spatiales de la trace, à savoir la courbure, et les composantes cinématiques de la trace, à savoir la vitesse angulaire. Par la suite, cette covariation entre courbure et vitesse a été analysée extensivement à la fois dans la production de mouvements périodiques et apériodiques, donnant lieu à une modélisation, telle que :

$$A(t) = kC(t)^\alpha \quad 1.1$$

ou

$$V(t) = kR(t)^\beta \quad 1.2$$

où A est la vitesse angulaire, C la courbure, V la vitesse tangentielle, R le rayon de courbure et k une constante appelée gain de vitesse. Il a été montré que la valeur des exposants α et β était fixée à une valeur de $1/3$ et $2/3$ (respectivement). La force de cette relation a été de montrer que la valeur de cet exposant pouvait être retrouvée dans des conditions variées d'exécution, par exemple, à travers différentes amplitudes de mouvement (Viviani & Flash, 1995). Cependant, certaines études ont montré que la valeur de l'exposant β ne restait pas constante lors de la production de formes composées de traits de différentes tailles (Teulings, Thomassen & Van Galen, 1986 ; Thomassen & Teulings, 1983) ou lors de la production de formes composées de plusieurs traits avec des points de discontinuité (Teulings *et al.*, 1986 ; Plamondon & Guerfali, 1998).

1.4. La question de l'unité fondamentale de l'écriture

La définition de la nature et de la taille de l'unité fondamentale de la trace écrite est différente selon chaque modèle d'analyse. D'un côté, les modèles centrés sur les caractéristiques de la trace ont cherché à la déconstruire jusqu'à un niveau le plus primitif et à repérer les caractéristiques spécifiques à chaque unité. Envisageant l'écriture comme une concaténation de ces unités, l'objectif de ces modèles était de repérer, d'extraire, de définir et d'interpréter les caractéristiques de chaque unité comme principes fondateurs de la formation, du contrôle et de la reconstruction de la trace écrite (Flash & Hogan, 1985 ; Hollerbach, 1981 ; Plamondon, 1993). D'un autre côté, les modèles cognitifs ont défini l'unité fondamentale à partir des caractéristiques symboliques de l'écriture, retranscrits ensuite en tant que programmes moteurs (Ellis & Young, 1988 ; Van Galen, 1991). Dans un souci de concision, nous ne présenterons que les principaux modèles référents.

1.4.1. Modèles centrés sur les caractéristiques de la trajectoire

De nombreux modèles ont cherché à décrire et expliquer les principes fondamentaux des caractéristiques de la trace à partir du mouvement produit par le scripteur. Nous pouvons regrouper ces modèles selon les principes fondamentaux qu'ils exploitent ou sur lesquels ils reposent. Parmi ces modèles, se trouvent ceux fondés sur des principes minimisateurs (Engelbrecht, 2001 ; Wada & Kawato, 1995) : minimisation de l'accélération (e.g., Neilson, 1993), de l'énergie (Nelson, 1983), des secousses ou « jerk » (Flash & Hogan, 1985), des cassures ou « snap » (Edelman & Flash, 1987) et ceux fondés sur des fonctions : des exponentielles (Yasuhara, 1975), des gaussiennes (Leclerc, Plamondon, & Lorette, 1992) ou des lognormales reliées à des propriétés globales des réseaux neuromusculaires de l'effecteur (Plamondon, 1995a, 1995b). Notons que le modèle d'Hollerbach (1981), centré sur les composantes oscillatoires de l'écriture, fait également partie de ces modèles. Cependant, de par l'intérêt plus particulier que nous lui portons, celui-ci sera expliqué dans le prochain chapitre.

1.4.1.1. Modèles d'optimisation du geste d'écriture

Le modèle proposé par Flash et Hogan (1985) postule une logique de contrôle du mouvement humain par son efficacité. Par exemple, parmi toutes les trajectoires possibles pour relier des points, il semblerait que celle qui est choisie correspond à celle qui est la plus lisse, c'est-à-

dire celle impliquant une minimisation des variations d'accélération. Ces auteurs ont nommé ce principe le minimum jerk model ou le modèle de la secousse minimale. Le jerk (ou secousse) est déterminé par la dérivée temporelle de l'accélération (viz. la 4^{ème} dérivée de la position). Edelman & Flash (1987) ont par la suite analysé la variation des jerks pour conclure que toutes les lettres de l'alphabet l'écriture peuvent être tracées à partir de quatre unités fondamentales, représentées sous forme de symboles :

- la forme de la tasse retrouvée dans la lettre « u »
- l'ovale retrouvé dans la lettre « o »
- le crochet comme dans le « t »
- le trait vertical, appelé gamma, retrouvé dans le « l ».

L'écriture cursive serait le fruit de ces quatre unités fondamentales qui se chevaucheraient afin de produire des traces complexes. Des conditions initiales supplémentaires sur la position, la vitesse et l'accélération seraient imposées au début et la fin de chaque unité pour aboutir à des connexions les plus fluides possibles.

1.4.1.2. Théorie cinématique du mouvement rapide d'écriture

Le modèle cinématique de Plamondon (Plamondon, 1993, 1995a, 1995b, 1998 ; Plamondon, Feng & Woch, 2003) est le plus actuel et le plus précis des modèles de reconstruction de la trace écrite. Ce modèle repose sur le postulat d'un contrôle proactif du mouvement et sur les caractéristiques neuromusculaires de l'effecteur. Expert en électronique, Plamondon assimile les groupes musculaires de l'effecteur à des transistors. Dans un système électronique purement séquentiel, la réponse en sortie est logarithmique. Dans un système purement sériel, la réponse en sortie est gaussienne. Sachant que l'activation musculaire n'est ni totalement parallèle, puisque toutes les contractions des cellules musculaires ne s'effectuent pas en même temps, ni totalement sérielle, puisque les contractions ne sont pas strictement successives, la réponse de ce système mixte est sous forme log-normale. En considérant l'activité du groupe musculaire agoniste et l'activité décalée et plus faible du groupe musculaire antagoniste, la vitesse du mouvement serait donc la différence entre ces deux groupes, d'où une réponse de type delta-lognormale.

D'après ce modèle, l'unité fondamentale de l'écriture serait définie d'un point de vue cinématique par le vecteur vitesse. D'un point de vue graphique, cette unité correspondrait à un arc de cercle de courbure et de taille variable selon les paramètres du vecteur vitesse correspondant. Sans rentrer dans les équations modélisant l'ensemble des paramètres nécessaires à la formation de trajectoire, retenons que le SNC contrôlerait uniquement

l'orientation et l'amplitude de chaque vecteur vitesse. Cependant, toutes les trajectoires correspondantes à chaque vecteur vitesse ne seraient pas directement apparentes, mais partiellement cachées dans la trace selon un processus de surimposition des trajectoires.

Les principaux avantages de ce modèle sont 1) l'excellent pourcentage de reconstruction de la trajectoire produite et 2) la prise en compte automatique des régularités des mouvements d'écriture comme l'isochronie, l'équivalence motrice, ainsi que la loi de puissance $2/3$ (Plamondon & Guerfali, 1998). Cependant, notons que l'excellente précision dans la reproduction de la trace offerte par ce modèle s'effectue grâce à ou au prix de sa complexité.

1.4.2. Le graphème, unité symbolique de l'écriture

1.4.2.1. Le modèle d'Ellis et Young (1988)

Le modèle proposé par Ellis et Young (1988) envisage l'unité fondamentale de l'écriture comme un programme moteur spécifique à un allographe sélectionné à la suite d'opérations hiérarchisées. L'allographe d'un graphème correspond à une des formes que peut prendre celui-ci tout en restant lisible et identifié comme tel. Par exemple, les caractères scripte ou cursive, majuscule ou minuscule du graphème e sont e, E, E, e. La forme de l'allographe serait par la suite déterminée par le programme moteur en définissant l'ordre et la taille relative des traits qui constituent cet allographe. La modulation de certains paramètres permettrait par la suite d'adapter le programme en fonction de la taille globale de production afin de sélectionner les groupes musculaires appropriés pour réaliser le mouvement. Ce modèle est fondé sur l'étude de pathologies, plus particulièrement sur l'évidence de doubles dissociations qui permettent à la fois la présence des troubles de la lecture et la préservation de la copie de phrases ou inversement (Siéoff, 2004). A partir de ce modèle, certaines données pathologiques sont interprétables en termes de déficits spécifiques à la production motrice de lettres. Les observations de Baxter et Warrington (1986) d'un patient présentant des difficultés à produire des lettres ont révélé que la génération de ces tracés était « désorganisée » et aboutissait à la formation de « non-lettres ». Cependant, ce patient pouvait recopier ou décrire verbalement ces lettres si difficiles à générer. Le déficit de ce patient se situerait au niveau du stockage des patterns moteurs.

1.4.2.2. Le modèle de Van Galen (1991)

Van Galen (1991) a proposé un modèle de production de l'écriture qui est encore prévalent en sciences cognitives et neurosciences (e.g. Roux *et al.*, 2009). Comme le modèle d'Ellis et Young (1988), il envisage l'écriture comme une transcription du langage oral en langage écrit. Il s'agit d'un encodage dont la plus petite échelle est le passage du phonème (le son) au graphème (la trace). L'avantage de ce modèle par rapport au modèle d'Ellis et Young (1998) est d'être à la fois modulaire et hiérarchique, allant du cortex vers la périphérie (cf. Figure 6). Chaque sous-système fonctionne indépendamment des autres et transmet l'unité traitée au sous-système inférieur qui la traite à son tour. Les unités traitées diminuent de taille en fonction de leur niveau dans la hiérarchie : plus le traitement est périphérique, plus l'unité traitée diminue de taille.

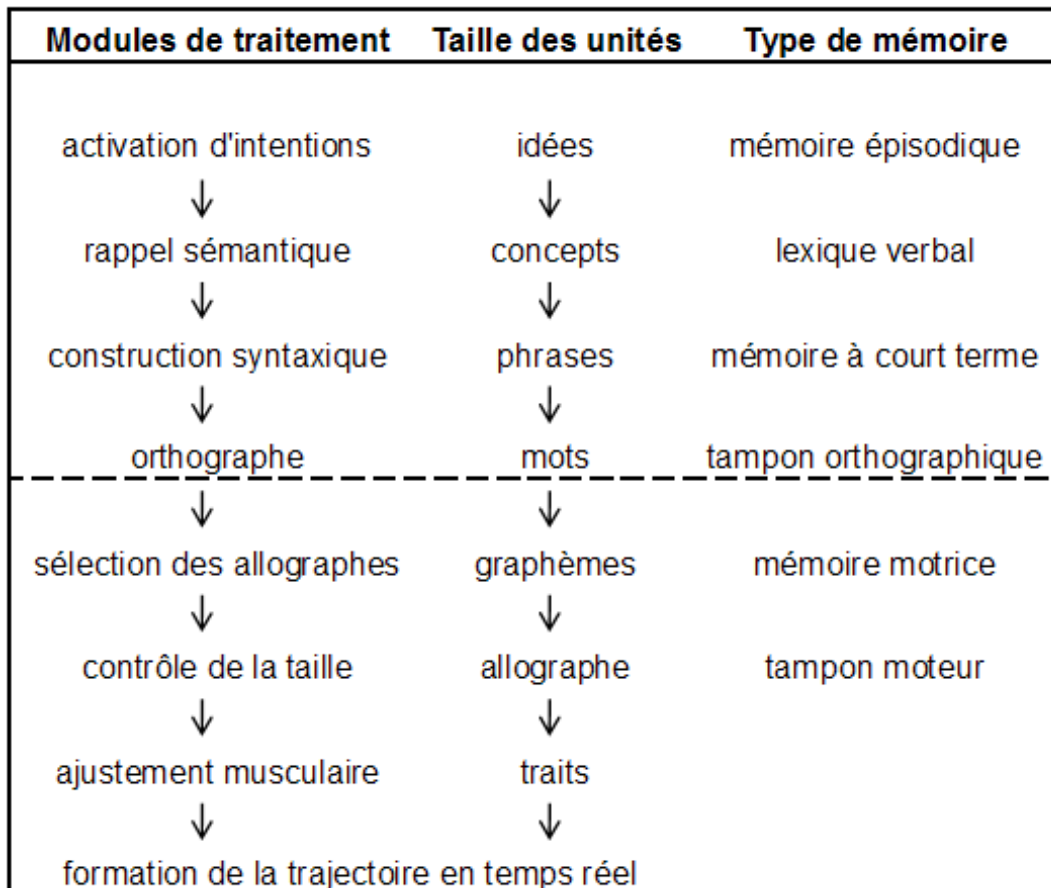


Figure 6 : Schéma du processus d'écriture selon le modèle de Van Galen (1991).

Les processus psycholinguistiques sont premiers dans la hiérarchie de production. La phrase, les mots et la structure sémantique sont préalablement traités. Le tampon graphémique a été défini comme un système qui maintient la représentation graphémique du mot pendant le temps nécessaire à l'exécution de la réponse motrice. Le stock allographique,

parallèlement au tampon graphémique, définit le style de l'écriture (écriture cursive ou écriture d'imprimerie, lettres minuscules ou lettres majuscules). Il s'agit d'un stockage à long terme. Le système graphémique guide le programme moteur en faisant la synthèse entre les informations du tampon graphémique et du stockage allographique. Le programme moteur utilise le stockage des patterns graphomoteurs à long terme et le tampon graphomoteur inclus dans la mémoire de travail pour prévoir la direction, la séquence, la taille des traits et l'organisation spatiale. Une réponse motrice de production d'écriture serait alors le résultat de l'ensemble de ces opérations.

1.4.2.3. Comment les modèles cognitifs définissent-ils la nature de l'unité fondamentale de l'écriture ?

Ces deux principaux modèles fondés sur la symbolique de l'écriture la définissent à partir de la transcription du langage oral en langage écrit, envisageant ainsi l'unité fondamentale de l'écriture à partir de la conversion phonème-graphème. A chaque allographe correspondent un programme moteur qui permet de constituer la succession de traits qui le composent. Pour certains auteurs, les programmes moteurs contiendraient essentiellement des informations de nature spatiale (géométrique), ce qui expliquerait que les aspects spatiaux soient plus invariants que les aspects temporels (Teulings et Schomaker, 1993 ; Teulings *et al.*, 1986). Deux types d'informations du mouvement seraient alors traités : la forme de la lettre, à savoir la taille relative et l'orientation des traits qui définissent le graphème, et l'ordre dans lequel les traits doivent être exécutés. Pour d'autres, l'information stockée serait de nature dynamique (envisagée comme le lien entre la force et la durée d'exécution) et temporelle (Denier van der Gon et Thuring, 1965 ; Wing, 1978, 1980). Selon l'hypothèse de l'impulse-timing, une horloge centrale définirait la structure temporelle d'activation du groupe musculaire ce qui expliquerait que les variations de forces de friction affecteraient les aspects spatiaux et non les aspects temporels (Denier van der Gon & Thuring, 1965).

1.4.2.4. Comment les modèles cognitifs définissent-ils la taille de l'unité fondamentale de l'écriture ?

Les modèles cognitifs définissent la taille de l'unité fondamentale de l'écriture à partir de la quantité de stockage et de rétention de l'information sans retour sensoriel. Chez l'enfant, la taille de l'unité de base passerait du trait composant la lettre à la lettre entière (Lambert & Espéret, 1996). Chez l'adulte, la plupart des travaux ont rapporté des résultats allant dans le sens que l'unité du programme moteur était de l'ordre de la lettre (Teulings, Thomassen et

Van Galen, 1983 ; Van Mier & Hulstijn, 1993). Meulenbroek et Van Galen (1989) ont comparé la production des traits formant la lettre et les traits de connexion entre les lettres. Ils ont montré que les traits de connexion étaient systématiquement tracés avec une durée et une taille plus longue et étaient plus bruités. Le bruit était exprimé par le nombre, la fréquence et la densité de dysfluences (pauses, retours, etc.) plus importantes. Cette différence entre les traits formant les lettres et les traits de connexion constituerait un indice supplémentaire que l'unité fondamentale est la lettre. Cette unité serait donc de taille variable, allant du trait composant la lettre chez l'enfant à la lettre chez l'adulte. Cette variation dépendrait de la complexité des lettres, de la connaissance des tracés à produire (Hulstijn & Van Galen, 1988 ; Portier, Van Galen & Meulenbroek, 1990) et de la vitesse de mouvement (van der Plaats & Van Galen, 1991 ; Wing, Nimmo-Smith & Eldridge, 1983). Selon le modèle de Van Galen (1991), la taille diminuerait en fonction du niveau de traitement, du niveau central au niveau le plus périphérique.

1.5. Lien entre lecture et écriture

La question du lien entre lecture et écriture s'est posée à partir de l'identification de processus distincts, spécifiques à la lecture et à l'écriture. Les premières données concernant des sujets sains impliqués dans des paradigmes de double tâche (écrire en parlant d'autre chose) ou des patients atteints de troubles spécifiques à la lecture ou à l'écriture (voir Basso, Taborelli & Vignolo, 1978, pour une liste exhaustive d'aphasies) ont rapidement permis de conclure à la présence de mécanismes structurels dissociés. Cependant, la mise en évidence de structures dissociées ne va pas à l'encontre de l'hypothèse d'un lien étroit entre perception et production de la trace écrite ou, en ce qui nous concerne, d'une unité graphique commune. Au contraire, des données issues de la neuropsychologie (e.g., Anderson, Damasio & Damasio, 1990) ont montré qu'au-delà d'une agraphie apraxique sous une forme « pure », certains patients peuvent également présenter une alexie, c'est-à-dire un trouble de la discrimination et de la reconnaissance de caractères (voir Longcamp, Lagarrigue et Velay, 2010 pour une revue). Rappelons de plus que les principaux modèles de l'écriture et de la lecture présentent une unité linguistique commune : la lettre (Ellis & Young, 1988 ; Van Galen, 1991).

1.5.1. Un « a » est un « A »

La principale difficulté en lecture et écriture d'un caractère est de pouvoir reconnaître les caractéristiques qui permettent d'identifier ce caractère en tant qu'entité singulière en dépit de la variabilité individuelle et des différentes configurations qui correspondent au même graphème (les allographes du graphème). Autrement dit, il s'agit de définir sur quoi repose l'invariance du graphème.

Une réponse se situe dans le passage de la perception d'une forme graphique à la reconnaissance du caractère linguistique spécifique à chaque graphème. La lettre se présente sous une forme bidimensionnelle, avec des caractéristiques géométriques particulières comme des traits rectiligne ou curvilignes, des points d'intersection formant des boucles. Par exemple, le placement et l'orientation du bâton attaché au « o » est un facteur déterminant pour discriminer un « d » d'un « p », d'un « b » ou d'un « q ». Comme nous pouvons le voir sur la Figure suivante, Grainger, Rey et Dufau (2008) ont proposé un modèle hiérarchique de reconnaissance visuelle de lettre. L'objectif était de comprendre comment des formes géométriquement aussi distinctes que « a » et « A » et arbitrairement associées dans un système graphique sont traitées pour aboutir à une même identité.

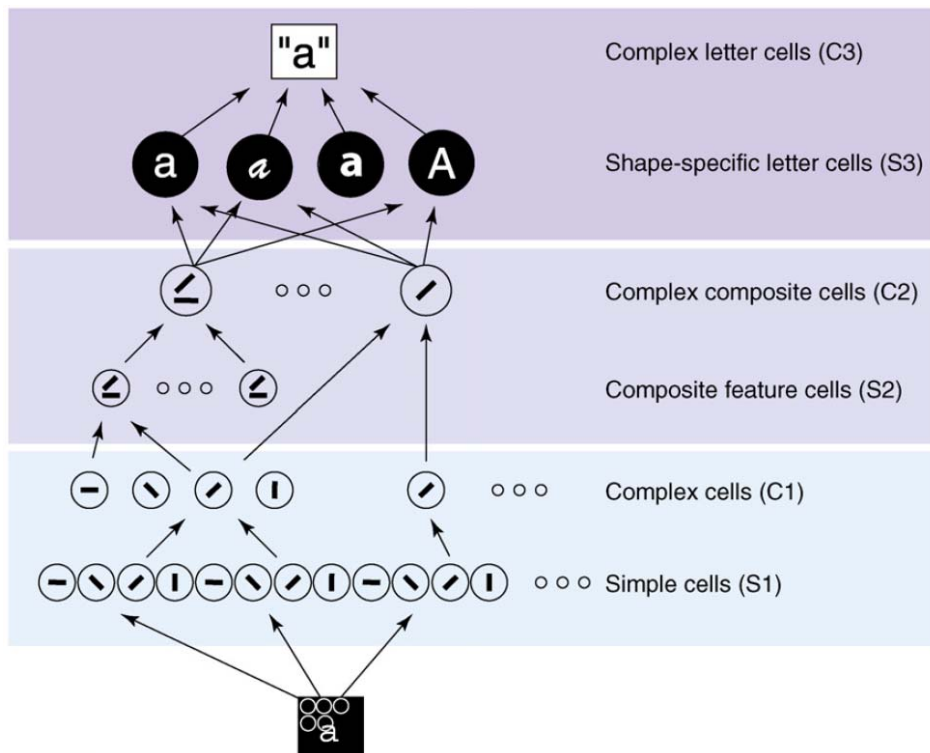


Figure 7 : Modèle hiérarchique de perception de lettre. La reconnaissance de la lettre s'effectue via une hiérarchisation des processus neuraux allant de l'activation de cellules simples lié au plus petit élément constitutif de la lettre à l'activation de cellules complexes impliqués dans la reconnaissance du graphème (Tiré de Grainger *et al.*, 2008).

Reprenant le concept du Pandémonium de Selfridge (1959), l'identification des lettres s'effectuerait grâce à des couches de cellules neurales fonctionnant en parallèle et organisés hiérarchiquement, contenant des représentations de plus en plus invariantes (traits, représentation de la forme physique puis de l'identité abstraite des lettres). L'activation de certaines cellules simples liées à l'élément constitutif de la lettre déclencherait, par une série de processus en cascade, l'activation de cellules complexes spécifiques à la reconnaissance du graphème.

1.5.2. Un « a » n'est pas un « a »

De nombreuses études ont montré que la reconnaissance d'un graphème ne s'effectue pas uniquement à partir de la perception de la configuration spatiale qu'il présente (Li et Yeh, 2003, Longcamp *et al.*, 2010 ; Orliaguet, Kandel & Boë, 1997). L'hypothèse que les composantes du mouvement de la lettre en train d'être produite participent à la mémorisation de l'unité graphique n'est pas sans conséquence quant à la question de l'implication de la motricité dans la reconnaissance du graphème. Prenons l'exemple d'un japonais, utilisant le « Ku-sho » (l'écriture dans le ciel), c'est-à-dire traçant en l'air les traits constitutifs du caractère dans l'ordre approprié afin de se souvenir de sa signification (Sasaki, 1987). Ce moyen mnémotechnique fréquemment utilisé au Japon pose la question de l'importance du mouvement de tracé du caractère dans sa mémorisation et sa reconnaissance.

Afin de tester cette hypothèse, Tse et Cavanagh (2000 ; Li et Yeh, 2003) ont présenté des idéogrammes chinois à deux populations, américaine et chinoise. Les traits permettant de tracer les idéogrammes étaient présentés un par un. Dans cette situation, les participants avaient l'impression de voir le trait se tracer, un phénomène portant le nom du mouvement apparent (Wertheimer, 1912). A la fin de la présentation des traits, les participants devaient identifier la direction apparente dans laquelle le dernier trait de l'idéogramme semblait être tracé. Les résultats ont montré que les chinois avaient tendance à percevoir la direction « de droite à gauche », conformément à la façon dont l'idéogramme était tracé. Par contre, les américains percevaient la direction apparente opposée. Ces résultats suggèrent que l'utilisation des connaissances motrices, préexistantes chez les chinois uniquement, influence leur perception. La perception d'un graphème serait donc affectée par les informations provenant du mouvement effectué dans son écriture.

Contrairement au modèle de Grainger (Grainger *et al.*, 2008), la reconnaissance des graphèmes ne serait pas seulement le résultat de l'activation parallèle de tous les traits qui le constituent, mais serait également dépendante des informations sur l'ordre et la manière dans

lequel ces traits sont écrits. Une forme de mémoire liée à la motricité impliquée dans l'écriture de lettres serait ainsi réutilisée au moment de leur reconnaissance visuelle. Si tel était le cas, les lettres manuscrites devraient avoir un statut particulier du point de vue perceptif, puisque le sujet posséderait une représentation motrice spécifique à ce type de lettres. Longcamp, Hlushchuk & Hari (2010) ont comparé l'observation passive de lettres manuscrites et de lettres d'imprimerie et ont observé une activation plus importante du cortex moteur primaire dans le second cas. Tout se passe comme si les mouvements d'écriture « impriment » la représentation des lettres (Longcamp, Zerbato-Poudou & Velay, 2005 ; Velay, Longcamp & Zerbato-Poudou, 2004). Cette conclusion irait dans le sens de l'hypothèse de Bluteau et collaborateurs (2008) d'une mémorisation de la lettre en termes de profils de forces, spécifiques au mouvement en complément ou à la place des coordonnées cartésiennes de la lettre. Autrement dit, il y aurait un double encodage de la lettre, spatiale et spatio-temporel, qui serait impliqué dans les processus perceptifs. Ceci expliquerait pourquoi le mouvement de l'écriture favoriserait sa mémorisation et sa reconnaissance.

1.5.3. Intervention de la motricité dans la perception de formes graphiques

Le graphème est-il le seul lien entre lecture et écriture ou existe-t-il un lien plus étroit entre la production et la perception de tracé indépendamment des processus linguistiques. C'est la question de « l'interaction perceptivo-motrice » qui se pose ici (voir Viviani, 1990, pour un historique de cette notion).

Comme nous l'avons vu précédemment, les travaux de Viviani et collaborateurs (Lacquaniti, Terzuolo & Viviani, 1983 ; Viviani & Terzuolo, 1980) ont abouti à la définition de la loi de puissance $2/3$ qui met en relation les composantes spatiales de la trace (la courbure) avec ses composantes cinématiques (la vitesse angulaire). Cette loi, spécifique au mouvement biologique², permet de lier les caractéristiques du mouvement avec la conséquence produite par le mouvement c'est-à-dire la trace. Viviani & Stucchi (1989) ont montré que la perception de formes dont la cinématique ne respectait pas la loi puissance $2/3$ était biaisée. En comparant les formes perçues comme des cercles selon différentes cinématiques de traçage, les auteurs ont mis en évidence une forme d'illusion perceptive qui fait qu'un participant aurait tendance à identifier comme un cercle une ellipse horizontale

² Est qualifié de mouvement biologique (e.g. Johansson, 1973) tout mouvement qui possède les propriétés d'un mouvement produit par les êtres vivants, humains ou animaux. En particulier, le mouvement biologique respecte la loi Puissance $2/3$.

dont la cinématique de traçage correspond à une ellipse verticale. Cette illusion serait le résultat d'un conflit entre la forme produite et la manière dont elle est tracée.

L'intervention de la motricité dans la perception de formes statiques a également été mise en évidence par Babcock et Frey (1988). Ces auteurs ont constaté que l'apprentissage d'une cinématique de tracé d'une forme inconnue va influencer sa perception en condition statique. Utilisant une double tâche combinant l'exécution motrice et de discrimination visuelle de formes elliptiques, les travaux de Wamain, Tallet, Zanone et Longcamp (2011) ont confirmé l'hypothèse selon laquelle les préférences motrices relatives à la production de formes graphiques sans signification interviennent sur la perception de ces formes en condition statique. Le lien entre perception visuelle et production de la trace écrite serait donc indépendant de la symbolique de l'écriture. De manière générale, la sensibilité commune de caractéristiques préférentielles de la trace, à la fois sur le plan perceptif et moteur, suggère l'implication de processus perceptivo-moteurs similaires à la fois dans la production et la perception de la trace.

1.6. Les préférences de l'écriture

Des préférences dans la reproduction de la trace d'écriture sont observées à partir de différences de qualité de production ou de perception de la trace. Au niveau de la production, les préférences motrices seront décrites selon l'activité des deux principales composantes du système effecteur, à savoir le poignet et la pince des doigts. Ces composantes expliquent la présence d'orientations préférentielles, de formes préférentielles et d'un sens de rotation préférentiel.

1.6.1. Préférences liées aux composantes du système effecteur

Les déplacements de deux composantes principales, le poignet et les doigts, permettent de tracer des lettres dans le plan, à savoir selon les axes x et y , respectivement. Les travaux de Teulings ont montré qu'il existe des caractéristiques différentes entre les mouvements du poignet et ceux des doigts (Teulings, 1996 ; Teulings *et al.*, 1989). Les tracés produits par les mouvements du poignet sont 1.3 fois plus rapides, 1.5 fois plus grands et presque 2 fois plus précis que ceux produits par les mouvements des doigts (Teulings *et al.*, 1989). Concernant la vitesse d'exécution, les travaux de Maarse, Schomacker et Thomassen (1986) fournissent des résultats plus mitigés dans la mesure où les fréquences des mouvements du poignet et des

doigts ne sont pas significativement différents. Enfin, les mouvements impliquant la coordination des mouvements du poignet et des doigts produisent des trajectoires moins précises que les mouvements produits uniquement par les doigts ou par le poignet. Si la qualité de la production de la trace en termes de précision et de rapidité diffère selon qu'une seule composante ou les deux sont mobilisées, alors des disparités devraient apparaître entre les formes graphiques produites en fonction de leur orientation.

1.6.2. Des orientations préférentielles

L'ouvrage de Van Sommers (1984) représente sans doute la référence principale concernant l'étude de la trace écrite et de la graphomotricité. En particulier, cet auteur a analysé la distribution des orientations spontanément adoptées lors de la production de formes géométriques simples tels que des traits et ellipses, et lors de l'écriture de caractères isolés de différents systèmes d'écriture (i.e., hébreu, anglais, arabe, chinois).

Dans la production spontanée de traits variant entre 2 et 4 cm, la figure suivante illustre les orientations adoptées préférentiellement par des adultes gauchers et droitiers. Comme nous pouvons le voir, les droitiers tracent spontanément des traits préférentiellement dans les orientations comprises entre 1h30 et 3h00, autour de 5h00 et 7h30 selon le cadran horaire. Les orientations non préférentielles étaient comprises entre 7h30 et 1h30 et autour de 4h00.

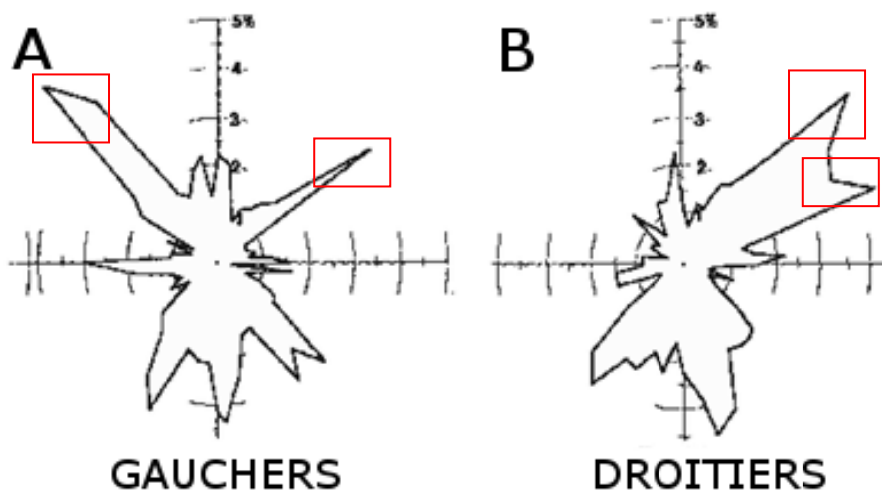


Figure 8 : Répartition des orientations spontanément choisies par des gauchers (en A) et droitiers (en B) (tiré de Van Sommers, 1984). Les orientations les plus choisies sont les orientations dites préférentielles.

Les orientations préférentielles des gauchers sont grossièrement en miroir de celles des droitiers. Cependant, une orientation préférentielle supplémentaire vers 2h00 est présente

chez les gauchers alors que l'orientation symétrique n'est pas présente chez les droitiers. Cette orientation préférentielle à la fois chez les gauchers et les droitiers a été interprétée comme résultante des contraintes imposées par l'écriture conventionnelle, à partir de l'inclinaison constante des lettres vers la droite (van Emmerick & Newell, 1990) ou la progression de la gauche vers la droite, qui impose une orientation préférentielle nouvelle chez les gauchers qui ne se retrouve pas en symétrie chez les droitiers. Comme nous pouvons le voir par les encadrés rouges de la Figure 8, l'orientation préférentielle chez les droitiers résulterait à la fois de contraintes liées à l'effecteur, ce qui expliquerait l'orientation préférentielle en miroir chez les gauchers, et de contraintes imposées par l'écriture conventionnelle, identiques chez les gauchers et les droitiers.

Dans le même ordre d'idée, les travaux de Maarse et Thomassen (1983) et de Maarse et collaborateurs (1986) ont montré que les tracés dans les directions obliques étaient plus longs et plus rapides. Par ailleurs, Meulenbroek et Thomassen (1991) ont montré que la production de traits dans l'ensemble des directions de l'espace était accentuée vers les orientations préférentielles (à l'oblique) quand les yeux étaient fermés. Les orientations préférentielles de production influenceraient la production de l'ensemble des formes graphiques. L'hypothèse de ces auteurs est que ces orientations obliques résulteraient des contraintes liées à l'effecteur alors que les orientations cardinales seraient préférentielles au niveau perceptif. En effet, de nombreux travaux ont observé que les orientations horizontale et verticale sont mieux discriminés visuellement que les orientations obliques. Ce phénomène, appelé l'« effet de l'oblique », a engendré de nombreux travaux pour comprendre les processus explicatifs et les soubassements fonctionnels encore mal identifiés (Baowang, Matthew & Ralph, 2003 ; Gentaz et Ballaz, 2000 ; Gentaz et Tschopp, 2002 ; Tschopp-Junker, Gentaz & Viviani, 2010 ; Westheimer, 2003).

1.6.3. Orientations de départ et formes préférentielles

Dans la continuité des travaux de Van Sommers (1984), Faure (2006) a étudié le lien entre les directions de départ préférentielles et les formes tracées. Pour cela, elle dissocia la production de segments isolés de la production de formes elliptiques telles que des cercles, des spirales et des ellipses. Comme nous pouvons le voir sur la Figure 9, les résultats de cette étude ont confirmé les résultats des travaux de Van Sommers (1984) en précisant que la répartition des directions de traçage des segments n'est pas uniforme, que les "verticales" sont plus tracées de haut en bas que de bas en haut et que les "horizontales" sont préférentiellement tracées de gauche à droite.

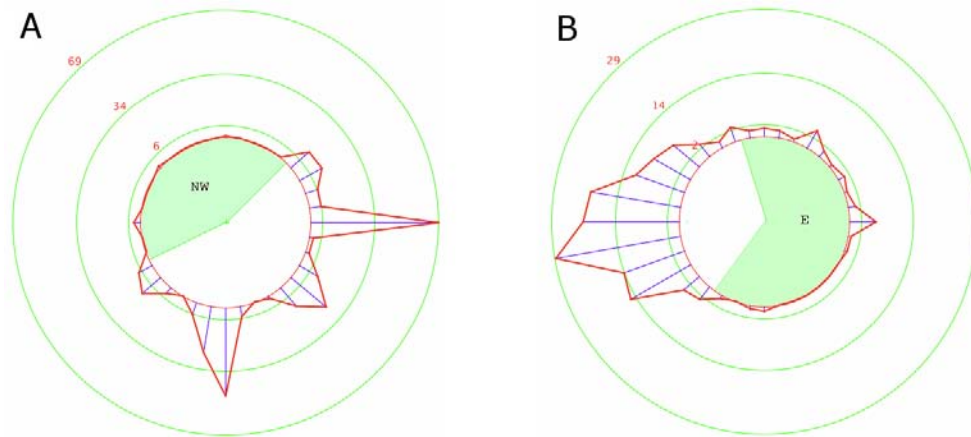


Figure 9 : Histogramme des directions de départ mesurées dans la production spontanée de segments isolés (en A) et de formes elliptiques (en B).

Ces résultats confirment l'effet combiné des préférences de l'orientation du point de départ avec l'orientation préférentielle de la trace, selon que la forme tracée est un segment ou forme elliptique. Enfin, notons que les analyses des tracés des cercles font apparaître une forte préférence pour le sens antihoraire qui se combine avec une préférence pour le point de départ du tracé.

Des études plus récentes ont montré que certaines formes géométriques étaient tracées avec une plus grande rapidité et une plus grande précision que d'autres (Athènes *et al.*, 2004 ; Dounskaia *et al.*, 2000). Dounskaia *et al.* (2000) ont analysé la qualité de production de traits et de cercles en fonction du type de coordination entre le poignet et les doigts et de l'augmentation de la vitesse chez des droitiers et des gauchers. Les résultats ont révélé qu'avec l'augmentation de la vitesse, la production de cercles est progressivement biaisée vers la production de formes plus elliptiques dans l'orientation 1h30 chez des droitiers et vers 10h30 chez des gauchers. Les traits dans l'orientation 10h30 chez les droitiers sont produits avec une variabilité plus importante que dans les autres orientations quand la vitesse d'exécution augmente. Athènes *et al.* (2004) ont montré que parmi toutes les formes elliptiques, seules l'ellipse d'excentricité intermédiaire et le trait sont reproduits avec une précision plus importante. De par leur intérêt, ces travaux seront détaillés dans le chapitre suivant. Au niveau perceptif, les travaux de Wamain et collaborateurs (2009) ont révélé que le trait et le cercle sont les formes les mieux discriminées visuellement, contrairement à l'ellipse d'excentricité intermédiaire.

1.7. De l'invariance à la stabilité

1.7.1. Le bilan

Ce premier chapitre a détaillé comment les approches traditionnelles de l'écriture définissent les mécanismes qui sous-tendent la production d'écriture à partir d'une double constatation. D'une part, les modèles cognitifs ont cherché à définir l'unité fondamentale de l'écriture à partir du concept d'invariance. D'autre part, des tracés préférentiels sont observés selon certaines contraintes de production et de perception.

1/ L'écriture nécessite la mise en action de deux composantes principales (le poignet et la pince des doigts) afin de tracer des lettres sur un plan (déterminé par les axes x et y), le système « poignet-doigts » étant respectivement assimilé aux composantes spatiales x et y de la trajectoire du stylo (Athènes *et al.*, 2004 ; Denier van der Gon et Thuring, 1965 ; Denier van der Gon *et al.*, 1962 ; Hollerbach, 1981 ; Sallagoity, Athènes, Zanone & Albaret, 2004 ; Teulings, 1996 ; Teulings *et al.*, 1989).

2/ En tant que mouvement humain, l'écriture s'effectuerait à partir d'un contrôle rétroactif, principalement visuel et haptique, et d'un contrôle proactif, centré des propriétés invariantes de la formation de la trace. Le contrôle rétroactif s'effectuerait à partir d'informations spatiales (statiques) sur la trace produite et spatio-temporelles (cinématique) sur la trace en train de se produire. Le contrôle proactif s'effectuerait à l'aide de programmes moteurs encodés et mémorisés par le système cognitif.

3/ L'invariance serait le concept clé qui permet de définir l'unité fondamentale de l'écriture : le graphème pour les théories cognitives (e.g. Van Galen, 1991) ou des caractéristiques de la trace produite (e. g. Plamondon, 1995a, 1995b).

4/ Ces propriétés invariantes seraient présentes à la fois dans les caractéristiques perceptives et motrices du mouvement d'écriture, envisageant l'écriture à partir d'un lien étroit entre perception et action.

5/ Enfin, en parallèle à l'observation de certaines invariances, certaines préférences d'écriture sont identifiées à partir des contraintes liées à l'effecteur ou aux processus perceptifs.

1.7.2. Le nœud du problème

En se centrant sur les mécanismes et principes d'invariance de l'écriture, les modèles issus des théories cognitives s'accordent à définir l'unité motrice de l'écriture à partir de la mémorisation et de l'activation de programmes moteurs propres spécifiques à chaque graphème. L'une des principales limites auxquelles se confrontent ses modèles est qu'ils ne permettent pas de comprendre pourquoi l'exécution d'un programme moteur n'est pas possible selon certaines contraintes.

Prenons comme exemple l'expérience Gamma-V de Konzem (1987 ; cité dans Schmidt & Wrisberg, 2004) que vous pouvez réaliser vous-même. Dans un premier temps, tracez avec la main gauche la lettre gamma (γ) assez rapidement, sans correction pendant l'exécution. La figure doit croiser au milieu et être arrondie en bas. Une fois ce geste maîtrisé, passez le crayon dans la main droite et tracez la lettre V suffisamment rapidement pour qu'il n'y ait pas non plus de correction pendant l'exécution. La procédure est la même sauf que le tracé n'est plus croisé au milieu mais contient un angle en bas. La plupart des individus n'ont aucun problème pour tracer ces deux graphèmes. Puisque les mouvements pour réaliser ces deux formes sont exécutés sans correction, Konzem (1987) fait l'hypothèse qu'à chacune de ces deux formes correspond un programme moteur propre. Ces deux programmes sont différents car les structures temporelles se distinguent l'une de l'autre : vers le bas, une boucle puis vers le haut pour le γ et vers le bas puis vers la haut pour le V. Essayez à présent de tracer ces deux graphèmes en même temps, le γ de la main gauche et le V de la main droite. Vous allez constater, comme le fit Konzem (1987), une forte tendance à tracer la même lettre des deux mains.

Cette démonstration illustre comment un problème de coordination empêche l'exécution simultanée de ces deux programmes moteurs différents sans une forte interférence entre les deux mains. Le concept même d'invariance est mis à mal dans ce cas puisque le scripteur se trouve dans l'incapacité de réaliser deux traces qu'il maîtrise pourtant de manière isolée. Il s'agit donc d'envisager la formation de la trace écrite comme une performance résultant d'un compromis entre les contraintes environnementales et les contraintes biomécaniques du système effecteur. La connaissance du système graphomoteur et des contraintes environnementales est capitale pour la compréhension des mécanismes impliqués dans l'écriture manuscrite et dans sa dégradation. Les limitations des modèles que nous avons présentés dans ce premier chapitre nous poussent à adopter une approche capable de rendre compte de la production de mouvements stables et précis, ainsi que de leurs changements en fonction du contexte dans lequel les individus doivent écrire. L'approche

dynamique de la coordination motrice a proposé une alternative théorique et empirique au concept d'invariance qui, nous l'avons vu, est mis à mal par l'effet des contraintes. Le concept central de cette approche est celui de *stabilité* : Il permet de comprendre la formation, le maintien et la dégradation de la coordination motrice dans de nombreuses tâches motrices (Kelso, 1995, pour une revue). L'objectif du prochain chapitre est de décrire et d'expliquer en quoi cette approche peut apporter une focale plus adaptée pour comprendre les mécanismes et les processus mis en jeu dans la formation de formes graphiques, dans leur maintien, leur changement, voire leur dégradation sous l'effet de différentes contraintes.

CHAPITRE II

Dynamique de coordination graphomotrice

2.1. Complexité et auto-organisation

2.1.1. Concepts et notions clés

Les sciences de la complexité ont pour objet la modélisation de systèmes dits complexes, c'est-à-dire composés d'un grand nombre d'éléments en interaction. Ces systèmes ont la particularité de faire émerger une organisation collective dans le temps et dans l'espace, appelé patron, lorsqu'ils sont éloignés de leur état d'équilibre. L'émergence de patrons se définit comme l'apparition spontanée d'une organisation collective suite aux interactions entre les multiples éléments qui le composent, en dépit des fluctuations inhérentes au système et des perturbations agissant sur le système. C'est un processus propre à un niveau de description donné, caractérisés par une organisation stable entre les différentes composantes qui ne peut pas être prédite à partir de leur comportement individuel. La stabilité se définit comme la capacité d'un système à revenir spontanément à son état d'origine après une perturbation l'en ayant éloigné (Haken, 1983). La dépendance mutuelle entre les composantes qui résulte de ces interactions est appelée couplage.

Pour résumer, les systèmes complexes sont caractérisés par (1) l'émergence de patrons stables, (2) la coexistence possible de plusieurs patrons dans des régimes de contraintes identiques, et (3) la persistance, la déstabilisation, la disparition et/ou le changement de ces patrons suite à la modification de ces régimes de contraintes. La stabilité rend compte à la fois de la flexibilité du système, c'est-à-dire de sa capacité à s'ajuster aux changements, mais également de sa robustesse, c'est-à-dire de sa capacité à maintenir un patron en dépit des changements environnementaux (Kelso, 1995).

2.1.2. Le phénomène d'auto-organisation

La question qui se pose est de savoir comment apparaissent et disparaissent ces organisations collectives. Nous postulons ici une réponse simple : d'elles-mêmes. Les théories de l'auto-organisation³ permettent de comprendre comment des systèmes complexes démontrent spontanément un agencement dans le temps et l'espace, une structure spatio-temporelle c'est-à-dire un patron. Ces patrons émergent sans l'intervention d'une commande prescriptive contraignant spécifiquement et individuellement toutes les composantes impliquées, mais simplement par des interactions qu'il n'est pas nécessaire de décrire pour en comprendre le comportement global. Les relations entre les différentes composantes du système peuvent se définir à partir d'une variable collective nommée le paramètre d'ordre (PO). Il est possible d'identifier le PO lors des changements abrupts de comportement collectif du système : c'est la seule variable macroscopique qui manifeste un changement visible. Connaître le PO permet de réduire le nombre de dimensions nécessaires pour décrire les comportements globaux du système.

L'émergence d'ordre, d'organisation collective, ou de patron préférentiel, présente dans de nombreux systèmes complexes biologiques, se caractérise par leur capacité à maintenir une structure spatio-temporelle en réponse à certaines contraintes. Le terme de contrainte ne doit pas être compris comme un facteur qui empêche la réponse comportementale mais comme un facteur qui empêche la production de toutes les réponses collectives avec la même stabilité. Autrement dit, une contrainte est envisagée comme une force inductrice de comportements collectifs (Baldissera, Borroni, Cavallari et Cerri, 2002). La stabilité de la réponse comportementale du système est mesurable par les fluctuations du

³ Déjà au 18^{ème} siècle, Kant proposa une première réflexion autour du concept d'auto-organisation en parlant de la finalité de la nature : « Une chose existe en tant que fin naturelle si elle est cause et effet par elle-même. » Les fins naturelles ne sont point constructibles en fonction d'une fin établie a priori. Il s'agit en effet « d'êtres organisés qui s'organisent eux-mêmes », qui nous impressionnent par leur façon singulière de tenir ensemble » et où « tout est moyen et inversement aussi fin » (Kant, 1790).

PO. Ces fluctuations révèlent non seulement la stabilité du système mais permettent, par une augmentation dite critique, de prédire un changement abrupt et spontané de la réponse comportementale du système. Ce changement, appelé transition, permet la disparition et l'apparition d'un nouvel état stable, caractérisé par une diminution des fluctuations du PO. Notons que le temps que met un système à se restabiliser est un indicateur de la stabilité du nouvel état stable. Ce temps de relaxation correspond au temps que met le système pour revenir à son état initial suite à une perturbation l'en ayant éloigné. Plus il est faible, plus l'état du système est stable.

Les théories de l'auto-organisation s'appliquent à tout système complexe, indépendamment de sa nature. Les conditions requises sont que ce système doit être d'une part ouvert, c'est-à-dire en constante interaction avec l'environnement dans lequel il évolue afin de permettre un échange énergétique permanent, et d'autre part loin de l'équilibre afin de fluctuer, c'est à-dire d'évoluer dans l'espace et dans le temps, pour absorber et rejeter de l'énergie avec l'environnement. Parce que la nature du système complexe est sans importance, des phénomènes d'auto-organisation sont présents dans des systèmes complexes variés, à savoir, biologiques, physiques, psychologiques, sociaux etc. (cf. Figure 10 et Camazine *et al.*, 2003, pour d'autres exemples).

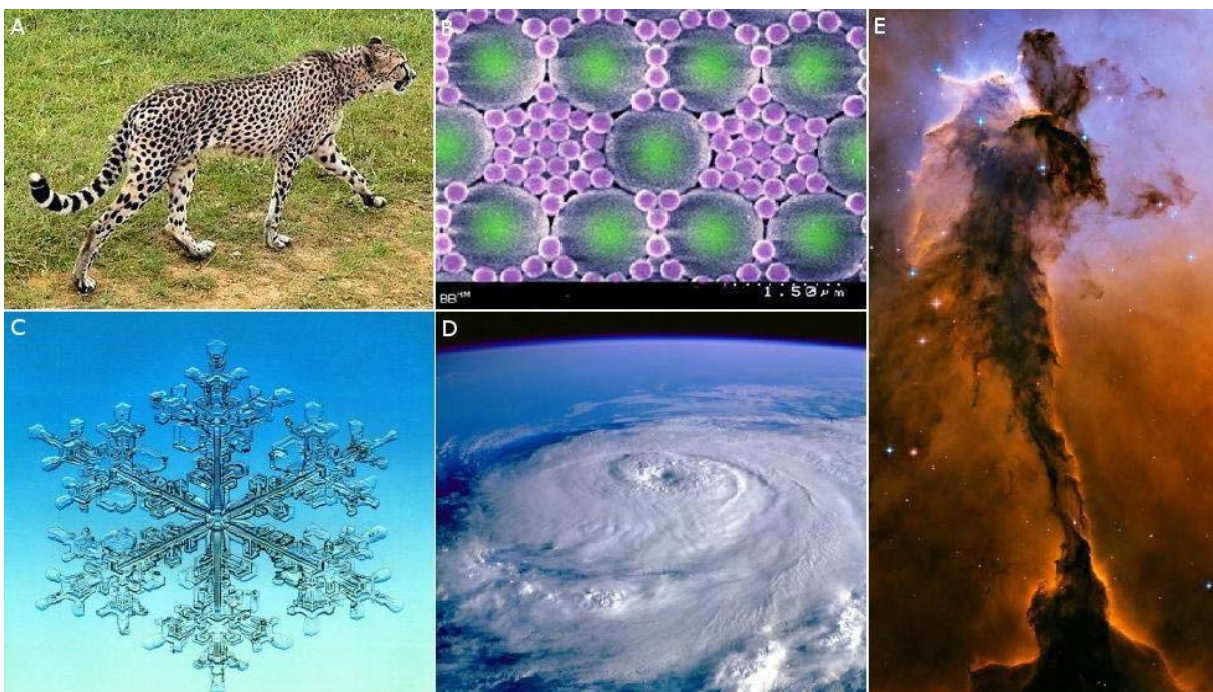


Figure 10 : Exemples d'auto-organisation de systèmes biologiques complexes à différentes échelles spatio-temporelles. En A, pigmentation du guépard. En B, auto-organisation de nanoparticules. En C, structure fractale d'un flocon de neige. En D, formation du cyclone Elena au-dessus du golfe du Mexique. En E, nébuleuse de l'Aigle amenant à la formation d'étoiles (photo du satellite Hubble).

2.1.3. Expérience principes des théories de l'auto-organisation

L'expérience d'émergence de patron la plus connue est celle en thermodynamique des rouleaux de Rayleigh-Bénard. Un liquide contenu dans un récipient est chauffé progressivement par le bas. Au départ, le gradient de température, c'est-à-dire la différence de température entre la surface et le fond, est faible. Aucune organisation collective n'est présente. Puis, en chauffant progressivement le dessous du récipient jusqu'à un gradient critique, les molécules qui composent le liquide s'organisent spontanément, faisant émerger de l'ordre caractérisé par des convections particulières appelés rouleaux de Bénard. Ces rouleaux organisent le déplacement énergétique (de la chaleur) à l'intérieur du récipient suivant la seule contrainte environnementale suivante : le liquide se refroidit en surface ce qui a tendance à le faire descendre car sa densité augmente et il chauffe au fond, ce qui le fait remonter car sa densité diminue (cf. Figure 11). Cette organisation collective émerge et permet de dissiper l'énergie contenue dans le système. A ce titre, les composantes s'organisent spontanément et forment une structure dissipative qui maintient l'état du système face à l'augmentation de contraintes (Prigogine, 1978). A ce moment, le comportement de chaque molécule devient dépendant de la forme collective mise en place par l'ensemble de toutes les molécules ; c'est dans ce sens qu'Haken parle d'asservissement du microscopique au macroscopique (voir Haken & Wunderlin, 1990).

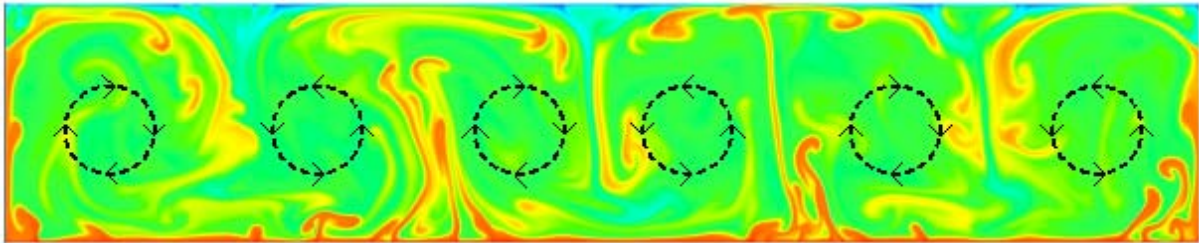


Figure 11 : Formation de rouleaux de Bénard à partir d'une température critique. Les cercles de rotations indiquent les convections appelés rouleaux de Bénard.

Comme nous pouvons le voir, les rouleaux de Bénard peuvent circuler en sens horaire ou antihoraire. Ces deux sens de rotation rendent compte de deux états stables possibles. Le système est considéré comme bistable (multistable). Ce phénomène de bistabilité (multistabilité) est une propriété fondamentale des systèmes dynamiques. Notons cependant que l'émergence d'un des deux sens de rotation du premier rouleau déterminera la rotation des autres rouleaux par la loi de proximité suivante : deux rouleaux convectifs adjacents ont des sens de rotation opposés. Pour conclure, notons également qu'une diminution graduelle

de la température provoque un retour vers l'état initial, mais à une valeur critique de la température inférieure à celle ayant provoqué la formation des rouleaux. Ce phénomène s'appelle l'effet d'hystérèse. L'hystérèse manifeste la tendance des systèmes complexes à maintenir leur état antérieur face au changement.

2.1.4. Approche des systèmes dynamiques non linéaires

Les différentes réponses comportementales ainsi que le changement soudain d'une réponse à une autre des systèmes auto-organisés face à l'évolution linéaire de contraintes ne peuvent pas être modélisés par des équations linéaires. Les modèles des systèmes dynamiques non linéaires proposent que, malgré la complexité du système, l'évolution des comportements qu'il adopte peut être décrite grâce à l'évolution d'une seule variable collective. Comprendons ici que la complexité du système n'empêche pas sa simplicité comportementale. Les systèmes dynamiques modélisent des phénomènes qui évoluent non linéairement dans le temps. Plus précisément, un système dynamique est un système d'équations différentielles non linéaires qui décrit les différents états adoptés par un système en fonction des valeurs que peut prendre la variable collective x de ce système au cours du temps. Ce système d'équations permet de rendre compte d'un ou de plusieurs états préférentiels du système, (i.e., différentes solutions du système d'équation) et du changement d'un état à un autre en réponse à une évolution linéaire de la contrainte. L'ensemble des états x en fonction des différentes contraintes environnementales correspond à la dynamique intrinsèque du système. Cette dernière se définit comme l'ensemble des tendances de coordination stables qui existent à un moment donné, qu'elles soient liées à des contraintes biologiques innées ou aux expériences antérieures (Kelso, 1994 ; Zanone & Kelso, 1992, 1994). Quelle que soit la valeur initiale de la variable collective, les trajectoires du système convergent dans le temps fini vers une ou plusieurs solutions appelées attracteurs. L'attracteur est une solution stable d'un système dynamique. C'est la description mathématique d'un état préférentiel du système.

Afin de comprendre l'évolution d'un système dynamique non linéaire, prenons l'exemple d'une dynamique intrinsèque représentée par la fonction potentielle V de la variable collective x suivante :

$$V(x) = ax^2 + bx^4 \quad 2.1$$

avec comme dérivée :

$$\dot{x} = -\frac{dV(x)}{dx} \quad 2.2$$

où le coefficient a correspond à une valeur d'un paramètre qui induit les différents états du système et b une constante positive. La Figure 12 représente l'évolution de la fonction potentielle $V(x)$ en fonction du coefficient a . Les solutions de l'Equation, c'est-à-dire les valeurs pour lesquelles $\dot{x} = 0$, correspondent aux minima de la fonction potentielle. Le bassin d'attraction correspond à l'ensemble des états du système qui converge vers le même attracteur.

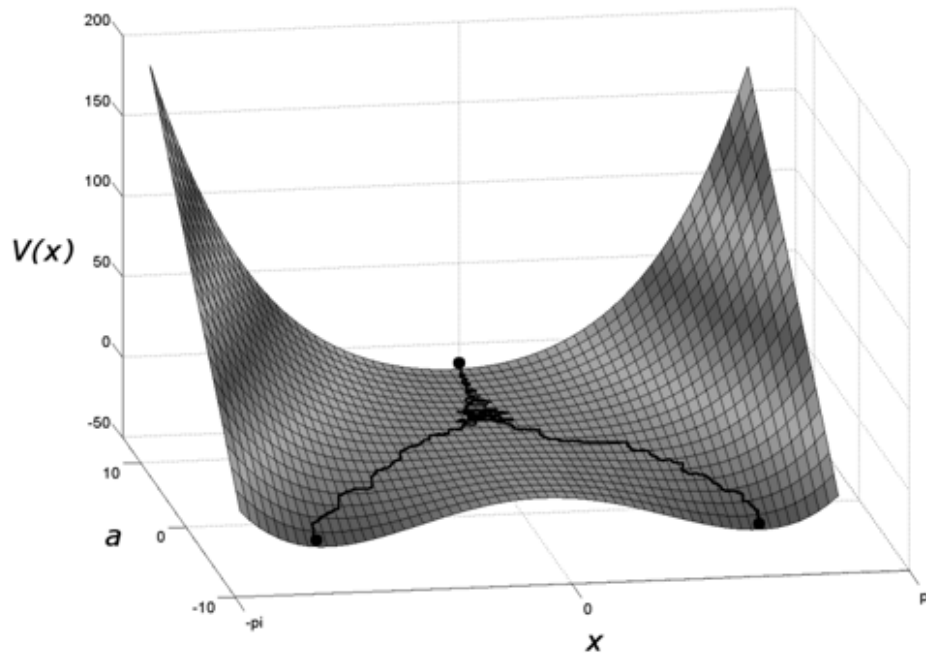


Figure 12 : Fonction potentielle $V(x)$ en fonction du coefficient a . Les déplacements de la bille noire soumise à la gravité représentent les états stables du système.

L'attracteur est représenté sur la figure ci-dessus par une bille noire soumise à la gravité. Si a est positif, alors le système est caractérisé par la présence d'un seul attracteur, correspondant à la valeur minimale de la fonction. Quand a tend vers 0, le paysage dynamique s'aplatit et le bassin d'attraction s'élargit. Cet élargissement est représenté par un déplacement plus étendu de la bille noire. Ce phénomène témoigne de la déstabilisation du comportement initial précédant une transition. La transition prend le terme utilisé dans l'étude des systèmes dynamiques de bifurcation. Enfin, si a est négatif, la bifurcation amène à l'émergence de deux attracteurs avec deux bassins d'attraction identiques. La bille noire peut transiter d'un bassin à un autre. Le système devient bistable. Ce type de bifurcation, dite en fourche (ou pitchfork), est un exemple de la modélisation d'une transition d'un système monostable à un système bistable.

2.2. Dynamique non linéaire de la coordination motrice

2.2.1. Concepts et notions clés

Selon les théories de l'approche dynamique de la motricité, les phénomènes de maintien et de changement observés dans la coordination motrice s'apparentent fortement à ceux observés dans les systèmes complexes auto-organisés. L'approche dynamique de coordination motrice s'attache donc à décrire, expliquer et prédire la formation d'états stables, appelés patrons de coordination, leur perte de stabilité et les transitions d'un patron à un autre (Kelso, 1981, 1984, 1995).

L'étude de la coordination motrice s'intéresse aux processus qui permettent d'établir des relations spatio-temporelles stables entre les différents composants du corps humain pour réaliser une action motrice. Ce corps étant composé d'une centaine d'articulations, de plusieurs centaines de muscles et de quelques milliards de neurones, il semble difficilement concevable que le SNC soit capable de gérer et de réguler l'ensemble des ddl de par leur nombre et leur nature diverse (anatomique, neuronale, etc.). Selon les théories de l'auto-organisation, le mouvement humain est envisagé comme le résultat des interactions entre les différents éléments qui composent le système perceptivo-moteur impliqués dans l'action. C'est grâce à ces interactions locales qu'émergent ce que Bernstein (1967) appelait des « synergies » ou d'autres plus récemment « des structures coordinatives » (Kelso, Holt, Kugler et Turvey, 1980) aboutissant à des coordinations stables. Le mouvement coordonné n'est plus envisagé comme prescrit par le système, mais comme émergent du système.

Les principes d'auto-organisation, de couplage et de transition sont des notions centrales pour comprendre l'apparition, la persistance et la disparition des patrons de coordination. L'approche dynamique de la coordination (Kelso, 1995) considère la coordination motrice comme le résultat d'un assemblage temporaire des différents sous-systèmes et composants en fonction des contraintes de la tâche et de l'environnement. Cet assemblage repose sur les phénomènes de couplage et l'apparition des patrons sur ceux d'auto-organisation. C'est dans ce cadre théorique qu'est interprétée l'existence de modes de coordination stables et les changements spontanés d'un mode de coordination en fonction des contraintes comme par exemple la vitesse de déplacement chez l'homme et l'animal (Collins & Stewart, 1993; Kelso, 1984, 1995; Schöner, Jiang et Kelso, 1990).

2.2.2. Dynamique non linéaire dans le domaine de la motricité : un exemple

Les travaux de Hoyt et Taylor (1981) mettent en évidence l'existence d'une dynamique non-linéaire des dépenses énergétiques en étudiant les niveaux de consommation d'oxygène (métabolisme énergétique) en fonction de la vitesse de locomotion pour chacune des trois allures (pas, trot et galop) chez le cheval. Ces travaux montrent que les vitesses spontanément adoptées par les chevaux correspondent aux minima énergétiques de l'allure associée. Comme le montre la Figure 13, l'augmentation ou la diminution de la vitesse de déplacement par rapport à la vitesse spontanée adoptée pour chaque allure s'accompagne d'une augmentation systématique du coût énergétique.

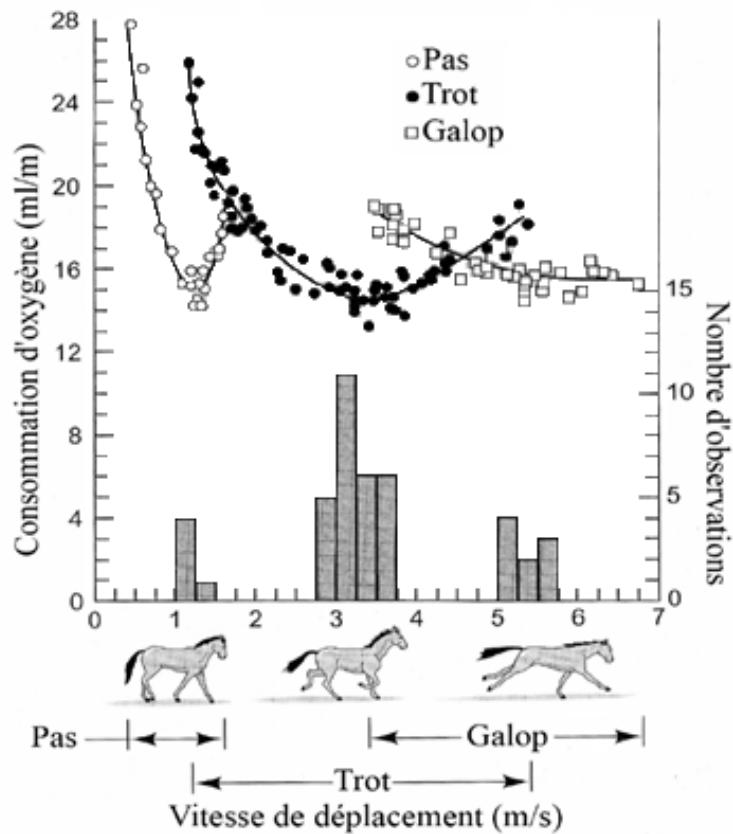


Figure 13 : Consommation d'oxygène dans les trois allures chez le cheval (pas, trot et galop). L'histogramme représente les vitesses spontanément adoptées par le cheval pour chaque allure. (D'après Hoyt et Taylor, 1981).

Le passage d'un mode de locomotion à un autre résulte donc en partie d'un processus d'économie énergétique. Mais plus important pour notre propos, les résultats montrent également un phénomène que les auteurs ont totalement ignoré : le passage du pas au trot (ou du trot au galop) ne s'effectue pas à la même vitesse de déplacement que le passage inverse du trot au pas (ou du galop au trot). Ce phénomène d'hystérèse révèle, de la même manière

que pour les rouleaux de Bénard, la tendance à résister au changement en maintenant son état initial. De plus, nous pouvons observer que dans certaines vitesses de déplacement, plusieurs allures peuvent être adoptées par le cheval. Par exemple, entre 3,5 et 5,5 m/s, le cheval trotte ou galope. Ces deux solutions possibles révèlent la multistabilité du système. Hystérèse et multistabilité sont des signes patents de la non-linéarité des règles qui sous-tendent le changement de modes de locomotion.

2.2.3. Le phénomène de synchronisation : cas des systèmes d'oscillateurs couplés

La compréhension des mécanismes responsables de la production de mouvements coordonnés du corps humain, envisagé comme système complexe, s'est construite par la mise en évidence des propriétés de synchronisation caractérisant les systèmes oscillants couplés, assimilables à des systèmes dynamiques. La synchronisation est définie par Pikovsky, Rosenblum et Kurths (2001) comme « un ajustement rythmique d'objets oscillants à partir de leur interaction, aussi faible soit-elle » (p. 8, notre traduction). Le phénomène d'auto-organisation s'illustre dans la synchronisation entre plusieurs oscillateurs couplés (Pikovsky *et al.*, 2001). Par exemple, la synchronisation des applaudissements sur une fréquence commune résulte de la tendance spontanée à frapper des mains simultanément avec le signal auditif le plus fort, c'est-à-dire le plus synchrone (Néda, Ravasz, Vicsek, Brechet et Barabási, 2000). Les applaudissements sont considérés comme des oscillations qui se synchronisent suite à leur couplage à partir d'un médium informationnel, ici principalement auditif, entre les individus.

Notons que ces phénomènes de synchronisation spontanée entre des oscillateurs ont été mis en évidence dans les travaux précurseurs de Von Holst sur la synchronisation des mouvements de nageoires du poisson (Von Holst, 1937/1973). Il a observé trois comportements possibles lorsque le poisson est libre de bouger naturellement ses nageoires : 1) la coordination *absolue* où les nageoires se stabilisent sur une fréquence commune, 2) la coordination *relative* où les nageoires bougent à leur propre fréquence mais se synchronisent temporairement autour d'une fréquence commune et 3) l'absence de coordination, où les nageoires opèrent à leur fréquence propre et ne sont jamais synchronisées.

2.2.4. Techniques d'analyse issues de la théorie des patrons dynamiques de la coordination motrice

Le couplage entre deux oscillateurs peut se mesurer par la différence de phase entre les oscillateurs. On la nomme la phase relative (PR). Elle prend conventionnellement une valeur

de 0° lorsque les oscillateurs sont en phase et de 180° lorsque ceux-ci sont en antiphasse. En fonction des tâches réalisées, la PR est calculée par trois principales techniques possibles. La PR discrète est calculée par la méthode de l'estimation par points (pour un exemple, Zanone et Kelso, 1997). La PR continue peut être déterminée soit par la méthode de l'arc tangent, soit par celle des transformées de Hilbert (Rosenblum & Kurths, 1998). Notons que les valeurs de précision ou de stabilité de la PR obtenues avec une méthode ne sont pas forcément comparables à celles obtenues avec une autre méthode.

2.2.4.1. La phase relative discrète

La PR discrète est calculée par la méthode de l'estimation par point. Comme nous pouvons le voir sur la Figure 14, cette méthode est fondée sur l'utilisation d'un algorithme de détection de points précis, comme par exemple les points de rebroussement (des crêtes ou des vallées), de chaque oscillation.

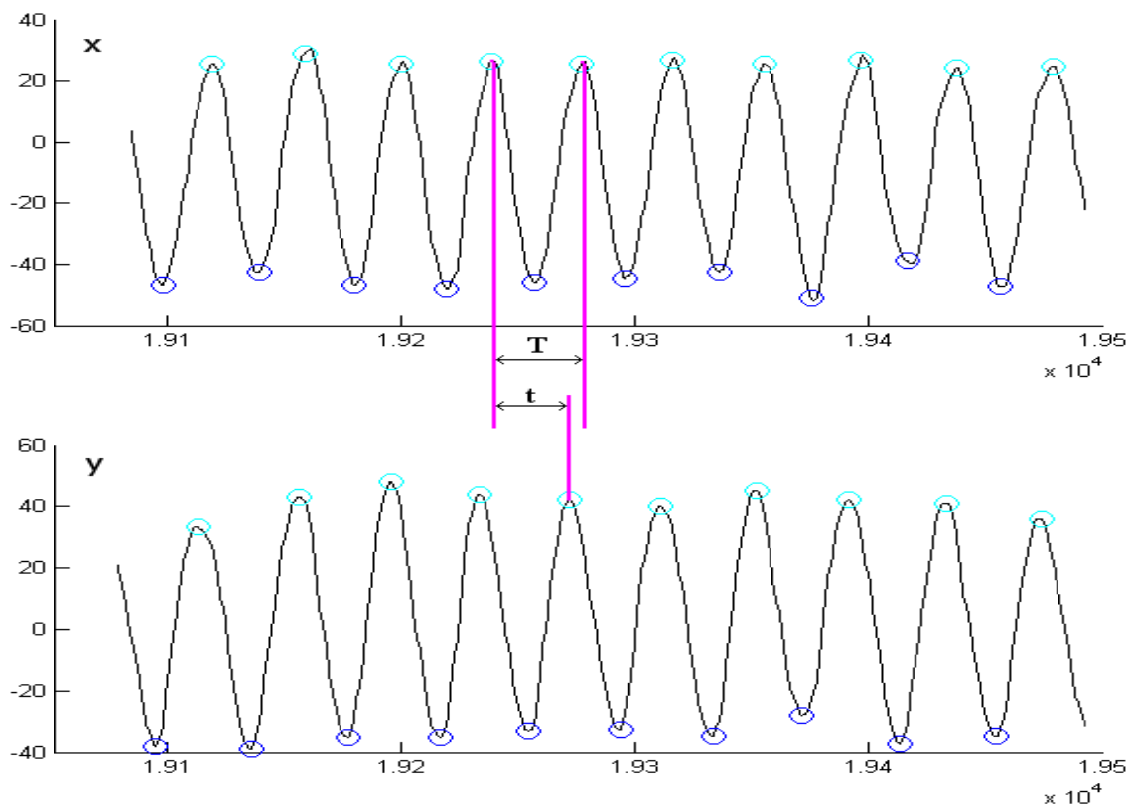


Figure 14 : Exemple de calcul de la PR discrète par la méthode de l'estimation par point (Zanone et Kelso, 1997) sur des données expérimentales.

A partir des moments d'apparition des crêtes et des vallées de chaque série temporelle, la PR discrète se calcule par la formule suivante :

$$\varnothing = \frac{t_2 - T_1}{T_2 - T_1} \times 360^\circ = \frac{t}{T} \times 360^\circ \quad 2.3$$

où T_1 correspond à un point de rebroussement de l'oscillateur pris pour référence, t_2 correspond à un point de rebroussement (crête ou vallée respectivement par rapport à la référence) de l'oscillateur pris pour cible, et T_2 correspond au second point de rebroussement de l'oscillateur pris pour référence. La PR discrète mesure la PR entre n'importe quel type d'oscillateurs périodiques, indépendamment de la forme et des caractéristiques de leur cycle limite.

2.2.4.2. *La phase relative continue*

La PR continue peut se calculer soit à l'aide de la méthode de l'arc tangente, soit à l'aide de la méthode de la transformée de Hilbert. La méthode de l'arc tangente présente l'avantage d'être très précise au niveau temporel. En revanche, elle est très sensible aux modifications d'amplitude du mouvement et nécessite que les oscillateurs se comportent comme des oscillateurs quasi-harmoniques. La transformée de Hilbert est utilisée afin de réduire les effets dus à la normalisation des données, nécessaire dans la méthode de calcul de la PR par la méthode de l'arc tangente. Cette méthode est souvent utilisée en traitement du signal (Panter 1965; Smith & Mersereau, 1992). Contrairement aux analyses dans le domaine fréquentiel telles que les transformées de Fourier, la transformée de Hilbert détermine une différence de phase pour des signaux arbitraires. Cette transformée décale chaque fréquence positive des séries temporelles de $-\pi/2$ radians permettant ainsi d'obtenir un signal en quadrature du signal d'origine. Le signal résultant est une série de nombres complexes dont la partie réelle correspond au signal d'origine et dont la partie imaginaire correspond à la série d'origine mais décalée de $-\pi/2$ radians. Nous obtenons ainsi l'équation suivante :

$$\varnothing = \varphi_{référence} - \varphi_{cible} = \arctan \left(\frac{\widetilde{S1}(t)S2(t) - S1(t)\widetilde{S2}(t)}{S1(t)S2(t) + \widetilde{S1}(t)\widetilde{S2}(t)} \right) \quad 2.4$$

où $\widetilde{S1}(t)$ et $\widetilde{S2}(t)$ sont les parties imaginaires de la transformée de Hilbert des séries de chaque membre et $S1(t)$ et $S2(t)$ sont les valeurs originales des angles de chaque membre. La méthode de la transformée de Hilbert présente l'avantage de rester robuste face aux changements d'amplitude et de fréquence en cours d'essai.

2.2.5. Expérience princeps des théories des patrons dynamiques de la coordination motrice

Les travaux de Kelso (1981, 1984) sur la coordination bimanuelle constituent la première mise en évidence expérimentale de la présence d'une dynamique spontanée assimilable à la dynamique observée dans d'autres systèmes complexes auto-organisés. Ses travaux constituent également le paradigme expérimental le plus utilisé pour illustrer les phénomènes propres à la coordination motrice. Dans l'expérience princeps de 1981, les participants devaient réaliser des oscillations rythmiques des index de chaque main. Comme nous l'avons déjà mentionné, la Figure suivante illustre les valeurs conventionnelles de 0° lorsque les oscillateurs sont en phase et de 180° lorsque ceux-ci sont en antiphase.

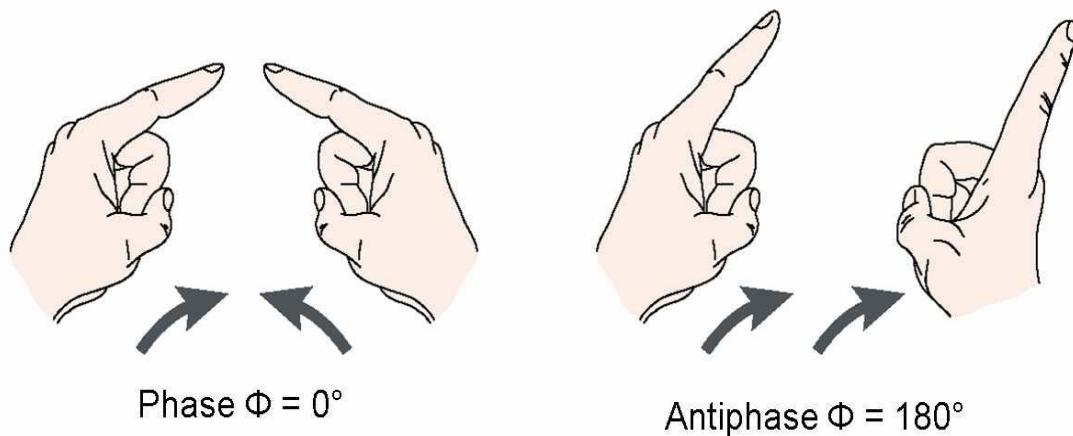


Figure 15 : Illustration des deux patrons préférentiels (en phase et en antiphase) mis en évidence lors de la coordination simultanée des index (d'après Kelso, 1995).

Techniquement, la phase relative mesure le couplage entre les oscillateurs. Conceptuellement, elle résume la relation spatio-temporelle entre les deux composantes à coordonner et rend compte de l'état de coordination du système. La PR moyenne permet d'évaluer le mode de coordination adopté et sa variabilité est un indicateur de stabilité. Les résultats de l'expérience ont montré que la coordination en phase est plus stable qu'en antiphase. Lorsque les sujets réalisent le mode en antiphase et que la fréquence du mouvement d'oscillations des doigts augmente, une augmentation des fluctuations de la phase relative indique la perte de stabilité du patron initial. A une certaine fréquence, dite critique, les fluctuations augmentent jusqu'à la perte de stabilité de la coordination suivie d'une transition de phase, c'est-à-dire d'un passage abrupt et spontané vers le patron en phase. La mesure de la variabilité de la phase relative du patron en phase réalisé après la transition de phase indique une stabilisation du système autour du nouveau patron. Le

phénomène de transition de phase correspond à une réorganisation du système éloigné de son état d'équilibre depuis le patron de coordination devenu instable vers un patron de coordination plus stable. Cette transition s'effectue en réponse à l'augmentation de contraintes appliquées à la coordination, c'est-à-dire dans le cas présent à l'augmentation de la fréquence d'oscillation. La fréquence d'oscillation des mouvements est le paramètre de contrôle (PC) dans la mesure où elle induit le changement d'état du système (la transition de phase) sans le prescrire.

Selon Kelso (1984), ces phénomènes révèlent l'existence d'une dynamique de coordination spontanée sous-jacente qui résulte du couplage entre les deux oscillateurs. La mise en évidence expérimentale de ces phénomènes dont rendent compte les travaux de Kelso (1981) a été formalisée par le modèle HKB d'Haken, Kelso et Bunz (1985).

2.2.6. Le modèle HKB

Rappelons qu'un système dynamique est un système d'équation(s) définissant l'évolution dans le temps d'une variable x , ou en ce qui nous concerne de la variable collective du système étudié c'est-à-dire dans notre cas la phase relative entre deux oscillateurs couplés. Le couplage est mis en évidence par l'influence mutuelle que chaque oscillateur exerce sur l'autre. La PR entre les deux oscillateurs couplés rend compte des modes préférentiels de coordination et du changement abrupt de comportement lors de transition de phase. L'augmentation graduelle du PC amène à une évolution non linéaire de la PR, marquée par des valeurs préférentielles, appelés attracteurs, et par le maintien ou le changement abrupt de cette valeur à une autre. Parmi toutes les valeurs de PR possibles entre deux oscillateurs couplés c'est-à-dire dans l'espace de phase défini entre -180° et $180^\circ \pm 360^\circ$, plusieurs attracteurs peuvent coexister en même temps, pour une même valeur du PC, révélant le phénomène de multistabilité. Cependant, lorsque le PC atteint une valeur critique, un des attracteurs disparaît, diminuant ainsi le nombre d'attracteurs.

Le modèle HKB est une équation de mouvement exprimant les différentes valeurs que peut prendre la phase relative en fonction des contraintes qui sont appliquées au système, notamment celles liées au PC (le plus souvent la fréquence d'oscillation). A partir des observations expérimentales de Kelso (1981), Haken et collaborateurs (1985) propose comme fonction potentielle la superposition de deux fonctions cosinus :

$$V(\varnothing) = -a * \cos(\varnothing) - b * \cos(2\varnothing) \quad 2.5$$

Le modèle HKB permet de visualiser le paysage dynamique du système en assimilant Φ à une bille se déplaçant sur le paysage dynamique défini par la fonction potentielle V . En diminuant le rapport b/a , la Figure 16 représente l'évolution du paysage dynamique que prend la fonction potentielle.

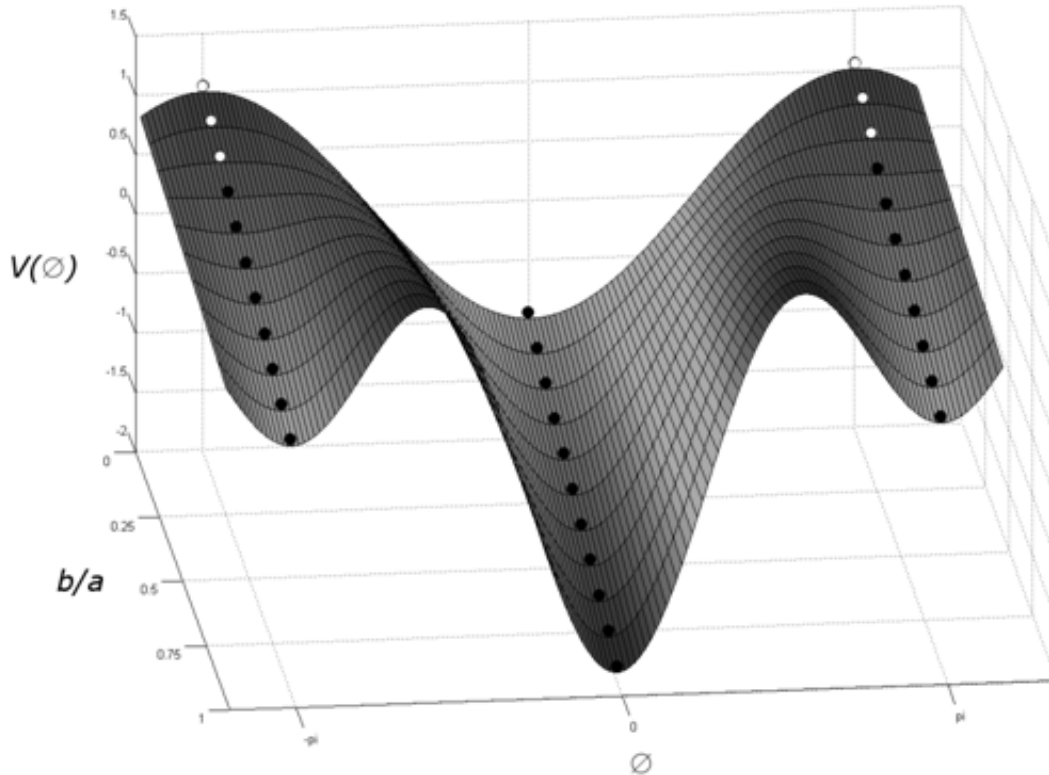


Figure 16 : Illustration du modèle HKB. Les pentes de la fonction rendent compte de la stabilité de la coordination. Une pente nulle est observée pour les patrons stables représentés ici par les billes noires dans les vallées, ou pour les patrons instables représentés ici par les billes blanches dans les crêtes.

Comme nous pouvons le voir sur la figure, les déplacements de la bille noire au fond des bassins d'attraction représentent les comportements stables du système. Lorsque le rapport b/a est élevé (e.g., $b/a = 1$), la fonction potentielle démontre l'existence de deux solutions stables dans l'espace de phase, représentées par les billes noires à $\Phi = 0^\circ$ et $\Phi = \pm 180^\circ$. Toutes les valeurs proches de ces valeurs convergent vers elles : Ce sont les attracteurs de la dynamique intrinsèque de coordination. La différence de largeur et de profondeur des bassins d'attraction rend compte de la plus grande stabilité de l'attracteur en phase ($\Phi = 0^\circ$) par rapport à l'attracteur en antiphase ($\Phi = \pm 180^\circ$).

Lorsque le rapport b/a diminue (e.g., $b/a = 0.5$), le paysage dynamique s'aplatit, notamment au niveau de l'attracteur en antiphase. Le comportement de la bille noire au

centre de ce bassin devient de plus en plus instable. Cette situation représente l'augmentation des fluctuations critiques sous l'effet de l'augmentation de la fréquence d'oscillation.

Lorsque le rapport atteint une certaine valeur ($b/a = 0.25$), l'attracteur en antiphase devient un patron instable, appelé répulseur, et seul l'attracteur en phase persiste. Suite à cette bifurcation, le système passe d'un régime bistable (attracteurs à 0° et 180°) à un régime monostable (attracteur à 0°). Notons que ce phénomène du passage du mode en antiphase en mode en phase avec l'augmentation de la fréquence n'est pas réversible, car le mode en phase correspond au mode le plus stable, si bien que le comportement reste attiré vers en-phase quelle que soit la valeur de b/a .

Dans la mesure où la stabilité de la coordination est déterminée par la valeur de la fonction potentielle pour chaque valeur de la phase relative, la dérivée de la fonction potentielle rend compte des états stables et instables de la coordination. En effet, les états stables correspondent donc à des valeurs de pente égales à 0. Dans le bassin d'attraction, le retour vers l'état stable est exprimé par le temps de relaxation. Il est plus court pour le patron en phase que pour le patron en antiphase. Le temps de relaxation et la variabilité de Φ sont les deux indices utilisés pour évaluer la stabilité des patrons de coordination.

2.2.7. La méthode de scanning

Un attracteur est caractérisé par (1) sa valeur, qui correspond à la valeur minimale du bassin d'attraction, (2) sa stabilité, qui correspond à la profondeur du bassin d'attraction, et (3) sa force d'attraction, qui correspond à l'influence de cet attracteur de telle manière qu'à n'importe quel endroit où la variable collective se trouve, elle tendra à retomber vers l'attracteur le plus proche. Afin d'explorer l'ensemble des patrons de coordination bimanuelle, Tuller et Kelso (1985) ont repris un paradigme expérimental développé par Yamanishi, Kawato et Suzuki (1980), appelé le paradigme TKY ou « scanning » (Zanone et Kelso, 1992). L'objectif était de confirmer empiriquement la présence de deux attracteurs et d'attester que les autres patrons de coordination sont systématiquement attirés vers l'un de ces deux patrons stables. Les participants devaient produire treize patrons de coordination, soit treize phases relatives entre les deux index, allant de 0° à 180° par palier de 15° . La tâche était de taper l'index gauche en même temps qu'un flash lumineux à gauche sur un écran et de taper l'index droit en même temps qu'un flash lumineux à droite. Le décalage temporel entre les deux lumières variait selon les différentes relations de phase requises. Pour chaque patron requis, l'erreur constante (EC) moyenne, c'est-à-dire la différence moyenne entre la PR produite et PR requise, et la déviation standard de la PR produite ont été calculées. Les

attracteurs peuvent être aisément identifiés à l'intersection entre la courbe de l'EC et l'axe des abscisses, c'est-à-dire lorsque la valeur absolue de l'EC moyenne est minimale (Zanone et Kelso, 1992).

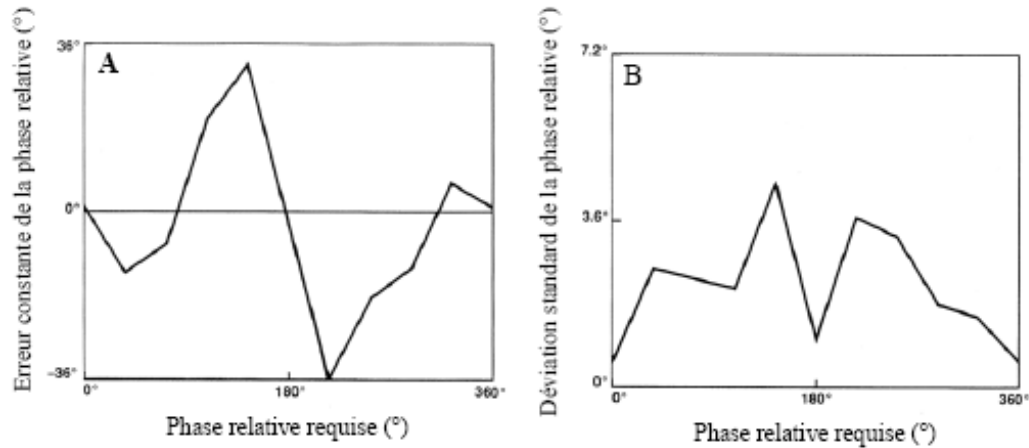


Figure 17 : En A, différence entre la PR produite et la PR requise (Erreur Constante) en fonction de la PR requise. En B, Variabilité de la PR produite (déviation standard) en fonction de la PR requise (adapté de Tuller & Kelso, 1985).

Les résultats de cette expérience ont confirmé que, parmi les 13 PR requises, seuls deux attracteurs sont présents à 0° et 180°, là où les valeurs de l'EC sont nulles. De plus, la pente négative de la courbe d'EC à 0° et à 180° (cf. Figure 17A) illustre la force d'attraction des deux attracteurs. En effet, elle indique que pour les PR voisines inférieures aux attracteurs, la PR produite est surestimée (EC positive) alors que pour les PR voisines supérieures aux attracteurs, la PR produite est sous-estimée (EC négative).

2.3. Dynamique non linéaire de la coordination graphomotrice

2.3.1. Modélisation oscillatoire de la trace écrite

Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, l'activité graphique résulte principalement de la coordination rythmique du poignet et de la pince des doigts. De nombreux auteurs acceptent l'assimilation de l'activité de ces deux composantes à des oscillations sur les axes principaux du plan d'écriture (Athènes *et al.*, 2004 ; Bullock *et al.*, 1993 ; Hollerbach, 1981 ; Lelivelt *et al.*, 1996 ; Meulenbroek *et al.*, 1996).

En assimilant les mouvements du poignet et de la pince des doigts à des oscillations orthogonales, Hollerbach (1981) a proposé une modélisation de la formation de la trace écrite à partir de la combinaison de ces deux oscillations. En référence à des modèles plus anciens

selon lesquels les muscles se comporteraient comme des ressorts (Feldman, 1974a, b), ce modèle oscillatoire assimile le membre effecteur à un système musculaire agissant comme un ressort ayant une masse. Le système d'équations est décrit à partir du profil de vitesse de chaque composante :

$$\dot{x} = A_x * \sin(\omega_x(t - t_0) + \varphi_x) + c \quad 2.6$$

$$\dot{y} = A_y * \sin(\omega_y(t - t_0) + \varphi_y) \quad 2.7$$

où A_x et A_y sont les amplitudes des oscillateurs horizontal et vertical respectivement, ω_x et ω_y leurs fréquences propres, φ_x et φ_y leurs phases, $t - t_0$ le temps écoulé depuis le début du mouvement et c une constante de déplacement représentant la progression droite-gauche de l'avant-bras pour permettre l'enchaînement des lettres et des mots.

Les variations de la PR ($\Phi = \varphi_x - \varphi_y$) et de l'Amplitude Relative ($AR = A_x - A_y$) à la même fréquence ($\omega_x = \omega_y$) produisent des ellipses qui varient en orientation (α), en excentricité (Σ) et en sens de rotation. Quelques exemples sont illustrés par la Figure 18.

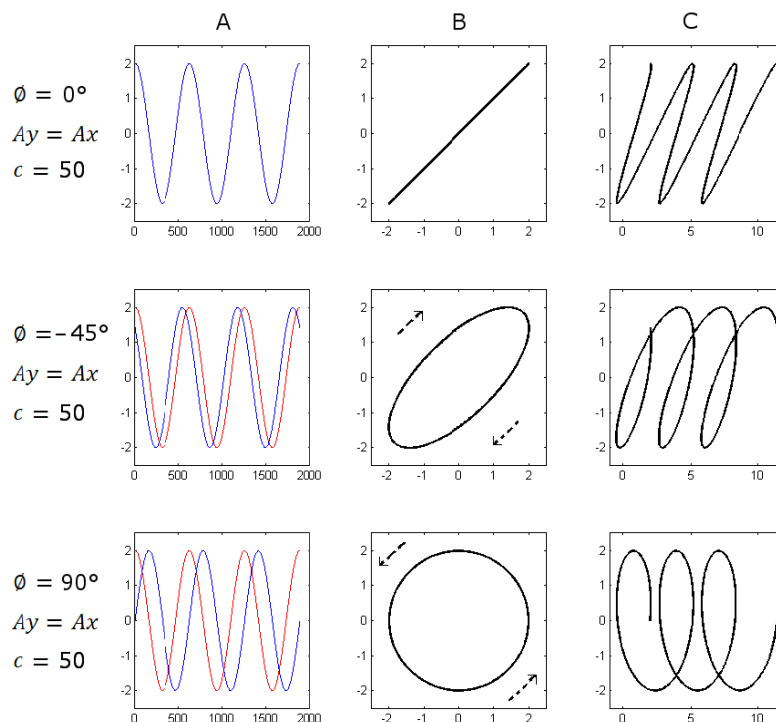


Figure 18 : Exemples de traces produites à partir du modèle de Hollerbach (1981) selon différentes phases relatives ($AR = 1$ et $c = 50$). La colonne A représente le comportement de chaque composante $x(t)$ (rouge) et $y(t)$ (bleu). La colonne B correspond à la trace produite par la combinaison de ces deux oscillations. La colonne C correspond à la même trace produite en ajoutant la constante de déplacement vers la droite c .

L'évolution de la PR entre 0° et 90° diminue l'excentricité des formes elliptiques, allant du trait au cercle et l'évolution de la PR de 90° à 180° augmente l'excentricité des ellipses dans une orientation perpendiculaire. Enfin, le changement de signe de la PR modifie le sens de rotation des trajectoires produites. Notons que d'autres formes peuvent être obtenues quand les fréquences sont différentes, donnant lieu à un « 8 » par exemple (voir l'expérience de Buchanan, Kelso et Fuchs, 1996 détaillé plus loin pour plus d'informations). L'addition du mouvement de translation de gauche à droite distingue les boucles séparées dans l'espace et crée des lettres successives. Hollerbach (1981) a illustré son modèle avec l'exemple du mot « *eune* » en décrivant les différents paramètres de phase et d'amplitude ainsi que les moments de changement de paramètres qui s'effectueraient à l'annulation de la vitesse verticale.

D'après ce modèle, chaque forme graphique serait codée au niveau du SNC en termes de valeurs de phase et d'amplitude spécifique de chaque oscillateur. Une lettre serait la concaténation de plusieurs tracés dont le début et la fin seraient marqués par l'annulation de la vitesse verticale. Autrement dit, l'unité fondamentale de l'écriture correspondrait à la trace produite entre deux points successifs où la vitesse verticale s'annule et chaque unité serait contrôlée par le SNC en modulant la phase, la fréquence et l'amplitude de chaque composante oscillatoire.

Un des avantages de ce modèle oscillatoire est qu'un petit nombre de paramètres (i.e., la phase, l'amplitude et la fréquence) suffit à décrire, générer ou reconstruire n'importe quelle trajectoire écrite. La seule intervention du SNC consisterait à spécifier à des moments appropriés, à savoir quand la vitesse verticale s'annule, l'ensemble des paramètres afin de produire la trace désirée. Cependant, une première limite de ce modèle est que l'on peut s'interroger sur la manière dont le SNC fait pour détecter les moments où la vitesse verticale s'annule, anticiper le changement de paramètres sans arrêter le mouvement. De plus, une autre limite réside dans l'indépendance entre ces deux composantes oscillatoires du système. Nombreuses sont les études ayant montré l'impossibilité de les moduler de façon indépendante, suggérant une covariation très forte entre des composantes verticale et horizontale (Burton, Pick, Holmes & Teulings, 1990 ; Maarse & Thomassen, 1983 ; Pick & Teulings, 1983 ; Thomassen & Teulings, 1983). Enfin, la combinaison linéaire entre les composantes oscillatoires de la trajectoire (x et y) a pour conséquence d'indifférencier les différents modes de coordination produits. Autrement dit, toutes les combinaisons entre les deux oscillateurs seraient produites de façon aussi précise les unes que les autres. Or, à nouveau, de nombreuses études ont montré que certains traits étaient plus précisément

produits et plus fréquemment employés que d'autres (e.g., Meulenbroek & Thomassen, 1991 ; Van Sommers, 1984). Ces phénomènes nous amènent à concevoir la génération de formes graphiques en termes de dynamique de coordination motrice résultant du couplage non-linéaire entre les composantes oscillatoires du système effecteur.

2.3.2. Vers une théorie dynamique de la formation de trajectoire

En 1994, Schönér fut le premier à envisager le problème de la formation de trajectoire dans une et deux dimensions sous l'angle des concepts et outils issus de l'approche des patrons dynamiques. Selon lui, les approches traditionnelles centrées sur la formation de trajectoire révèlent une contradiction entre d'une part, l'analyse structurelle des systèmes effecteurs, et d'autre part, l'analyse des processus informationnels responsables de la programmation du mouvement. L'analyse structurelle des systèmes effecteurs se centre sur la biomécanique des effecteurs, les systèmes muscle-articulation, spinaux, cérébelleux et corticaux impliqués dans le contrôle moteur. L'analyse des processus informationnels s'effectue à partir des transformations entre les différents systèmes de référence, par exemple, rétinien, lié à l'effecteur ou à l'objet manipulé. Schönér a proposé un modèle qui permet d'établir un lien intime entre les niveaux de programmation motrice et les transformations dans les différents systèmes coordonnés en distinguant trois niveaux différents :

- le « Load level » dans lequel les effecteurs interagissent avec les contraintes environnementales (les forces mécaniques) ;
- le « Timing level » dans lequel se génère l'ordre temporel inhérent à la posture et aux mouvements discrets et rythmiques ;
- le « Goal-setting level » dans lequel les buts du mouvement tels que les positions de la cible, les amplitudes et la forme du mouvement sont déterminés.

Sans rentrer dans les formules mathématiques, retenons simplement que le principal intérêt de ce modèle est que, comme dans la production de n'importe quel mouvement, tout ce que le SNC « planifie » sur un mouvement peut être déterminé par ce qui reste stable face à l'ensemble des contraintes. Cependant, la principale limite est que la complexité du modèle réduit son accessibilité.

En 1996, Buchanan et collaborateurs ont démontré expérimentalement la présence d'une dynamique de coordination non linéaire dans la formation de trajectoire en 2D. Les participants avaient comme consigne de produire des 8 et des 0 selon la coordination entre des mouvements d'abduction-adduction et de flexion-extension de l'index droit (cf. Figure 19). Ces deux composantes peuvent être assimilées à des oscillateurs orthogonaux. La forme

8 est caractérisée par un rapport fréquence 2:1 et une PR de 90° entre $x(t)$ et $y(t)$. Comme nous montre la Figure 19D, l'oscillateur x effectue deux cycles alors que l'oscillateur y effectue un seul cycle pendant la même période.

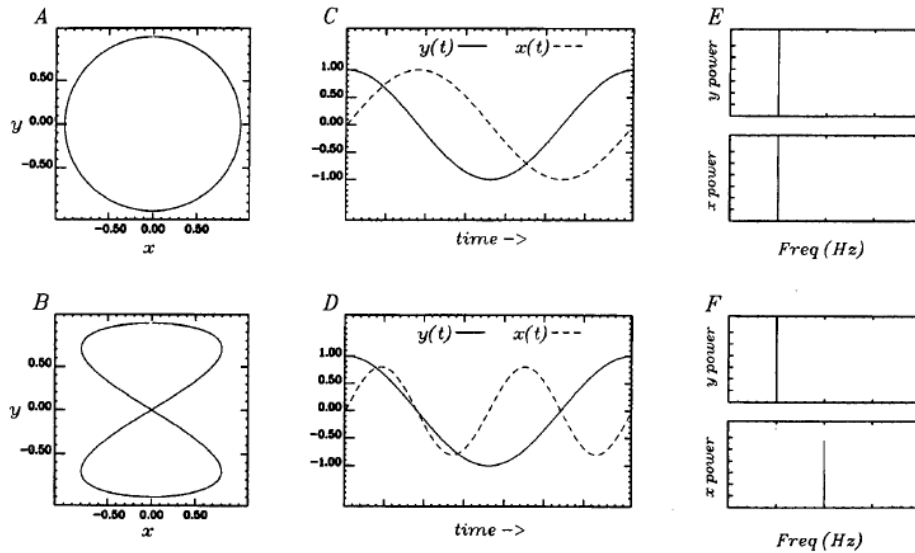


Figure 19 : Décomposition des deux patrons de coordination '0' et '8' (à gauche) selon l'activité oscillatoire (au centre) et le spectre de fréquence (à droite) des deux composantes $x(t)$ et $y(t)$ du mouvement.

Ces différences de fréquence entre les oscillateurs se traduisent au niveau du spectre de fréquence par une puissance de x plus importante que celle de y (cf. Figure 20). La forme '0' est caractérisée par un rapport de fréquence 1:1 et une PR de 90° entre $x(t)$ et $y(t)$. Les participants devaient produire ces deux patrons de coordination en suivant la fréquence d'un métronome auditif qui augmentait progressivement de 0.8 Hz à 1.7 Hz par palier de 0.1 Hz.

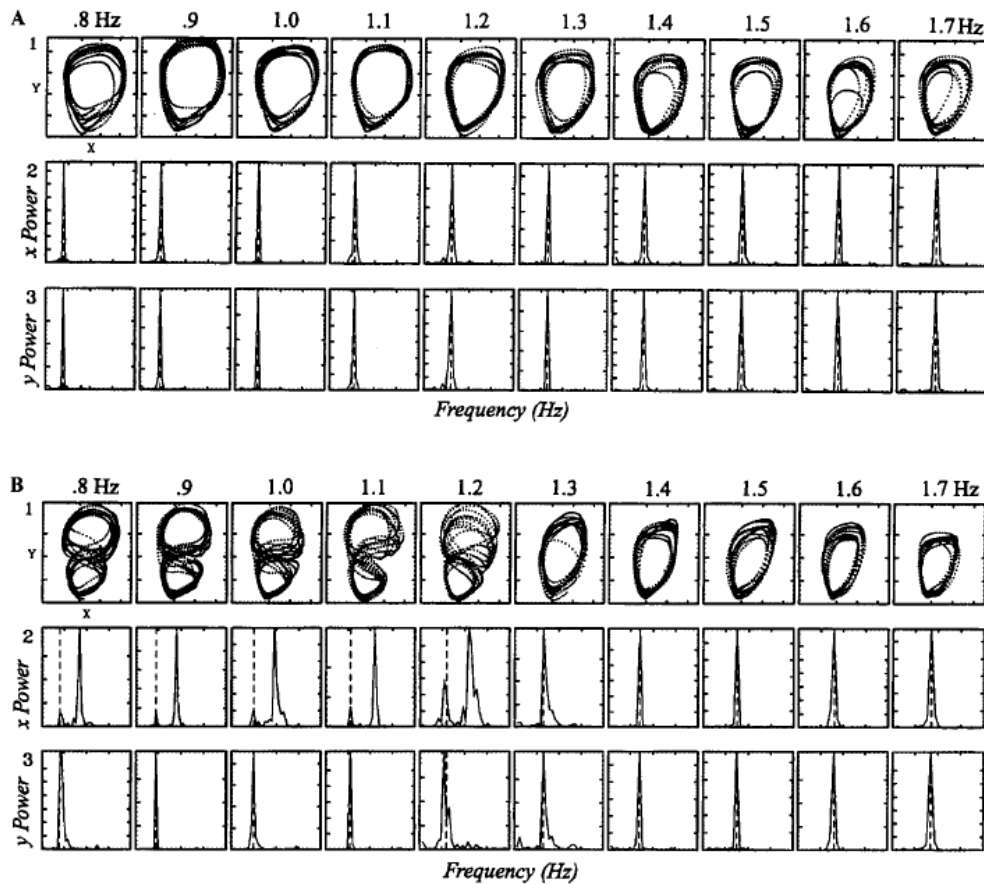


Figure 20 : Présentation d'un essai complet d'un participant dans la production des patrons de coordination '0' (en haut) et '8' (en bas) en fonction des différentes fréquences demandées. La deuxième et troisième ligne illustrent la puissance spectrale de $x(t)$ et $y(t)$ respectivement (tiré de Buchanan *et al.*, 1996).

Les résultats ont montré que pour une fréquence de mouvement faible, les formes 8 et 0 pouvaient être produites de manière stable, révélant la multistabilité du système. Quelle que soit la fréquence imposée, la forme 0 pouvait être maintenue. Par contre, quand les participants commençaient par la forme 8, le passage abrupt de la forme 8 à la forme 0 à une valeur de fréquence critique était observé à 1.3 Hz (cf. Figure 20). Le changement de forme résulterait d'un changement dans les rapports de fréquence entre les deux composantes oscillatoires, passant de 2:1 à 1:1. Non seulement chaque forme est caractérisée par un rapport de fréquence spécifique entre les deux oscillateurs, mais le rapport de fréquence permet également de rendre compte du changement soudain de patron en réponse à une augmentation continue de la fréquence de mouvement. Dans cette expérience, le rapport de fréquence était considéré comme la variable collective du système. Des résultats similaires ont été obtenus pour des tâches de tapping bimanuelle effectués par exemple à la batterie (Boonstra, Daffertshofer, Breakspear & Beek, 2007 ; Peper, Beek & van Wieringen, 1995 ; voir également Repp, 2005, pour une revue).

Le principal intérêt de ces travaux est que la formation de formes préférentielles dépend de la coordination entre les deux composantes oscillatoires produisant la trajectoire. Ainsi, une seule variable collective (i.e., le rapport de fréquence) entre les composantes oscillatoires x et y , permet de rendre compte des formes produites ainsi que des changements de formes en réponse à une modification de contrainte non spécifique, ici l'augmentation de la fréquence d'exécution.

En 2000, Dounskaïa et collaborateurs ont étudié la coordination entre les mouvements du poignet et des doigts impliqués dans la production de formes géométriques simples telle que des traits et des cercles. Dans une première expérience, des participants droitiers et gauchers devaient dessiner des traits selon quatre conditions possibles : (1) uniquement avec le poignet, (2) uniquement avec les doigts, (3) en condition « équivalent » c'est-à-dire lorsque la flexion-extension du poignet coïncide avec la flexion-extension de la pince des doigts et (4) en condition « non-équivalent » où la flexion du poignet coïncide avec l'extension des doigts et vice-versa. Les participants avaient pour consigne de produire ces traits dans quatre condition de vitesse allant de la vitesse lente à la vitesse « aussi vite que possible ». Les résultats de cette première expérience ont révélé qu'en fonction de l'augmentation de la vitesse d'écriture, les traits produits en condition « non-équivalent » sont tracés avec une plus grande variabilité et une vitesse plus faible que dans les autres conditions (cf. Figure 21).

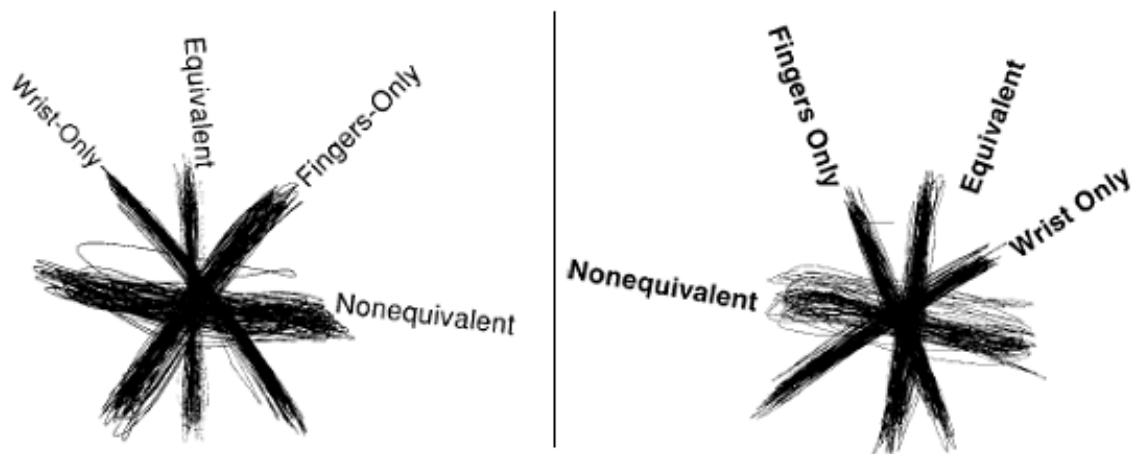


Figure 21 : Traits tracés par un participant gaucher (à gauche) et droitier (à droite) dans les quatre conditions de coordination (d'après Dounskaïa *et al.*, 2000).

Dans une seconde expérience, les participants devaient dessiner des cercles dans les quatre mêmes conditions de vitesse que lors de la première expérience. Les résultats de cette

seconde expérience révèlent qu'en fonction de l'augmentation de la vitesse d'écriture, les cercles sont dessinés avec une plus variabilité (cf. Figure 22). Le passage d'un cercle à une ellipse, en réponse à une augmentation de la fréquence de mouvement correspond à un changement de la valeur de la PR entre les mouvements de flexion-extension des doigts et d'adduction-abduction du poignet passant de 70° (formation d'un ovoïde) à 50° (formation d'une ellipse inclinée vers la droite).

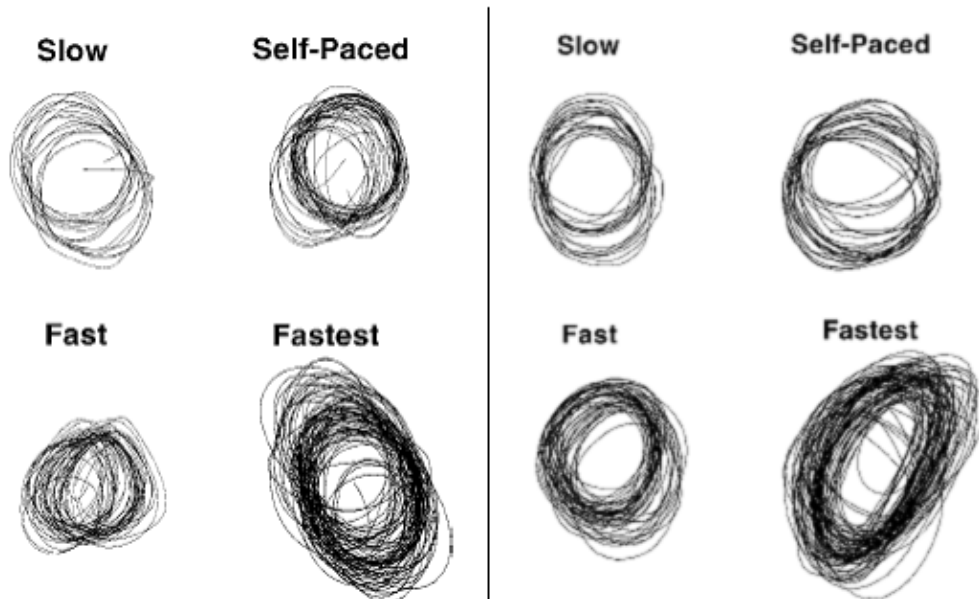


Figure 22 : Cercles tracés par un participant gaucher (à gauche) et droitier (à droite) dans les quatre conditions de vitesse (d'après Dounskaïa *et al.*, 2000).

Le principal intérêt de cette étude est l'observation de certains modes préférentiels de coordination entre le poignet et les doigts à partir de l'analyse de la relation de phase entre les oscillations des axes x et y de la trajectoire produite. Seule la phase relative entre les composantes (x et y ou x' et y') permet de rendre compte du passage d'un cercle à une ellipse (inclinée à droite chez les droitiers et à gauche chez les gauchers) parallèlement à une augmentation de la fréquence de mouvement. Ce passage spontané en réponse à une augmentation de contrainte pourrait indiquer la présence d'une transition de phase d'une forme moins stable (cercle) à une forme plus stable (ellipse).

Cependant, seuls le cercle et les traits dans quatre orientations ont été analysés dans cette étude. Si elle permet de confirmer la présence de formes préférentielles selon la coordination entre les composantes du système effecteur, une analyse plus exhaustive permettra de déterminer l'ensemble des formes géométriques préférentielles en graphomotricité.

2.3.3. Dynamique de coordination graphomotrice spontanée

Athènes et collaborateurs (2004) ont proposé un paradigme en graphomotricité sur lequel tout le travail de thèse a été pensé et construit. Il participe au cadre théorique et méthodologique de référence, ce qui explique l'intérêt particulier que nous lui portons.

Athènes *et al.* (2004) ont cherché à déterminer l'ensemble des patrons préférentiels dans la dynamique de coordination graphique spontanée chez l'adulte. Afin d'explorer l'ensemble des patrons de coordination possibles et la présence de certains patrons préférentiels, ces auteurs ont utilisé la méthode de scanning (voir le paragraphe 2.2.7. pour plus détails sur la méthode). De manière analogue à l'expérience de Tuller et Kelso (1985), six participants droitiers devaient produire 13 patrons de coordination qui correspondaient à treize valeurs de la variable collective différentes, soit 13 phases relatives allant de 0° à 180° par palier de 15°. Reprenant le modèle de Hollerbach (1981) assimilant les mouvements du poignet et des doigts à des oscillations sur l'axe *x* et *y*, Athènes *et al.* (2004) ont généré 13 formes graphiques requises, variant par pas de 15° de PR, entre 0° de PR (coordination en phase aboutissant à un trait orienté à 1h30) et 180° de PR (coordination en antiphase aboutissant à un trait orienté à 10h30) en passant par 90° de PR (coordination aboutissant à un cercle). Les formes modèles étaient affichées sur une tablette graphique et le sujet devait reproduire la forme présentée par-dessus le modèle.

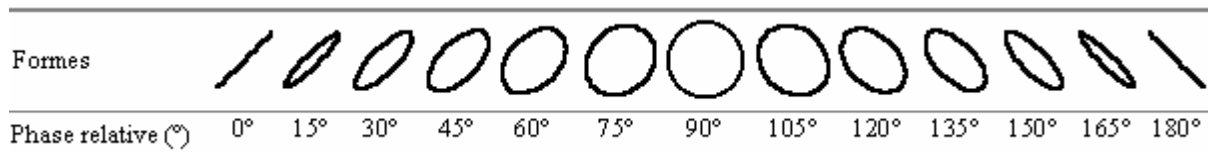


Figure 23 : Scanning de la PR. Correspondance entre les formes et leur phase relative.

De la même manière, ces auteurs ont manipulé et analysé l'Amplitude Relative (AR) entre les deux oscillateurs *x* et *y*. Le scanning de l'AR consistait en une succession de 13 formes elliptiques orientées à la verticale et à l'horizontale. Les six formes verticales étaient obtenues en diminuant progressivement l'amplitude de l'oscillateur horizontal à partir de son amplitude maximale en 6 paliers successifs ($A_x = 2$ cm à $A_x = 0$ cm par pas de -0,33 cm) alors que l'amplitude de l'oscillateur vertical restait à son amplitude maximale ($A_y = 2$ cm). Les six formes horizontales étaient obtenues avec la même procédure, en diminuant progressivement l'amplitude de l'oscillateur vertical de son amplitude maximale en 6 paliers successifs ($A_y = 2$ cm à $A_y = 0$ cm) alors que l'amplitude de l'oscillateur horizontal restait à son amplitude

- Le sens de progression du scanning : ascendant, de 0° à 180° ou descendant de 180° à 0°. La manipulation du sens de progression permet d’observer des phénomènes d’hystérèse le cas échéant.

Les analyses ont été effectuées sur les erreurs et la variabilité de la PR produite déterminées par la technique de PR discrète (voir paragraphe 2.2.4. pour des détails) et sur la fréquence de production. Les erreurs de PR correspondent à l’erreur constante (EC) et l’erreur absolue (EA) pour chaque PR requise et chaque essai. Rappelons que l’erreur constante de la PR (EC) correspond par convention à la différence signée entre la PR produite et la PR requise (cf. Paragraphe 2.2.7. pour plus de détails). L’erreur absolue (EA) correspond à la valeur absolue de la différence entre la PR produite et la PR requise pour chaque patron. Cette variable est un indice de précision temporelle de la performance.

Pour les deux scannings, l’analyse de l’EC a révélé la présence de quatre patrons préférentiels : à 0°, autour de 45°, de 120-135° et à 180° (voir Figure suivante).

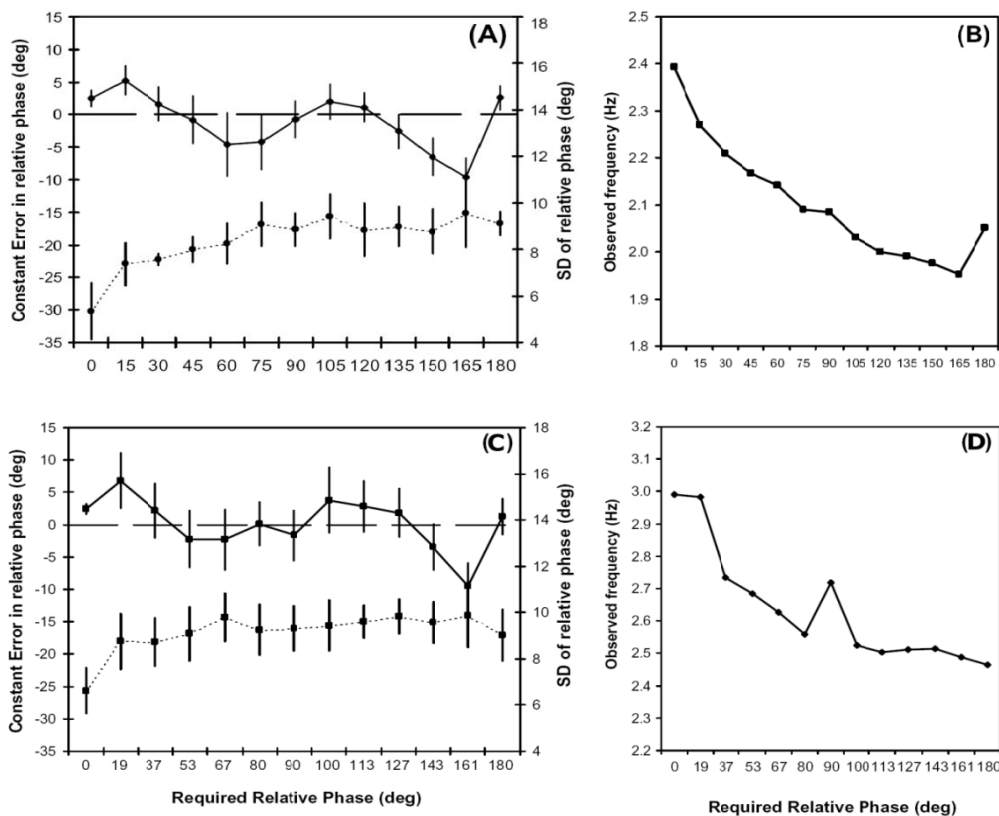


Figure 25 : Scanning de la PR (ligne du haut) et de l’AR (ligne du bas). En A, EC moyenne de la PR produite et Déviation Standard (DS) en fonction de la PR des formes requises. Les barres d’erreur correspondent à la variabilité interindividuelle. En B, fréquence moyenne en fonction de la PR des formes requises.

L'analyse de l'EA a révélé une différence de précision de reproduction en faveur de quatre patrons préférentiels repérés par l'EC. Ces patrons étaient reproduits avec une plus grande précision que tous les autres et le biais négatif de l'EC a révélé des propriétés d'attraction pour les patrons à 45° et à 120-135°. A l'opposé, le biais positif des patrons les plus stables à 0° et 180° les définiraient comme des répulseurs. Ce phénomène a déjà été observé et discuté par Zanone et Kelso (1992) dans une tâche de scanning dans la coordination bimanuelle et peut s'expliquer par les propriétés perceptives de discrimination visuelle de ces formes (Wamain *et al.*, 2009), alors qu'ils sont attractifs sur le plan moteur car stables. Enfin, l'analyse de la fréquence a révélé qu'elle diminuait en fonction de l'augmentation de la PR requise, avec un pic à 180° concernant le scanning de la PR et à 90° concernant le scanning de l'AR.

Les résultats similaires dans les deux scans souligneraient la nature abstraite de la dynamique : elle reste identique indépendamment de la rotation de 45° entre les deux scans qui nécessiteraient pourtant une mise en action réellement différente du système-effecteur. Ces résultats sont en accord avec l'assomption que la relation de phase est une variable collective valide et fiable de la coordination mise en jeu dans la graphomotricité. En effet, la phase relative est une variable temporelle relative, une « quantité relationnelle abstraite capable d'être réalisée par différents systèmes d'effecteurs » (Kelso, 1995, p. 179-180, notre traduction). Cette dynamique de coordination spontanée pourrait être à l'origine du phénomène d'équivalence motrice retrouvée dans l'écriture (Merton, 1972 ; Wing, 2000 ; Wright, 1990). Dans cette perspective, le phénomène d'équivalence motrice proviendrait des propriétés de stabilité du système auto-organisé.

La dynamique de coordination sous-jacente de la graphomotricité observée par Athènes et collaborateurs (2004) est comparable à celle retrouvée dans la formation de trajectoire (Buchanan *et al.*, 1996) où la production de trajectoire spatiale en 2D correspondant à des formes en 8, 0 et C et les transitions entre ces formes étaient gouvernées par une dynamique d'oscillateurs couplés. Comme dans de nombreuses tâches de coordination motrice périodique, la dynamique de coordination graphique ressortit à celle d'oscillateurs couplés (Haken *et al.*, 1985). En plus des deux patrons intrinsèquement stables à 0° et 180°, la graphomotricité reposerait sur une dynamique plus riche que celle originellement trouvée au niveau de la coordination bimanuelle (Kelso, 1984), avec d'autres patrons préférentiels autour de 45° et de 120-135°, même si ces derniers sont moins stables que les patrons en phase et antiphase.

2.3.4. Dynamique de coordination graphomotrice contrainte

Afin d'étudier plus en profondeur le degré de stabilité des patrons de coordination préférentiels, Sallagoïty et collaborateurs (2004) se sont intéressés à comment la dynamique de coordination graphomotrice étudiée jusqu'alors dans des conditions assez naturelles évolue quand la tâche soumet le système à des contraintes supplémentaires. Plus précisément, le premier objectif de cette étude était de vérifier le principe de la théorie dynamique de la coordination motrice qui stipule que l'ordre de la disparition des patrons préférentiels suit l'ordre inverse de leur stabilité respective (Kelso, 1995). Pour cela, un premier facteur additionnel par rapport à l'étude d'Athènes *et al.* (2004) a été manipulé : la vitesse de mouvement qui était soit spontanée, soit élevée. Le second objectif de l'étude était de tester l'effet de l'expertise en comparant la main dominante et la main non dominante. L'hypothèse testée était que la dynamique de coordination identifiée par Sallagoïty et collaborateurs (2004) résulte de l'interaction entre une dynamique de coordination disponible avant tout apprentissage et les contraintes imposées par la tâche d'écriture. Si la même dynamique est observée avec la main non dominante (n'ayant jamais pratiqué l'écriture) et la main dominante (experte en écriture), alors la dynamique quadristable de la graphomotricité serait indépendante de l'apprentissage de l'écriture. Un second facteur additionnel a donc été manipulé : la dominance, comparant la main droite et la main gauche chez des participants droitiers.

Les résultats pour les deux tâches de scanning ont été comparables. Nous illustrerons nos résultats uniquement sur l'analyse du scanning de la PR. Pour les deux tâches de scanning, les analyses de l'EC et de la DS ont confirmé la présence de quatre patrons de coordination préférentiels en condition « Main droite vitesse spontanée – RHS », à savoir à 0°, 45°, 120-135° et 180°, avec une différence notable de stabilité entre les patrons en phase et en antiphase, et les patrons à 45° et 120-135°. Que ce soit avec l'augmentation de la vitesse d'exécution ou l'utilisation du membre non dominant, les analyses de l'EC ont révélé d'une part la disparition du patron préférentiel le moins stable à 120-135° et d'autre part le déplacement du patron préférentiel de 45° à 30° (cf. Figure 26). En accord avec les prédictions de l'approche dynamique de coordination motrice (Kelso, 1995), l'augmentation de contraintes induit la disparition du patron préférentiel le moins stable (120-135°) et a délocalisé le second patron le moins stable en faveur du patron le plus stable.

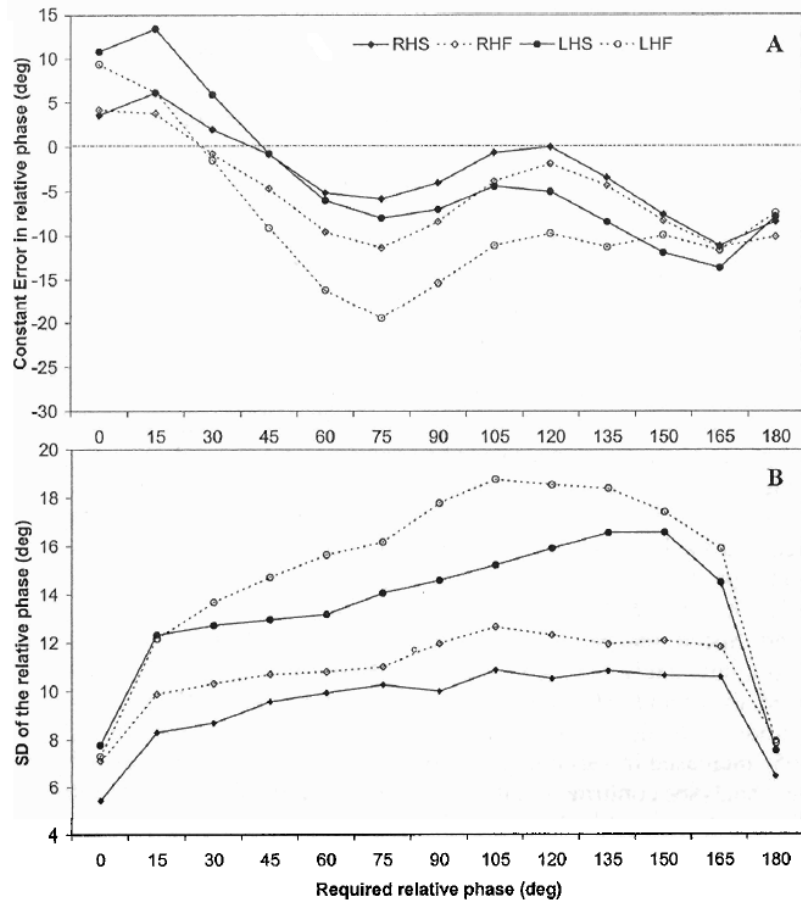


Figure 26 : Scanning de la PR. En A, EC en fonction des PR requises en condition « Main droite vitesse spontanée – RHS », « Main droite vitesse rapide – RHF », « Main gauche vitesse spontanée – LHS » et « Main gauche vitesse rapide – LHF ». En B, Déviation Standard (DS) associée en fonction des PR requises pour les mêmes conditions.

Selon Sallagoïty (2004), cette modification de la dynamique de coordination pourrait s'expliquer par une différence de fréquence propre des oscillateurs couplés. Cette interprétation serait appuyée par Teulings *et al.* (1989) qui ont observé les propriétés d'asymétrie des oscillateurs naturels (le poignet et la pince des doigts) dans la tâche d'écriture et par Athènes *et al.* (2004) qui ont observé des fréquences de mouvement différents entre 0° et 180° dans le scanning de l'AR. Concernant plus précisément l'effet de la dominance, Sallagoïty *et al.* (2004) ont également émis l'hypothèse que la dynamique tristable pourrait être dépendante des propriétés biomécaniques des effecteurs et la dynamique quadristable de la main droite refléterait la dynamique propre de l'écriture. Cependant, cette hypothèse nécessiterait une validation empirique en comparant des individus ayant une certaine expérience dans l'écriture manuscrite à des individus novices, comme par exemple en comparant une population occidentale et orientale.

2.4. Problématique – Dynamique de coordination graphomotrice chez l'adulte

Malgré une large variété de réalisations et de l'apparente complexité qui résulte de la coordination des très nombreuses composantes impliquées dans l'activité graphique, une propriété fondamentale de l'écriture est l'invariance, c'est-à-dire la persistance d'un nombre restreint de régularités spatio-temporelles. La théorie dynamique de la coordination permet de comprendre le glissement d'intérêt théorique du concept d'invariance vers le concept de stabilité. Ce concept a permis 1) d'observer la formation de tracés préférentiels selon les patrons de coordination préférentiels sous-jacents (Athènes *et al.*, 2004) et 2) d'expliquer le changement de ces tracés préférentiels selon la disparition ou le déplacement d'un ou de plusieurs patrons de coordination préférentiels en fonction de l'augmentation de contraintes (Sallagoïty *et al.*, 2004).

L'étude d'Athènes *et al.* (2004) a révélé que chez l'adulte, le couplage non-linéaire de deux oscillateurs orthogonaux amène à la reproduction de quatre patrons de coordination préférentiels : 0° , 45° , $120-135^\circ$ et 180° . Ces patrons ont comme propriété d'être reproduits avec une plus grande précision, une plus grande stabilité (notamment 0° puis 180°) et de biaiser la reproduction de formes voisines donc d'être attractives (notamment 45° et $120-135^\circ$). Toutes les mesures de stabilité ont révélé que les patrons de coordination en-phase et antiphase (0° et 180°) étaient toujours les plus stables, suivi du patron 45° , suivi lui-même du patron 135° . D'un point de vue géométrique, la méthode de scanning (voir chapitre II pour des détails) de 0° à 180° par pas de 15° correspond à la manipulation de sept excentricités (Σ) dans quatre orientations. Pour les deux scannings (de la PR et de l'AR), les patrons de coordination préférentiels correspondent à deux excentricités, à savoir, la reproduction de traits (PR à 0° et 180°) et d'ellipse d'excentricité intermédiaire (PR = 45° et 135°) dans les quatre orientations, avec une plus grande stabilité montrée pour la reproduction de traits que pour celle de l'ellipse intermédiaire. De manière générale, pour les deux scannings, les résultats sont très comparables, indépendamment de l'orientation (oblique et cardinale), indiquant la nature abstraite de la dynamique de coordination graphomotrice (Athènes *et al.*, 2004). De tels effets ont été interprétés dans le sens d'une indépendance de la dynamique de coordination par rapport aux effecteurs (Kelso & Zanone, 2002), ce qui rappellerait la fameuse propriété d'équivalence motrice (Wing, 2000).

Il reste que l'étude d'Athènes *et al.* (2004) n'a de fait considéré qu'un nombre fort limité d'orientations, ce qui est loin d'être suffisant pour comprendre l'ensemble de la coordination graphomotrice dans la formation de la trace écrite. Quid de l'ensemble des PR produites avec une amplitude autre que 1 ou de l'ensemble des AR produites avec une PR autre que 90° ? La manipulation de la PR combinée à celle de l'AR aboutit d'un point de vue géométrique à la manipulation de toutes les excentricités dans toutes les orientations possibles.

Ainsi, l'objectif de cette première expérience de thèse est d'établir le paysage dynamique complet de la graphomotricité en étudiant l'effet combiné de l'excentricité et de l'orientation, étudiés séparément et surtout partiellement jusqu'ici. D'un point de vue opérationnel, il s'agit de déterminer l'effet de l'orientation des formes à reproduire sur les patrons de coordination préférentiels repérés à certaines excentricités par Athènes et collaborateurs (2004). D'un point de vue plus conceptuel, nous envisageons un modèle de la dynamique de coordination graphomotrice à deux niveaux de contribution, correspondant probablement à des niveaux d'abstraction différents : un niveau dans lequel l'effet de l'excentricité des formes serait défini à partir du couplage entre deux oscillateurs orthogonaux indépendants de l'effecteur et un niveau dans lequel l'effet de l'orientation des formes serait défini à partir des contraintes liées à l'effecteur.

CHAPITRE III

- Expérience 1-

Dynamique de coordination graphomotrice chez l'adulte

3.1. Introduction – Effets de l'orientation et de l'excentricité sur la dynamique de coordination graphomotrice

Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur la façon dont un geste graphique simple tel que produire des ellipses de diverses excentricités et dans différentes orientations suit des principes de base régissant la formation de trajectoires 2D, à savoir ceux des mouvements périodiques coordonnés. Plus précisément, nous cherchons à évaluer comment l'orientation et l'excentricité de la trace à reproduire influencent la dynamique de coordination graphomotrice.

3.2. Méthode

3.2.1. Participants

Dix adultes droitiers, âgés entre 23 et 27 ans, ont accepté de participer à cette étude. Ils ne présentaient aucun trouble du langage ou moteur. L'étude a été conduite en accord avec la Déclaration d'Helsinki.

3.2.2. Tâche et procédure

La tâche consistait à reproduire différents traits et ellipses par-dessus le modèle qui apparaissait au centre d'une tablette graphique. Chaque modèle restait affiché à l'écran pour permettre sa reproduction sur 10 cycles avant l'apparition du modèle suivant. La Figure 27 présente toutes les formes obtenues par la manipulation de deux variables géométriques : l'excentricité (Σ) et l'orientation, exprimée selon le cadran horaire.

Afin de bien comprendre ce qu'est l'excentricité d'une ellipse, rappelons-en la définition mathématique. Une ellipse est une courbe plane fermée obtenue par la projection d'un cercle sur un plan sécant ou par l'intersection d'un cône droit avec un plan non perpendiculaire à son axe. C'est une conique d'excentricité strictement comprise entre 0 et 1⁴. La construction d'ellipses peut s'effectuer à partir d'un espace euclidien de deux dimensions. Soient (d) une droite, F un point n'appartenant pas à (d), e un réel dans]0,1[. Soit P le plan affine déterminé par (d) et F . On appelle ellipse de droite directrice (d), de foyer F et d'excentricité e l'ensemble des points M du plan P vérifiant :

$$\frac{d(M,F)}{d(M,(d))} = e \quad 3.1$$

$d(M,F)$ mesure la distance du point M au point F et $d(M,(d)) = d(M,H)$ mesure celle de M à la droite (d).

Revenons à notre expérience. Sept excentricités variant de 0 à 1 et 12 orientations comprises entre 2h30 et 9h00 ont été manipulées. A cause de la non-linéarité de l'excentricité et pour une plus grande cohérence avec les études précédentes, nous avons considéré l'excentricité en termes de PR. La variation d'excentricité entre 1 et 0 correspond à la variation de PR entre 0° et 90°. La correspondance entre la PR et l'excentricité est présentée

⁴ Le cercle est considéré comme un cas particulier d'ellipse, avec une excentricité égale à 0 et le trait l'est également, avec une excentricité égale à 1.

sur la Figure 27. Toutes les formes présentées ne dépassaient pas un carré de 4 cm². Le sens de rotation, horaire (H) ou antihoraire (AH), était également contrôlé. Entre chaque apparition de modèle, un indice visuel indiquait au sujet le sens à produire. Tant que l'indice visuel était affiché, le participant pouvait faire une pause de quelques secondes s'il le désirait. Une fois qu'il était prêt et qu'il avait connaissance de l'indice visuel, le participant pressait une touche d'un clavier avec sa main gauche pour faire afficher le modèle à reproduire.

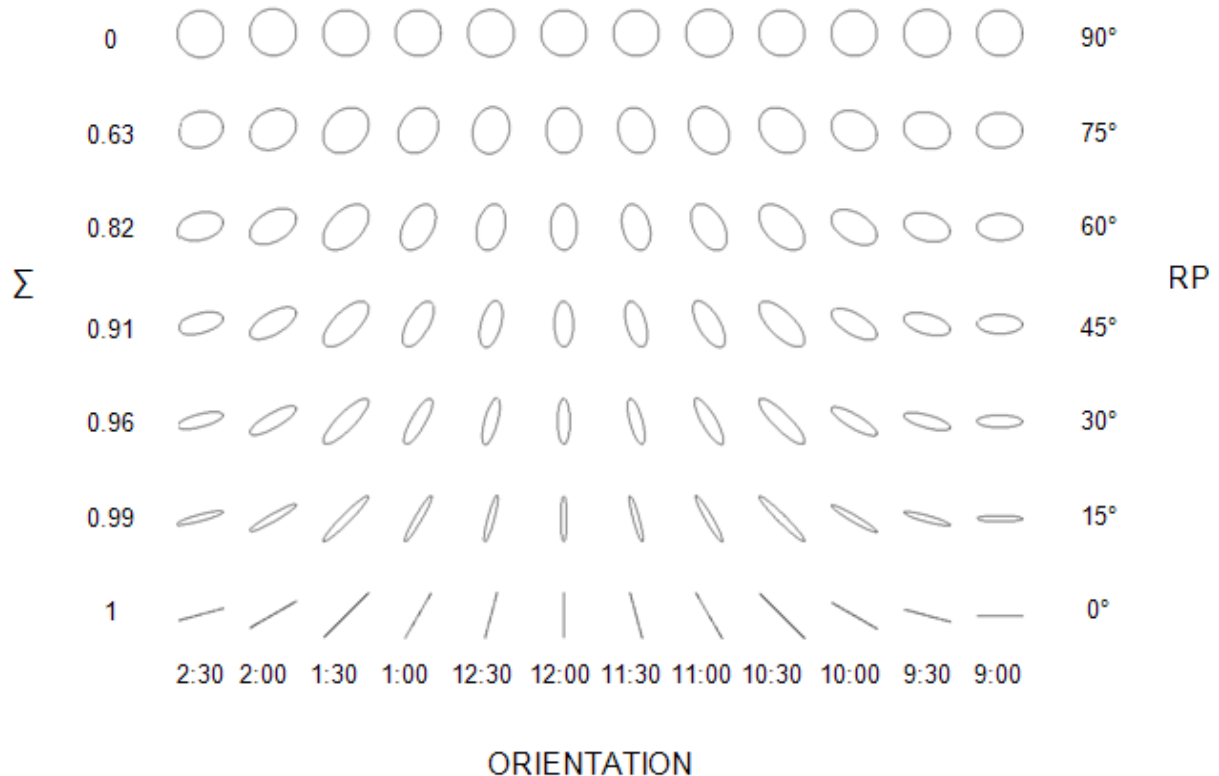


Figure 27 : Les 84 modèles obtenues par la manipulation de l'excentricité (ou PR) et de l'orientation (exprimée selon le cadran horaire).

Pour chaque participant, l'expérience était conduite sur une session de 90 minutes. Au début de la session, les participants étaient familiarisés avec le matériel et la tâche. Ils avaient à reproduire quatre formes différentes (un cercle, un trait et deux ellipses). Les instructions étaient d'être le plus précis possible à une vitesse constante spontanée d'écriture et de toujours maintenir le stylet en contact avec l'écran de la tablette durant l'essai. Les 84 formes apparaissaient deux fois, pour une reproduction dans les sens horaire et antihoraire. Les 168 essais résultants étaient effectués quatre fois dans un ordre aléatoire.

3.2.3. Matériel

Les modèles apparaissaient successivement au centre d'une tablette graphique (26.11×16.32 cm – Wacom Cintiq WX12, Wacom Corp. Ltd). Cette tablette était positionnée horizontalement sur une table. Les participants étaient assis confortablement sur une chaise ajustable en hauteur, leurs deux bras étaient placés sur la table. L'avant-bras droit était scotché sur la tablette de telle manière à être aligné avec l'axe y de la tablette. La position de la tablette était ajustée individuellement. Les coordonnées en x et en y étaient relevées à une fréquence de 100 Hz avec une précision spatiale de 0.5 mm. Alors que le modèle restait affiché à l'écran durant l'essai, la trace produite par le déplacement du stylet ne l'était pas.

3.2.4. Analyse de données

Le premier cycle de chaque condition a été considéré comme un cycle d'installation de la réponse et n'a pas été analysé. Deux types d'analyse ont été effectués.

D'un côté, une analyse géométrique a reconstruit l'ellipse théorique la plus proche de la forme produite par la méthode des moindres carrés proposée par Gander, Golub et Strebel (1994). La Figure suivante donne un exemple de l'ellipse théorique la plus proche obtenue par cette méthode sur un cycle produit pour une PR requise de 45° .

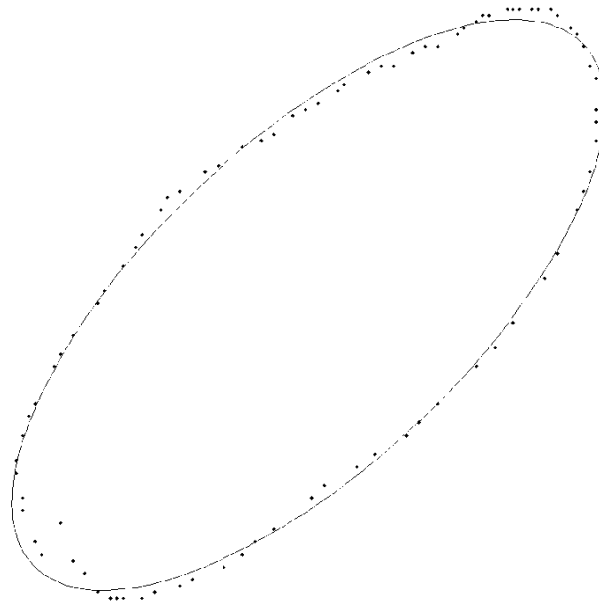


Figure 28 : Un exemple d'ellipse théorique (trait continu) obtenue par la méthode des moindres carrés (voir Gander et collaborateurs, 1994, pour des détails) à partir d'un cycle produit (traits en pointillés) pour une PR requise à 45° .

Cette méthode a permis la mesure de trois variables dépendantes : 1) l'erreur spatiale entre la forme produite et l'ellipse théorique la plus proche, 2) l'erreur d'excentricité entre l'ellipse théorique la plus proche de la forme produite et l'ellipse correspondant à la PR requise par la condition et, 3) l'erreur d'orientation entre l'ellipse théorique la plus proche de la forme produite et l'ellipse correspondant à la PR requise par la condition. Précisons que l'erreur spatiale correspond à la distance moyenne entre les coordonnées de la forme produite et les coordonnées de l'ellipse théorique la plus proche de la forme produite.

D'un autre côté, une analyse dite dynamique a déterminé la PR entre les oscillateurs orthogonaux abstraits. Cette PR a été calculée après une rotation appropriée des axes de la forme produite de telle manière à avoir l'orientation de la forme produite à 1h30. Cette réorientation permet d'annihiler les effets dus à des amplitudes relatives différentes de 1. La PR discrète a été calculée au maximum et au minimum de chaque cycle, puis moyennée pour chaque condition (voir chapitre II pour des détails). Ensuite, l'Erreur Constante EC (la différence entre la PR produite et la PR requise par la condition) et l'Erreur Absolue EA (la valeur absolue de l'EC) ont été calculées. La fréquence a également été déterminée en calculant l'inverse de la période de chaque cycle définie par les extrema des mouvements des deux oscillateurs x et y .

Comme la procédure de reconstruction d'ellipse n'a pas pu s'effectuer pour les traits et comme l'orientation est par définition nulle pour le cercle, nous avons effectué des analyses de variance (2 Rotations \times 12 Orientations \times 5 Excentricités) à mesures répétées sur l'erreur spatiale et l'erreur d'excentricité, une ANOVA (2 Rotations \times 12 Orientations \times 6 Excentricités) à mesures répétées sur l'erreur d'orientation et des ANOVA (2 Rotations \times 12 Orientations \times 6 Excentricités) à mesures répétées sur l'EC, l'EA et la fréquence. Une analyse plus fine des effets significatifs a été réalisée par des tests post-hoc de Newman-Keuls. Le seuil de significativité était fixé à $p < 0.05$.

3.3. Résultats

3.3.1. Analyse géométrique

3.3.1.1. Analyse de l'Erreur Spatiale

L'Erreur Spatiale entre la forme produite et l'ellipse théorique la plus proche détermine la précision de la trajectoire produite. Les résultats sur l'erreur Spatiale sont présentés dans la

Figure suivante. L'analyse de variance a révélé des effets principaux des facteurs Rotation, Orientation et Excentricité ($F(1,9) = 5.75, p < 0.05, F(11,99) = 24.56, p < 0.0001$ et $F(4,36) = 14.66, p < 0.0001$, respectivement) ainsi que des interactions significatives : Rotation \times Orientation, Rotation \times Excentricité et Orientation \times Excentricité ($F(11,99) = 2.06, p < 0.05, F(4,36) = 4.25, p < 0.01$ et $F(44,396) = 6.88, p < 0.0001$, respectivement).

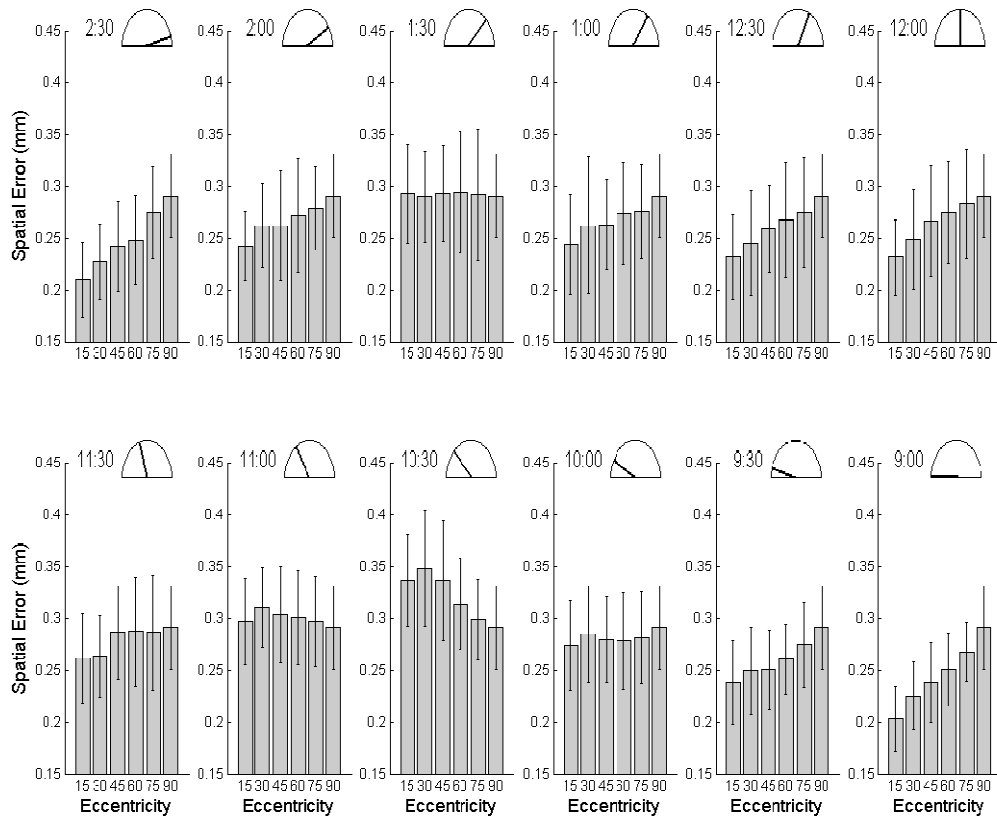


Figure 29 : Erreur Spatiale en fonction de l'excentricité mesurée en termes de PR (degrés) pour chaque orientation définie par le demi-disque au dessus des graphiques.

L'effet principal du sens de rotation indique que l'Erreur Spatiale était supérieure dans le sens horaire que dans le sens antihoraire (0.26 mm vs. 0.28 mm). L'analyse post-hoc de l'effet de l'Orientation indique que l'Erreur Spatiale était minimale pour les formes orientées à 2h30 et maximale pour les formes orientées à 10h30 et 11h00. L'Erreur Spatiale maximale à 10h30 nous amène à définir cette orientation comme non-préférentielle. L'analyse post-hoc de l'interaction Rotation \times Orientation a révélé que l'Erreur Spatiale était significativement supérieure dans le sens horaire seulement pour les orientations comprises entre 10h30 et 1h30. Enfin, l'analyse post-hoc de l'interaction Orientation \times Excentricité a révélé que

l’Erreur Spatiale augmente avec l’augmentation de l’excentricité (diminution de la PR) dans l’orientation à 10h30 alors qu’elle diminue avec l’excentricité pour les orientations à 2h30, 12h30 et 9h00.

3.3.1.2. Analyse de l’Erreur d’Excentricité

L’Erreur d’Excentricité correspond à la différence de largeur entre l’ellipse produite par le participant et l’ellipse requise par la condition. Elle est présentée dans la Figure 30. L’analyse de variance a révélé des effets principaux de l’Orientation et de l’Excentricité ($F(11,99) = 3.87, p < 0.001$ and $F(4,36) = 84.41, p < 0.0001$, respectivement) et une interaction Orientation \times Excentricité significative ($F(44,396) = 1.65, p < 0.01$).

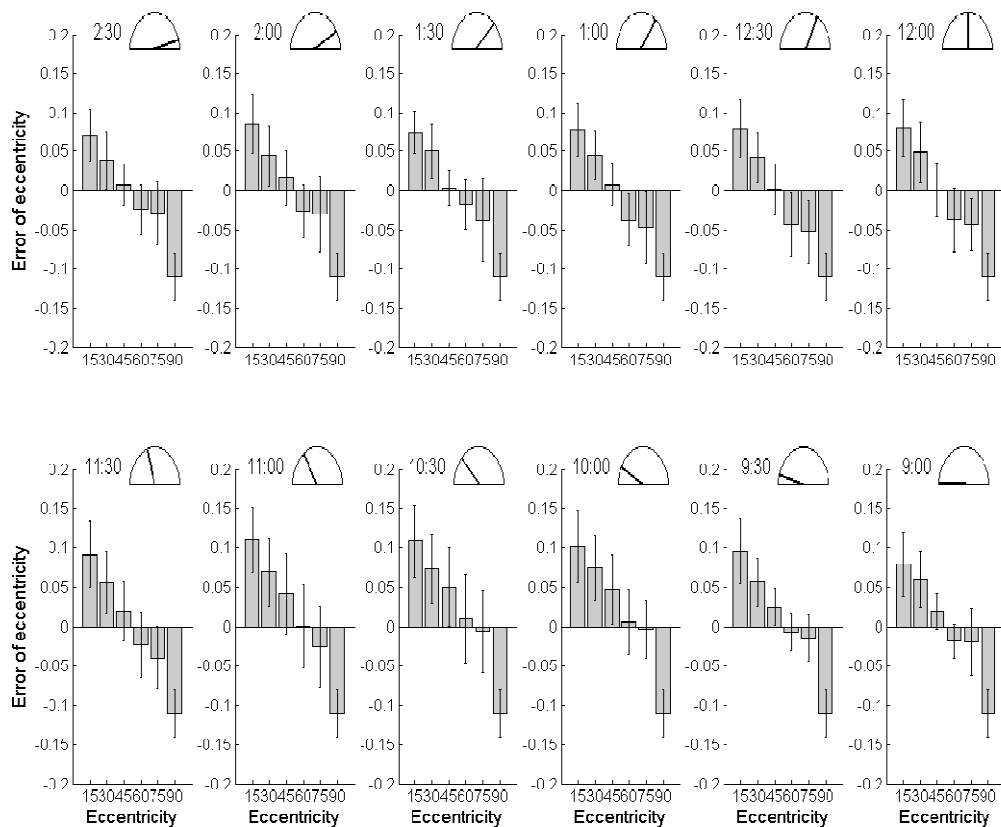


Figure 30 : Erreur d’Excentricité en fonction de l’excentricité mesurée en termes de PR (degrés) pour chaque orientation définie par le demi-disque au dessus des graphiques.

Concernant l’analyse post-hoc de l’interaction, l’Erreur d’Excentricité augmente pour les excentricités comprises entre 15° et 45° de PR et diminue pour les excentricités entre 60° et 75° dans les orientations comprises entre 9h00 et 11h30. Ainsi, quand l’orientation devient

non-préférentielle, l’erreur minimale d’excentricité se déplace de 45° (autour de 1h30) à 75° de PR (autour de 10h30).

3.3.1.3. Analyse de l’Erreur d’Orientation

L’Erreur d’Orientation correspond à la différence d’orientation entre l’ellipse produite par le participant et l’ellipse requise par la condition. De manière conventionnelle, elle est positive quand l’orientation de l’ellipse reproduite est décalée dans le sens trigonométrique par rapport à l’orientation de l’ellipse requise. L’erreur d’Orientation a pu être calculée pour les PR requises à 0° à partir de la reconstruction graphique d’un trait théorique le plus proche de l’ensemble des traits reproduits. L’Erreur d’Orientation est présentée dans la Figure 31. L’analyse de variance a révélé des effets principaux des facteurs Rotation, Orientation et Excentricité ($F(1,9) = 66.26, p < 0.0001, F(11,99) = 1.92, p < 0.05$ et $F(5,45) = 4.43, p < 0.01$, respectivement) ainsi que des interactions significatives : Rotation \times Excentricité et Orientation \times Excentricité ($F(5,45) = 45.56, p < 0.0001$ et $F(55,495) = 3.93, p < 0.0001$, respectivement).

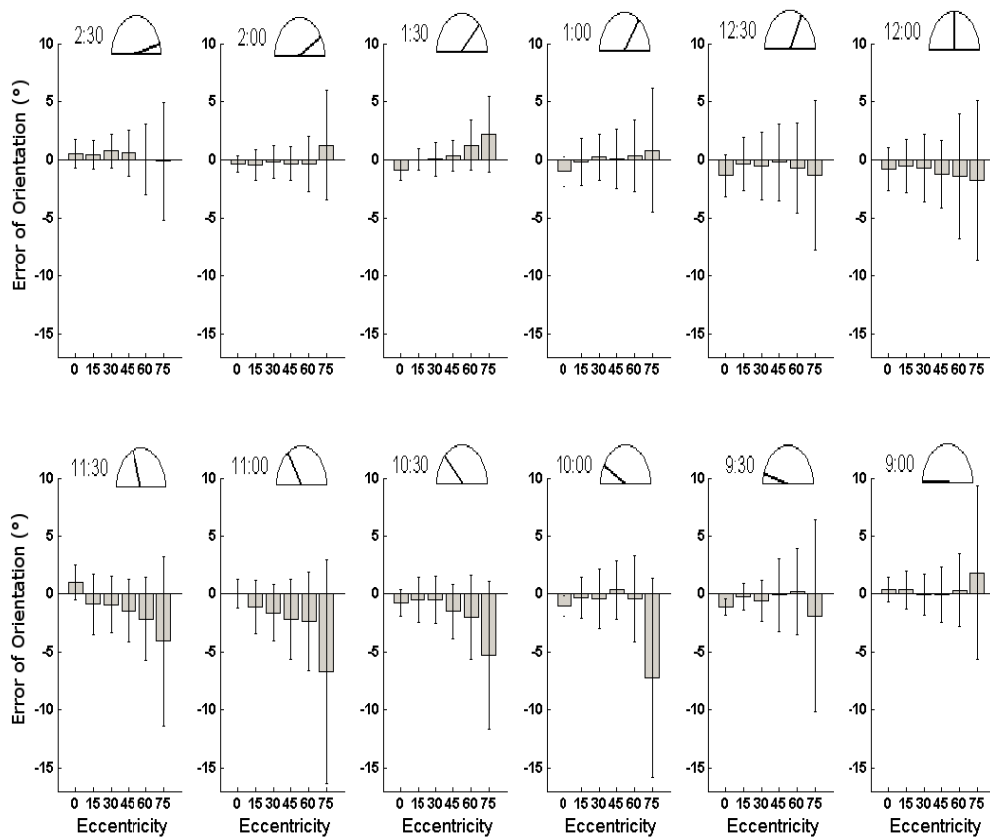


Figure 31 : Erreur d’Orientation en fonction de l’excentricité mesurée en termes de PR (degrés) pour chaque orientation définie par le demi-disque au dessus des graphiques.

L'analyse post-hoc de l'effet principal Rotation révèle que le signe de l'Erreur d'Orientation est différent selon le sens de rotation. Autrement dit, quand les formes sont reproduites dans le sens Horaire, les formes reproduites sont globalement décalées dans le sens trigonométrique par rapport aux modèles et inversement (0.76° vs. -2.12°). L'analyse post-hoc de l'interaction Orientation \times Excentricité révèle que l'erreur d'Orientation est significativement plus importante pour les ellipses d'excentricité 75° uniquement dans les orientations comprises entre 10h00 et 11h30. Dans ces orientations, les formes reproduites à 75° étaient décalées dans le sens horaire par rapport aux modèles.

3.3.2. Analyse dynamique

3.3.2.1. Analyse de l'Erreur Constante (EC)

L'EC de la PR offre une bonne estimation de la localisation des attracteurs sous-jacents à la dynamique de coordination. D'un côté, l'EC minimale reflète la précision de la performance pour un patron particulier, comme par exemple 45° . D'un autre côté, une surestimation de l'EC pour des valeurs de PR voisines inférieures (30°) et une sous-estimation de l'EC pour des valeurs de PR voisines supérieures (60°), représentées graphiquement par une pente négative, reflètent l'attraction de ce patron particulier. Les résultats sur l'EC sont présentés sur la Figure suivante. L'ANOVA a révélé des effets principaux de l'Orientation et de l'Excentricité ($F(11,99) = 2.31, p < 0.05$ et $F(5,45) = 65.44, p < 0.0001$, respectivement) et une interaction Orientation \times Excentricité significative ($F(55,495) = 1.85, p < 0.001$).

Concernant l'analyse post-hoc de l'interaction, pour les orientations comprises entre 9h00 et 11h30, l'EC augmente significativement pour les excentricités comprises entre 15° et 45° et diminue pour les excentricités comprises entre 60° et 75° . En résumé, de la même manière que pour l'Erreur d'Excentricité, l'orientation non-préférentielle décale l'EC minimale de 45° vers 75° .

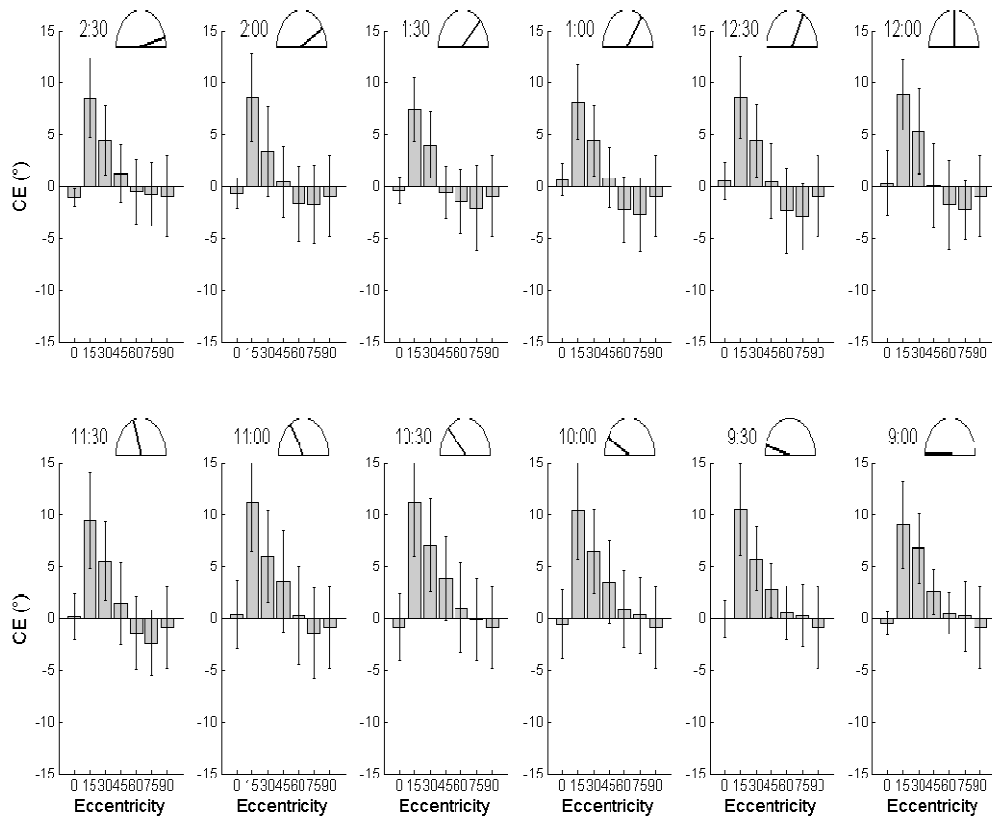


Figure 32 : Erreur Constante (CE) de la PR en fonction de l'excentricité mesurée en termes de PR (degrés) pour chaque orientation définie par le demi-disque au dessus des graphiques.

3.3.2.2. Analyse de la variabilité de la phase relative

La variabilité de la PR, mesurée par la déviation standard, est une variable classique pour déterminer la stabilité des patrons préférentiels identifiés par l'analyse de l'EC et de l'EA. Les résultats sur la variabilité de la PR sont présentés sur la Figure suivante. L'ANOVA a révélé des effets principaux de la Rotation, de l'Orientation et de l'Excentricité ($(F(1,9) = 6.27, p < 0.05, F(11,99) = 19.45, p < 0.0001$ et $F(4,36) = 38.57, p < 0.0001$, respectivement) et une interaction Orientation \times Excentricité significative ($F(55,495) = 7.63, p < 0.001$).

L'analyse de l'effet Rotation indique que la variabilité de la PR est supérieure en sens horaire par rapport au sens antihoraire (6.19° vs. 6.01°). Les analyses post-hoc de l'interaction ont révélé que pour les orientations comprises entre 11h00 et 1h30, la variabilité de la PR était significativement inférieure pour le patron à 0° .

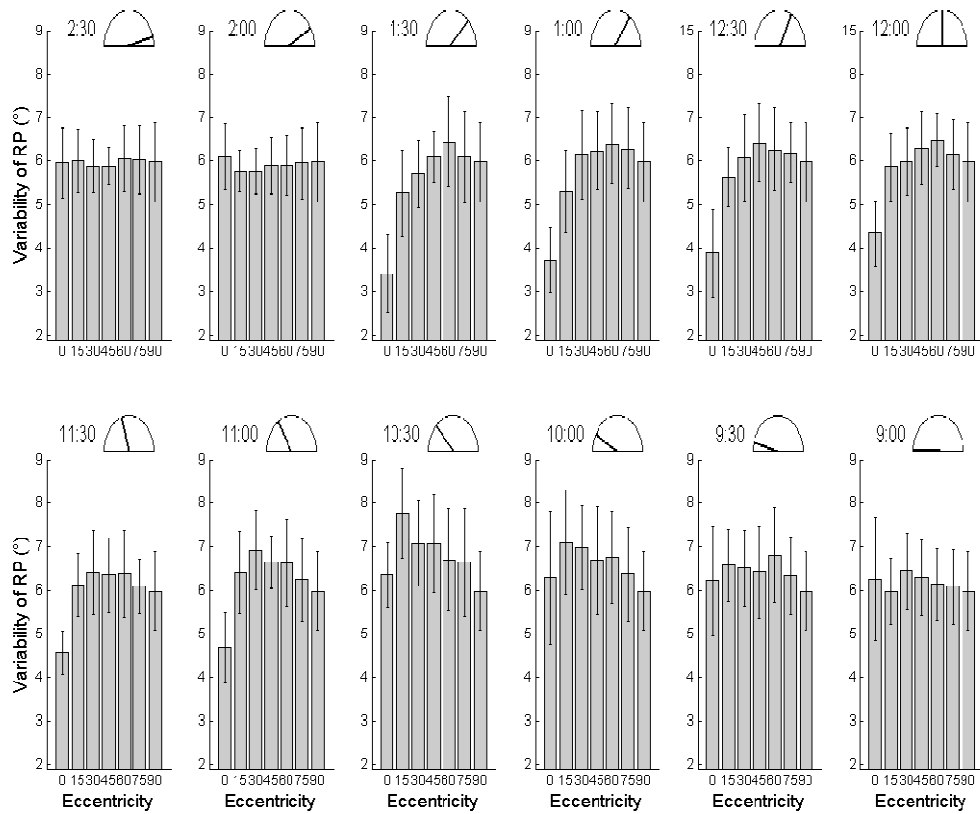


Figure 33 : Erreur Constante (EC) de la PR en fonction de l’excentricité mesurée en termes de PR (degrés) pour chaque orientation définie par le demi-disque au dessus des graphiques.

3.3.2.3. Analyse de l’Erreur Absolue (EA)

L’EA est une mesure de la précision. Elle permet de supprimer les sous et surestimations de la PR à proximité d’attracteurs. Les résultats sur l’EA sont présentés sur la Figure 34. L’ANOVA a révélé des effets principaux de l’Orientation et de l’Excentricité ($F(11,99) = 3.41, p < 0.001$ et $F(5,45) = 40.89, p < 0.0001$, respectivement) et une interaction Orientation \times Excentricité significative ($F(55,495) = 1.40, p < 0.05$).

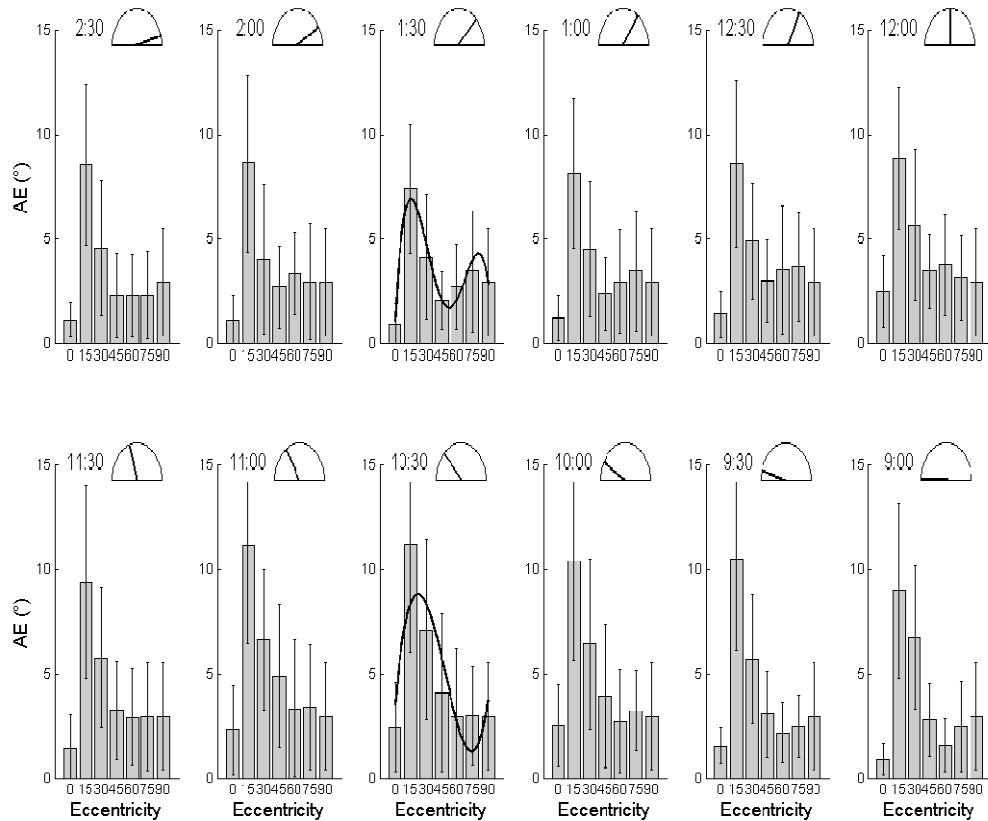


Figure 34 : Erreur Absolue (EA) de la PR en fonction de l'excentricité mesurée en termes de PR (degrés) pour chaque orientation définie par le demi-disque au dessus des graphiques.

3.3.2.4. Analyse de l'Erreur Constante et de l'Erreur Absolue aux deux orientations extrêmes

Dans le but de confirmer notre hypothèse que le patron préférentiel le moins stable à 45° serait plus affecté par l'orientation que le patron préférentiel le plus stable à 0°, nous avons effectué une analyse plus spécifique de l'EC et de l'EA aux deux orientations extrêmes, à savoir 10h30 pour l'orientation non préférentielle et 1h30 pour l'orientation préférentielle. A 1h30, les patrons reproduits avec le plus de précision sont 0°, 45° et 90°, le dernier n'étant pas affecté par l'orientation par définition. De plus, la pente négative à 45° atteste de sa propriété d'attraction, résultat déjà retrouvé dans l'étude d'Athènes et collaborateurs (2004). A 10h30, les performances les plus précises sont repérées autour de 75°. Concernant l'EA, l'évolution de l'EA dans l'orientation 1h30 prend la forme d'une courbe en « M » (dénotée par une régression polynomiale d'ordre 4 sur la Figure 34, $R^2=0.99$). Dans l'orientation 10h30, l'évolution de l'EA prend la forme d'une courbe en « N » (dénotée par une régression

polynomiale d’ordre 3 sur la Figure 34, $R^2=0.86$). L’EA minimale est localisée à 0° et 45° dans l’orientation 1h30 et à 0° et 75° dans l’orientation 10h30.

3.3.2.5. Analyse de la fréquence

La fréquence est un indice classique de la difficulté de la tâche motrice réalisée : de hautes fréquences de production manifestent une difficulté moindre de la tâche. Les résultats sur la fréquence sont présentés sur la Figure 35. L’ANOVA a révélé des effets principaux de l’Orientation et de l’Excentricité ($F(11,99) = 28.53, p < 0.0001$ et $F(5,45) = 6.79, p < 0.0001$, respectivement), des doubles interactions Rotation \times Orientation et Orientation \times Excentricité significatives ($F(11,99) = 5.59, p < 0.0001$ et $F(55,495) = 3.79, p < 0.0001$, respectivement) ainsi que la double interaction Rotation \times Orientation \times Excentricité ($F(55,495) = 2.11, p < 0.0001$).

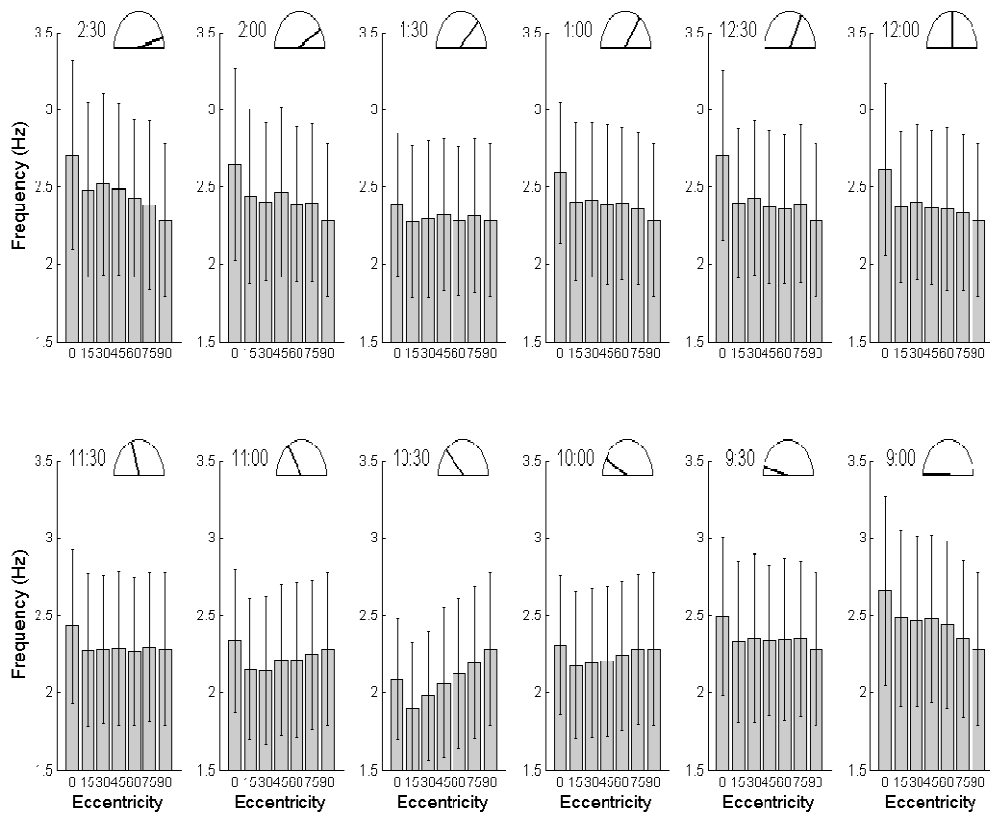


Figure 35 : Fréquence F en fonction de l’excentricité mesurée en termes de PR (degrés) pour chaque orientation définie par le demi-disque au dessus des graphiques.

Les analyses post-hoc de l'effet principal Orientation indiquent que les fréquences sont significativement plus élevées dans les orientations comprises entre 12h00 et 2h30 (entre 2.31Hz et 2.50Hz) que dans les orientations comprises entre 9h00 et 11h00 (entre 2.06Hz et 2.30Hz). Les analyses de l'interaction Rotation \times Orientation révèlent que la fréquence est significativement supérieure dans le sens antihoraire que dans le sens horaire uniquement dans les orientations comprises entre 10h30 et 12h00. Enfin, les analyses de l'interaction Orientation \times Excentricité révèlent que la fréquence dans le tracé de trait (PR à 0°) est globalement plus élevée. Cependant, elle décroît significativement pour les orientations comprises entre 10h00 et 11h30 jusqu'à devenir inférieure à celle de la reproduction de cercle (à 90°) à l'orientation non-préférentielle à 90°. Dans cette orientation, la fréquence diminue en fonction de l'augmentation de l'excentricité.

3.4. Discussion

3.4.1. Synthèse des principaux résultats

Nos résultats ont révélé que les formes dans les orientations comprises entre 12h00 et 2h30, dites préférentielles, sont globalement plus simples à reproduire : les erreurs de précision sont plus faibles et le mouvement plus rapide que pour les autres orientations dites non-préférentielles. Dans les orientations préférentielles, deux patrons stables ont été identifiés, un dans la reproduction des traits (0° de PR) et un dans la reproduction d'ellipse d'excentricité intermédiaire (45° de PR). Ce premier résultat confirme ceux d'Athènes et collaborateurs (2004). Dans les orientations non-préférentielles, le patron le plus stable à 0° est reproduit à une vitesse plus faible et une plus grande variabilité mais il reste cependant toujours le mieux reproduit par rapport aux autres formes. En revanche, le patron préférentiel le moins stable à 45° est déplacé à 75°-90°. Ce déplacement révélerait une tendance à reproduire des formes proches du cercle plutôt qu'une ellipse quand l'orientation devient non-préférentielle. La dynamique de coordination sous-jacente est différente dans les orientations non-préférentielles, de telle manière que le patron préférentiel correspondant à la production d'ellipses d'excentricité préférentielle est décalé vers un patron plus proche de la production de cercles. Enfin, concernant le sens de rotation, notons qu'il n'avait un effet que sur l'erreur spatiale et la fréquence. Cet effet confirmait les préférences reconnues de tracer des formes dans le sens antihoraire chez les droitiers (Blau, 1977 ; Van Sommers, 1984).

Nos résultats sont en continuité avec ceux présents dans la littérature. Dounskaïa et collègues (2000) ont montré que la production de cercles à vitesse maximale est biaisée vers la production d'ellipses dans l'orientation préférentielle. Cette diminution de la PR a été interprétée par ces auteurs en termes de contraintes biomécaniques imposées sur le système « poignet-doigts ». Nos résultats montrent un phénomène opposé à vitesse spontanée pour les orientations non-préférentielles, c'est-à-dire une tendance à produire des formes plus arrondies. Dans l'orientation non-préférentielle, le patron de coordination à 0° est plus précis que le patron à 90° qui lui-même est plus précis que le patron à 45°. A un niveau plus conceptuel, notre étude apporte un nouvel éclairage sur l'influence de l'orientation sur l'excentricité. Agissant comme une contrainte liée au couplage entre le poignet et les doigts (contribution neuro-musculo-squelettique de « bas niveau »), l'orientation affecterait les patrons de coordination préférentiels dans certaines excentricités (contribution de « haut niveau »).

3.4.2. Validation de l'hypothèse théorique

Le déplacement progressif du patron préférentiel de 45° vers 90° quand l'orientation devient non préférentielle nous amène à confirmer l'hypothèse de considérer l'orientation des formes comme une contrainte liée au système poignet/doigts et l'excentricité comme la variable collective défini par la variation de la PR entre 0° et 90° entre deux oscillateurs orthogonaux abstraits, c'est-à-dire indépendants du système poignet/doigts. Ce modèle prend en considération l'effet de l'orientation des tracés à produire tout en considérant la certaine indépendance de la dynamique de coordination par rapport aux effecteurs (Kelso & Zanone, 2002), rappelant la propriété d'équivalence motrice de la graphomotricité et de l'écriture en particulier (Wing, 2000). Cette expérience confirme le glissement d'intérêt du concept d'invariance vers le concept de stabilité en intégrant les contraintes et les préférences d'écriture liées à l'effecteur ou à l'environnement.

3.4.3. Les patrons graphomoteurs préférentiels peuvent-ils être considérés comme des attracteurs ?

En accord avec les principes de l'approche dynamique appliquée à la motricité humaine (Kelso, 1995, 2009 ; Schöner & Kelso, 1988a), un attracteur dans une tâche graphique serait défini par (1) la précision du patron graphique produit déterminée par l'EA minimale, (2) la stabilité analysée par la variabilité de la PR produite, et (3) le biais systématique autour de l'attracteur caractérisé par une pente négative de l'EC. Dans notre étude, aucun des patrons

préférentiels localisés à 0° et entre 45° et 75° selon l'effet de l'orientation ne révèle les trois propriétés simultanément. Concernant le patron préférentiel à 0°, il présente les propriétés d'être à la fois le mieux reproduit en termes de précision et le plus stable par rapport aux autres patrons. Cependant, il n'attire pas la production du patron le plus proche à 15°. Au contraire, l'EC indique que la PR produite à 15° tend vers 30° plutôt que vers 0°, ce qui signifie que 0° serait plutôt un répulseur qu'un attracteur. Comme nous l'avons déjà précisé au chapitre précédent, ce phénomène a déjà été observé et discuté par Zanone et Kelso (1992) dans une tâche de scanning dans la coordination bimanuelle et peut s'expliquer par les propriétés perceptives de discrimination visuelle de ces formes (Wamain *et al.*, 2009), alors qu'ils sont attractifs sur le plan moteur car stables. Concernant le patron préférentiel localisé entre 45° et 75°, il présente la double caractéristique d'être reproduit précisément et d'attirer la production des formes voisines. Cependant, ce patron préférentiel n'est pas produit avec une plus grande stabilité que tous les autres patrons. Cela expliquerait la variation de sa localisation (entre 45° et 75°) en fonction de l'orientation alors que le patron le plus stable à 0° n'est pas déplacé.

3.4.4. Comment expliquer l'orientation préférentielle autour de 1h30 chez des adultes droitiers ?

Il s'agit ici de savoir si cette orientation préférentielle résulte de contraintes liées à l'effecteur ou bien de l'expertise en écriture cursive qui tend chez les occidentaux à pencher notre écriture dans cette orientation. Trois arguments peuvent être apportés comme éléments de réponse : (1) la comparaison entre main droite et main gauche, (2) la comparaison de sujets ayant différents systèmes d'écriture, et (3) l'analyse de l'évolution de l'écriture. Concernant le premier point, Sallagoity et collègues (2004) ont comparé la qualité d'écriture de ces mêmes formes elliptiques produites avec la main non-dominante (la main gauche) et la main dominante chez des sujets droitiers. Ces auteurs ont révélé que c'est l'orientation correspondant à la coordination en phase qui est préférentielle, c'est-à-dire 1h30 pour les formes tracées avec la main droite et 10h30 pour les formes tracées avec la main gauche. Concernant le second point, Van Sommers (1984) a comparé différents systèmes d'écriture (arabe, chinoise, anglaise etc.) et a montré que l'orientation préférentielle à 1h30 ne dépend pas des différences culturelles d'écriture. Enfin, concernant le troisième point, Irigoien (1990) a décrit l'évolution des lettres capitales de l'ancien grec à l'écriture cursive selon la tendance à simplifier la trace à produire par la diminution du nombre de traits faciles à tracer et la tendance à différencier les lettres pour être lisibles. En résumé, la littérature soutient l'idée

que les diverses contraintes agissant sur l'exécution de mouvement et contribuant à la dynamique de coordination déterminent l'orientation préférentielle de l'écriture plutôt que l'inverse.

3.4.5. L'hypothèse d'un couplage d'oscillateurs non orthogonaux est-elle plausible ?

Certains chercheurs ont questionné la correspondance entre les composantes naturelles du mouvement d'écriture et les déplacements spatiaux du stylo, l'idée étant que les déplacements verticaux de la pointe du stylo seraient générés par les mouvements de flexion-extension des doigts alors que les déplacements horizontaux du stylo seraient générés par les mouvements d'abduction-adduction du poignet. Par exemple, Dooijes (1983) et Dounskaïa *et al.* (2000) ont comparé les traces produites par les mouvements de flexion-extension des doigts seulement et d'abduction-adduction du poignet seulement. Ces études ont montré que ces composantes naturelles étaient toujours obliques par rapport à un repère cartésien et que l'angle entre les deux composantes biomécaniques était en moyenne de 70° et non 90° comme supposé par la correspondance.

Cette différence n'est pas sans conséquence. Le couplage entre ces deux oscillateurs non orthogonaux produit des formes elliptiques qui, d'un point de vue géométrique, ne sont pas symétriques par rapport à l'axe des ordonnées (cf. Figure suivante).

Formes produites	
PR	0° 15° 30° 45° 60° 75° 90° 105° 120° 135° 150° 165° 180°
Formes produites	
PR	0° 15° 30° 45° 60° 75° 90° 105° 120° 135° 150° 165° 180°

Figure 36 : Correspondance entre les formes produites (en noir) et la PR entre deux oscillateurs orthogonaux (en rouge sur la ligne du haut) et entre deux oscillateurs d'angle d'intersection 70° (en rouge sur la ligne du bas).

Comme nous pouvons l'observer, le couplage d'oscillateurs entre 90° et 180° amène à la production de formes plus arrondies qu'entre 0° et 90°. La tendance à produire une forme plus arrondie quand l'orientation des formes est vers 10h30 pourrait être formalisée par une modélisation entre deux oscillateurs non orthogonaux. Ainsi, il y aurait alors une symétrie dans le paysage dynamique, avec quatre patrons préférentiels repérés à 0°, 45°, 135° et 180°.

Ce principe de symétrie résulterait d'un phénomène de transfert observé lors de protocoles d'apprentissage dans d'autres types de coordination (e.g., bimanuelle dans Zanone & Kelso, 1997; Kelso & Zanone, 2002). Cette hypothèse confirmerait que la coordination graphomotrice dépend du couplage non linéaire entre deux oscillateurs et non de l'excentricité des formes à produire.

Cependant, la principale limite de cette hypothèse est qu'elle ne peut pas expliquer la dynamique de coordination observée dans les autres orientations comme par exemple l'orientation à 11h00. Seul notre modèle de couplage entre deux oscillateurs orthogonaux abstraits permet de prendre en considération l'effet de l'orientation des trajectoires d'écriture à produire en considérant la certaine indépendance de la dynamique de coordination par rapport aux effecteurs.

3.5. Conclusion

Cette expérience valide la pertinence empirique et conceptuelle de la phase relative pour caractériser les mouvements d'écriture. Premièrement, l'analyse combinée de l'EC et de l'EA permet la localisation de patron de coordination préférentiel. La phase relative reflète l'état de coordination des effecteurs qui amène à la production d'un tracé graphique. Autrement dit, elle reflète directement les processus coordinatifs à la base de la génération de la trajectoire. Deuxièmement, la phase relative est une variable fiable pour renseigner sur l'excentricité de la trajectoire produite, au-delà de l'argument que cette dernière est un paramètre non linéaire. Notre (hypo)thèse que la phase relative est au cœur des processus de génération de formes graphiques simples questionne la signification de la valeur de la puissance $2/3$ (Lacquaniti *et al.* 1983; Viviani & Terzuolo, 1982). Lacquaniti et collaborateurs (1983) ont eux-mêmes constaté que des calculs triviaux des vitesses tangentielles et des courbures de trajectoires produites par la combinaison de deux oscillateurs harmoniques orthogonaux respectent la loi puissance $2/3$. Autrement dit, cette valeur de puissance serait, pour reprendre leurs termes, une « identité mathématique » résultant d'une combinaison entre deux oscillations orthogonales (Lacquaniti *et al.*, 1983, p. 129). Ainsi, les mouvements biologiques dans la production d'ellipses pourraient s'expliquer par la nature oscillatoire des composantes couplées du mouvement.

3.6. Perspectives – Comment s'acquiert la dynamique de coordination graphomotrice durant l'enfance ?

La propriété singulière de la coordination graphomotrice d'être quadristable peut être vue comme étant liée à la nécessité de produire un certain nombre de formes différentes et différenciables, telles qu'imposées par l'écriture conventionnelle. Cette dernière ne peut pas se contenter de la seule synchronisation des deux oscillateurs en phase et en antiphase qui produirait uniquement des traits. Théoriquement, cette dynamique de coordination pourrait provenir de l'interaction entre les contraintes de la tâche (les formes requises) et la dynamique oscillatoire bistable disponible avant tout apprentissage (Schöner & Kelso, 1988b et 1988c, pour une revue théorique). Dans cette perspective, des études sur l'apprentissage au niveau de la coordination bimanuelle ont montré que des patrons originellement instables pouvaient être stabilisés par la pratique (Fink, Kelso, Jirsa & de Guzman, 2000 ; Smethurst & Carson, 2001) et être intégrés de façon permanente à la dynamique de coordination initiale (Zanone & Kelso, 1992). De plus, d'autres études ont montré que les patrons à 45° et 135° résultent d'un apprentissage (Atchy-Dalama, Peper, Zanone, & Beek, 2005; Kelso, 1995; Tallet, Kostrubiec, & Zanone, 2008; Zanone & Kelso, 1992; Zanone & Kelso, 1997). La dynamique de coordination multistable de la graphomotricité peut alors être envisagée comme le résultat d'une longue pratique de l'écriture, permettant aux individus de stabiliser de nouveaux patrons de coordination imposés par la production de tracés d'orientations et d'excentricités variées. L'analyse de la dynamique de coordination chez l'enfant en plein apprentissage de l'écriture apportera un éclairage sur la présence ou l'apparition des patrons préférentiels autre que 0° et 180° dans la coordination graphomotrice.

CHAPITRE IV

- Expérience 2 -

Dynamique de coordination graphomotrice chez l'enfant

4.1. Introduction

4.1.1. Etude ontogénétique de l'activité graphique et de l'écriture

Ecrire est à la fois l'aboutissement d'un processus de développement complexe et le fruit d'un apprentissage. Selon Zesiger (1995), l'apprentissage de l'écriture consiste à acquérir une représentation visuelle de la lettre qui guide sa production et une représentation motrice spécifique à chaque lettre. La capacité à écrire figure parmi les apprentissages moteurs les plus longs et contraignants : plusieurs années sont nécessaires pour maîtriser cette habileté à la fois cognitive et perceptivo-motrice. La Figure suivante résume l'évolution ontogénétique de l'écriture de l'enfance à l'âge adulte.

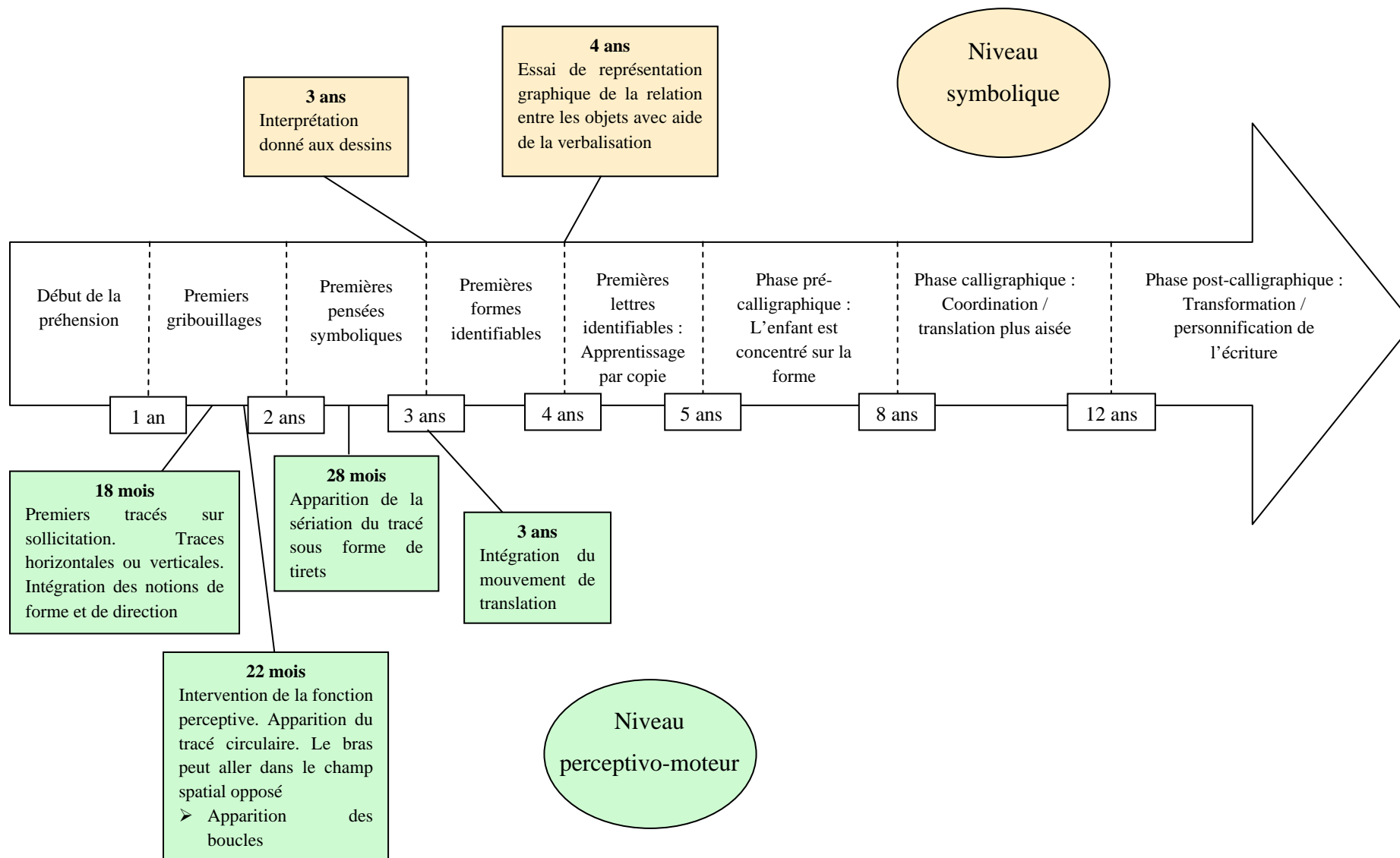


Figure 37 : Ontogénèse de l'écriture.

Au début, c'est avec le dessin que l'enfant va faire ses premières expériences graphiques et ses productions vont évoluer au fil de son développement ontogénétique (Du Pasquier-Grall, 1990). Par la suite, l'enfant va appréhender les premières formes d'écriture en les assimilant à des formes géométriques particulières. Adi-Japha et Freeman (2001) postulent que les enfants âgés de 4 ans ne différencient pas le dessin de l'écriture. Ils font l'hypothèse que les mêmes zones cérébrales sont stimulées pour ces deux modes d'expression écrite. Les relations étroites entre dessin et écriture ont également été mises en évidence par l'application de la grammaire de l'action, élaborée à propos du dessin dans le domaine de la production écrite (Goodnow et Levine, 1973). D'un point de vue scolaire, l'enfant appréhende l'écriture dès l'école maternelle à partir de l'acquisition de compétences graphiques telles que tracer des traits verticaux et horizontaux, tracer des ronds et des courbes. Il apprend également à écrire son nom et à recopier quelques mots entre 5 et 6 ans.

L'écriture manuscrite ayant des contraintes différentes de celles du dessin, comme la progression gauche/droite, des préférences dans la manière d'écrire et de dessiner vont évoluer. Par exemple, le sens de production des boucles et cercles est préférentiellement horaire pour les enfants préscolaires, il devient ensuite antihoraire pour les enfants plus âgés (Meulenbroek, Vinter et Mounoud, 1993 ; Zesiger, 1995). Ces modifications s'appliqueraient en retour au tracé des dessins (Van Sommers, 1984). L'évolution de l'écriture avec l'âge concerne à la fois les aspects statiques et cinématiques de l'écriture. Selon Gentaz (2009), les principales modifications dans la production motrice de l'écriture s'effectueraient entre 7 et 10 ans. Cette amélioration de l'écriture se ferait conjointement au développement de la motricité fine qui permet d'écrire des lettres et des mots mieux alignées et de plus petites tailles, ainsi que des liens entre les lettres plus fluides.

D'un point de vue perceptif, la lisibilité de l'écriture est considérée depuis longtemps comme un des principaux facteurs dans l'évaluation de cette habileté (Harris et Rarick, 1959; Sovik, 1974). Ziviani et Elkins (1986) considèrent que la lisibilité est dépendante de plusieurs facteurs tels que la formation des lettres, l'inclinaison, la taille, l'alignement et l'espacement entre les lettres. Au cours de l'apprentissage, il semble que la lisibilité évolue par paliers, avec un léger déclin vers 9-10 ans, pour se stabiliser vers 15 ans (Thomassen et Teulings, 1983 ; Ziviani, 1984).

4.1.2. Évaluation de l'écriture chez l'enfant

La lisibilité de l'écriture dépend de la faible variabilité de la trace produite, c'est-à-dire de la persistance de régularités spatio-temporelles indépendantes du contexte dans lequel l'enfant

écrit. Qu'il soit grand ou petit, incliné ou pas, chaque caractère doit maintenir certaines caractéristiques invariantes pour être reconnu. De nombreuses études ont testé ces caractéristiques invariantes dans des conditions très variées d'écriture (Van Galen, 1980 ; Viviani & Terzuolo, 1982) et ont proposé des principes descriptifs sur la manière dont elles se développent durant l'enfance (Chartrel & Vinter, 2008 ; Graham, Harris & Fink, 2000 ; Karlsdottir & Stefansson, 2002 ; Rosenblum & Livneh-Zirinsky, 2008 ; Rosenblum, Aloni & Josman, 2010 ; Velay *et al.*, 2009 ; Viviani & Schneider, 1991). D'autres études ont établi des irrégularités dans les paramètres du mouvement d'écriture à partir d'indices spatiaux (e.g. dans les espacements entre les lettres et les mots, l'inclinaison de la ligne, voir Rosenblum, Weiss, & Parush, 2003), cinématiques (e.g. le nombre de pics de vitesse ou d'accélération, voir Mergl, Tigges, Schröter, Möller, & Hegerl, 1999; Kharraz-Tavakol, Eggert, Mai & Straube, 2000, respectivement) ou cinétiques (e.g. la pression du stylo, voir Chang & Yu, 2009).

D'un point de vue sociétal, la maîtrise des habiletés motrices mises en jeu dans l'acte d'écrire, à savoir la réalisation des mouvements aboutissant à la formation des lettres, est un facteur de réussite scolaire. Fayol et Miret (2005) ont montré que des enfants ayant des difficultés à contrôler les mouvements graphiques sont moins performants que d'autres dans une épreuve de dictée. L'évaluation de l'écriture de l'enfant s'effectue en France par le psychomotricien, le professeur des écoles, la psychologue scolaire ou l'orthophoniste. L'outil de mesure⁵ qui fait encore actuellement référence est le BHK, développé par Charles et collaborateurs en 2003. S'inspirant de l'échelle de dysgraphie d'Ajuriaguerra (Ajuriaguerra *et al.*, 1964) et d'une méthode d'évaluation de Hamstra-Bletz et collaborateurs (1987), le BHK consiste à analyser l'écriture produite par un enfant à la suite d'un recopiage d'un texte durant cinq minutes. Au-delà de la vitesse moyenne d'écriture, seul le premier paragraphe du texte produit est analysé selon 13 items cotés, comme par exemple la taille (la grandeur) de l'écriture, l'inclinaison de la marge vers la droite au fur et à mesure de l'avancée du texte, la linéarité des lignes, l'espacement entre les mots, la distorsion des lettres etc. La notation de chacun de ces 13 critères aboutit à une note globale qui, à partir d'un seuil, détecte une pathologie de l'écriture appelée généralement la dysgraphie. Postel définit la dysgraphie comme « une atteinte de la fonction graphique scripturale se manifestant au niveau des

⁵ De nombreux tests standardisés ont été proposés pour évaluer la qualité de l'écriture chez l'enfant. Les principaux retenus sont le test Scale of Children's Readiness In PrinTing (SCRIPT) (Weil & Cunningham-Amundson, 1994) pour les enfants d'âge préscolaire, le Children Handwriting Evaluation Scale (CHES) (Phelps & Stempel, 1988), l'Evaluation Tool of Children's Handwriting – Cursive (ETCH-C) (Amundson, 1995), ou le Minnesota Handwriting Test (Reisman, 1995) pour les enfants d'âge scolaire. Pour plus de détails, voir la synthèse de Kaiser (2009).

composantes spatiales de l'écriture, alors que les structures morphosyntaxiques ne sont pas touchées » (Postel, 1993, p. 192).

Les études réalisées auprès d'enfants présentant des troubles des apprentissages ont révélé pour une grande part d'entre eux des dysgraphies associées : entre 30 et 40% selon une étude non publiée citée dans Cratty & Goldman (1996) ou 67% selon celle de Waber et Bernstein (1994). L'existence d'une dysgraphie exempte de trouble du langage a également été reconnue. O'Hare et Brown (1989) estiment qu'environ la moitié des dysgraphiques présente un syndrome isolé. Ce trouble spécifique à la production de la trace écrite a été défini comme une agraphie pure et récemment reçu une validation empirique à un niveau neurologique par la série d'expériences en intracrânien de Roux et collaborateurs (Roux *et al.*, 2009; Roux, Draper, Köpfe & Démonet, 2010). Cherchant à déterminer les zones corticales impliquées dans le langage, ces auteurs ont montré l'importance d'une aire corticale, appelée « Graphemic/motor frontal area » ou l'aire d'Exner, dans la production du geste d'écriture. Cette zone serait spécifiquement impliquée dans la conversion du graphème au programme moteur correspondant. Savoir si cette zone est impliquée plus particulièrement dans les processus biomécaniques, cognitifs ou coordinatifs de l'écriture reste une question ouverte.

4.1.3. Approche cognitive de l'apprentissage de la graphomotricité

4.1.3.1. Une différence entre le fond et la forme

Rappelons qu'écrire, c'est produire une succession de formes symboliques conventionnelles pour former des mots. Paillard (1990) distingue deux types de contraintes : celles concernant l'aspect morphocinétique de l'écriture c'est-à-dire liées à la forme de la lettre de celles concernant l'aspect topocinétique de l'écriture c'est-à-dire relatives à l'agencement spatial des lettres. Les topocinèses chez l'adulte dépendraient d'un contrôle rétroactif du mouvement, sur la base d'informations principalement visuelles et tactilo-kinesthésiques, alors que les morphocinèses dépendraient d'un contrôle proactif du mouvement, sur la base des programmes moteurs mémorisés et automatisés. Chartrel et Vinter (2006) ont montré que l'apprentissage de ces programmes moteurs dédiés à la production de lettres est très progressive : les enfants de 10 ans n'ont toujours pas automatisé les mouvements d'écriture cursive adulte.

4.1.3.2. Le passage d'un contrôle visuel à un contrôle haptique

Les premières études centrées sur l'apprentissage moteur ont testé l'hypothèse qu'avec la pratique, les informations visuelles interviendraient de moins en moins dans le contrôle du mouvement qui dépendrait de plus en plus d'informations kinesthésiques (Fleishman & Rich, 1963; Schmidt, 1988). L'argument sous-jacent était qu'en début de pratique, le sujet ne dispose pas d'une référence « kinesthésique » du mouvement et le contrôlerait visuellement. Avec la pratique, ces informations kinesthésiques étaient alors mémorisées pour servir de référence dans l'exécution du geste et le contrôle visuel deviendrait alors minime. Pour tester cette hypothèse, Fleishman et Rich (1963) ont constitué quatre groupes de participants à partir des performances réalisés lors d'un test de sensibilité kinesthésique (une comparaison de différents poids) et lors d'un test d'orientation visuelle dans l'espace. Une fois ces tests effectués, la tâche expérimentale était une tâche de poursuite de cible en tournant deux manivelles. Les résultats de cette étude ont révélé que le groupe ayant de bonnes capacités visuelles a de meilleures performances en début d'apprentissage par rapport au groupe ayant de mauvaises capacités visuelles. Par contre, cette différence disparaît avec la pratique. De plus, le groupe ayant une bonne sensibilité kinesthésique n'a pas de meilleures performances que le groupe ayant une mauvaise sensibilité kinesthésique en début d'apprentissage mais cette différence apparaît en cours d'apprentissage. Ces résultats confirmeraient l'hypothèse que les informations visuelles sont privilégiées en début de pratique, puis sont délaissées au profit des informations kinesthésiques dans le contrôle de l'action motrice. Notons cependant que d'autres études initiées par Proteau (1991, Proteau, Marteniuk, Girouard & Dugas, 1987) ont montré que le contrôle du mouvement devient de plus en plus spécifique des informations dont l'individu dispose durant sa pratique. Dans une habileté visuo-manuelle telle que l'écriture, le sujet apprenant deviendrait donc de plus en plus dépendant des informations visuelles dont il dispose tout-au-long de son apprentissage.

Concernant l'écriture, Chartrel et Vinter (2006) ont montré que l'absence de feedback visuel a des effets plus importants chez les jeunes enfants que chez les enfants plus âgés et les adultes. Les yeux bandés, la durée des mouvements augmente et leur fluidité diminue et ce, de manière plus importante chez les jeunes enfants (8-9 ans). En absence de feedback visuel, les enfants auraient tendance à augmenter la prise en compte des informations kinesthésiques en augmentant la taille des lettres produites. Selon Gentaz (2009), ces feedbacks pourraient contribuer à l'élaboration des représentations internes du mouvement sur lesquelles s'appuient les enfants plus âgés et les adultes.

L'implication des feedbacks visuels dans l'écriture pose la question du lien étroit entre apprentissage de la lecture et de l'écriture. L'enfant apprend au début à tracer les lettres à partir de la perception visuelle d'un modèle et reconnaît visuellement la forme des lettres à partir des tracés qu'il effectue. L'idée que la mémorisation même de la lettre s'effectuerait par des processus communs à l'écriture et à la lecture a été étudiée par Longcamp et collaborateurs (2005). Ces auteurs ont comparé deux types d'apprentissage de lettres, en les écrivant ou en les faisant frapper au clavier, sur la qualité de leur reconnaissance visuelle. Les résultats ont révélé que pour les enfants les plus âgés, l'apprentissage des caractères par leur production manuscrite augmente plus les performances au test de reconnaissance que l'apprentissage au clavier. Ces résultats confirmeraient que les caractéristiques cinématiques de la trace en train de s'écrire sont prises en compte dans la mémorisation de lettres. Le mouvement de production de la lettre aiderait à sa reconnaissance visuelle.

4.1.3.3. Le passage d'un contrôle rétroactif à un contrôle proactif : vers une augmentation de la taille du programme moteur

Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, le contrôle du mouvement graphique peut être soit rétroactif c'est-à-dire ajusté en temps réel par des feedbacks sensori-moteurs, soit proactif quand le mouvement est trop rapide pour permettre une réaction (mouvements inférieurs à 100ms) (Zesiger, 1995 ; voir chapitre I pour plus de détails).

Préteur et Telleria-Jauregui (1986) ont analysé le nombre de lettres mémorisées (en comptant les regards portés sur le modèle) dans une tâche de copie chez des élèves en plein apprentissage de l'écriture. Les résultats ont montré qu'en début d'année de Cours Préparatoire (CP), les élèves recopient des morceaux de lettres, puis des lettres entières et, en fin d'année, des morceaux de mots (ou des mots entiers s'ils sont de petite taille). L'augmentation du nombre de lettres copiées sans modèle visuel a été interprétée comme le passage progressif d'un contrôle rétroactif à un contrôle proactif d'un mouvement. Notons cependant que l'absence de modèle dans la reproduction d'une phrase n'amène pas à l'absence de feedback résultant de la trace produite.

Van Galen (1991) ne prend pas en compte les feedbacks sensoriels dans son modèle, soutenant que « le contrôle afférent semble être naturel mais pas nécessaire » (p. 185, notre traduction). Ce postulat n'est pertinent que dans la mesure où l'écriture est automatisée. En début d'apprentissage de l'écriture, les mouvements graphiques sont hautement contrôlés grâce à des feedbacks visuels et kinesthésiques. Ensuite, les mouvements deviennent de plus en plus rapides et le mode de contrôle devient de plus en plus proactif. La qualité du

mouvement dépendrait alors de la qualité du programme moteur stocké en mémoire. Gentaz (2009) émet l'hypothèse que les changements cinématiques de la trace pourraient être la conséquence du passage d'un contrôle rétroactif à un contrôle proactif du geste graphique. A partir d'une analyse de la qualité de la trace produite par la détermination du SNA-ratio⁶ (« signal-to-noise amplitude ratio »), Meulenbroek et Van Galen (1986) ont montré que la consigne d'augmenter la vitesse induit une amélioration de la qualité de production en termes de fluidité chez des enfants de 6 à 9 ans. L'augmentation de vitesse empêchant les enfants de prendre en compte les informations visuelles en retour, elle induirait un mode de contrôle du mouvement plus proactif.

4.1.4. Développement moteur et apprentissage de la graphomotricité

4.1.4.1. Le développement de la motricité

Le développement de la réponse motrice chez le jeune enfant s'effectue de manière non uniforme et non continue : des périodes de progression rapide sont suivies de stagnations et de possibles régressions, chaque enfant évoluant à son rythme. Cependant, deux principales lois de développement sont repérables :

- La loi de progression céphalo-caudale qui stipule que la maturation procède par le contrôle de la musculature la plus proche du pôle céphalique à celui des membres inférieurs. Cette maturation est à l'origine de la construction de l'axe corporel.
- La loi de progression proximo-distale qui stipule que la maturation procède également par le contrôle progressif des plus grands muscles aux muscles plus petits servant aux mouvements plus minutieux. Le contrôle des segments proximaux du corps, tels que le tronc et les épaules, intervient avant celui des segments distaux comme la main.

L'activité motrice globale s'affine pour devenir de plus en plus élaborée et localisée. Elle se différencie alors à des niveaux musculaires de plus-en-plus petits.

4.1.4.2. Conséquence sur l'apprentissage de la graphomotricité

Ajuriaguerra et collaborateurs (1964) ont montré que l'apprentissage de l'écriture s'effectue par la maturation des coordinations motrices des articulations proximales et distales, ces

⁶ Le SNA-ratio résulte du rapport entre les composantes de la bande de fréquence correspondant au signal d'écriture (entre 0 et 5 Hz) et de la bande de fréquence correspondant au bruit provoqué par les fluctuations au sein du système moteur (entre 5 et 10 Hz).

dernières se développant de manière asynchrone. En début d'apprentissage de l'écriture cursive, l'enfant de 5-6 ans contrôle fortement son mouvement visuellement et réalise des mouvements lents, peu fluides et de grande amplitude. Par la suite, de par la maturation motrice, les tracés sont effectués de manière rapide et fluide (Meulenbroek & Van Galen, 1988).

A partir d'un modèle précédent (le modèle VITEWRITE) fondé sur les travaux de Bernstein (1967), Grossberg et Paine (2000) ont développé le modèle AVITEWRITE (Adaptative VITEWRITE) afin de rendre compte du processus d'apprentissage des mouvements complexes impliqués dans l'écriture manuscrite de lettres cursives. Ce modèle identifie des mouvements segmentés réalisés avec des profils de vitesses variés en début d'apprentissage. Il précise les voies neurologiques impliquées dans l'apprentissage des courbes de l'écriture (cf. Figure 38).

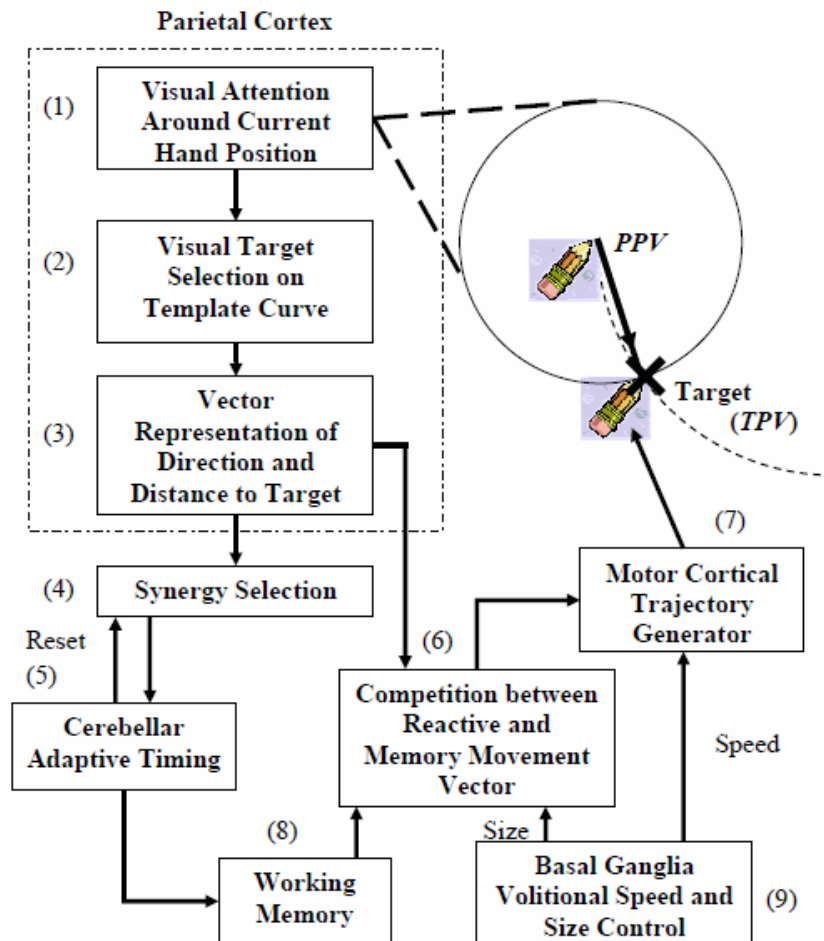


Figure 38 : Architecture du modèle AVEWRITE. Les nombres de parenthèses indiquent l'ordre de la discussion dans le texte. PPV : Vecteur Position Présent ; TPV : Vecteur Position Cible. (Tiré de Paine, Grossberg & Van Gemmert, 2004).

Au début du mouvement, l'attention visuelle (1) permet de positionner la main à un point donné pour le début de la courbe et d'évaluer la position cible (2) vers laquelle la main doit se déplacer. Une représentation de la distance et de la direction du mouvement à réaliser pour le déplacement de la main du point initial au point cible est programmée. Ces auteurs parlent de vecteur différentiel (3). Ce vecteur différentiel active les synergies musculaires appropriées pour activer un mouvement (4). Au même moment, un système d'adaptation de timing cérébelleux (5) stocke l'apprentissage du patron d'activation de synergies musculaires impliquées dans le mouvement. Le contrôle visuel intervient lorsque la mémoire identifie des erreurs. La mémoire motrice cérébelleuse est alors en compétition (6) pour le contrôle du mouvement avec les aires corticales qui guident les mouvements réactifs (7). Une mémoire de travail (8) stocke temporairement les commandes motrices qui leur permettent d'être exécutées à des vitesses amoindries puisque la vitesse et la taille de la trajectoire à générer sont volontairement contrôlées par les ganglions de la base (9). Lorsque les mouvements sont corrigés par la vision, une nouvelle mémorisation de l'activation des synergies musculaires est formée pour produire une courbe. Après plusieurs répétitions correctes de la courbe, les mouvements peuvent être réalisés sans erreur. Notons que la principale limite de ce modèle est qu'il ne précise pas comment passer de la maîtrise d'une courbe à l'autre, étape nécessaire ne serait-ce que pour écrire un mot.

4.1.5. Approche dynamique de l'apprentissage de la graphomotricité

L'approche dynamique de l'apprentissage moteur a été élaborée et développée par Kelso, Schöner, et Zanone (Kelso & Zanone, 2002 ; Schöner, 1989 ; Schöner & Kelso, 1988a, 1988b, 1988c ; Schöner *et al.*, 1992 ; Zanone & Kelso, 1992, 1997). Un concept important repris dans cette approche est celui de dynamique intrinsèque. La dynamique intrinsèque permet d'envisager l'apprentissage moteur sur la base des capacités déjà existantes des individus. Ainsi, le processus d'apprentissage mène à l'apparition d'un nouveau patron stable autour de la phase relative pratiquée, mais aussi à la perte de stabilité du patron intrinsèque le moins stable (Schöner, 1989 ; Zanone & Kelso, 1992, 1994). Puisque la coordination motrice périodique (bimanuelle, intersegmentaire, interpersonnelle etc.) paraît être intrinsèquement bistable, avec des patrons stables en phase et en antiphase, une question fondamentale est de savoir comment la dynamique de coordination multistable (autre que bistable) s'acquiert.

4.1.5.1. Hypothèse de l'emprunt d'une des deux routes d'acquisition

Plusieurs auteurs ont cherché à déterminer les principes qui régissent l'acquisition de nouveau(x) patron(s) stable(s), « en addition » aux patrons stables standard (Kelso & Zanone, 2002 ; Kostrubiec & Zanone, 2002 ; Tallet *et al.*, 2008 ; Zanone & Kelso, 1992 ; 1997). Cette question a eu pour premières réponses des résultats empiriques révélant l'existence de deux routes d'acquisition : la route d'acquisition par transition de phase (Zanone & Kelso, 1992 ; 1997 ; Kelso & Zanone, 2002) et la route d'acquisition par déplacement d'un patron stable préexistant (modélisée par Schönér & Kelso, 1988a ; Schönér, 1989).

Concernant la route d'acquisition par transition de phase, Zanone et Kelso (1992) se sont intéressés à l'apprentissage d'un nouveau patron de coordination bimanuelle qui est par définition instable chez des participants initialement bistables, c'est-à-dire pour lesquels 0° et 180° étaient les patrons préférentiels. Après un scanning vérifiant la bistabilité de la dynamique de coordination spontanée, le patron à 90° était requis à l'aide d'un métronome visuel, présent tout au long de chaque essai, et d'une connaissance des résultats (CR), donnée après chaque essai. La comparaison des scans effectués en début et en fin d'acquisition a révélé que le patron pratiqué à 90° de PR, initialement instable, devient stable à la fin de la pratique. L'examen des biais a montré que le patron à 90° attire à son tour les patrons voisins (Zanone & Kelso, 1992 ; 1997). De plus, l'expérience de Wenderoth et Bock (2001) a révélé qu'après avoir appris le patron à 90° , la production de PR voisines est possible en présence d'un métronome mais que la performance est immédiatement attirée vers 90° dès que le métronome est retiré, ce qui a confirmé le biais vers le nouvel attracteur à 90° de PR. Le passage d'une dynamique bistable (0° et 180°) à une dynamique tristable (0° , 90° et 180°) donne donc lieu théoriquement à une bifurcation de la dynamique de coordination (Zanone & Kelso, 1992). Cette transition de phase est manifestée par une grande variabilité initiale, diminuant grâce à la pratique et aboutissant à l'apparition d'un nouvel attracteur de la dynamique à la phase requise. Cette apparition est accompagnée d'une déstabilisation temporaire de l'attracteur le moins stable de la dynamique intrinsèque (Zanone & Kelso, 1992 ; 1994 ; 1997 ; Kelso & Zanone, 2002).

Concernant la route d'acquisition par déplacement, Zanone et Kelso (1997) se sont également intéressés à l'apprentissage d'un nouveau patron de coordination initialement instable chez des participants tristables, pour lesquels 0° , 90° et 180° étaient les patrons préférentiels avant tout nouvel apprentissage. Cette fois-ci, le patron à 135° était requis de la même manière que dans l'expérience précédemment décrite. Les résultats révèlent que, contrairement à la pratique de 90° par des individus bistables, la pratique de 135° par des

individus tristables n'aboutit pas à la création d'un nouveau patron stable supplémentaire. La comparaison des scans en début et en fin de pratique ne révèle pas de changement du nombre de patrons stables. Ainsi, la pratique de 135° semble engendrer la disparition du patron de 90° de PR conjointement à l'apparition du patron de 135° de PR stabilisé par la pratique. Les auteurs concluent que la pratique du patron de 135° chez des individus initialement tristables correspond à un déplacement du patron 90° vers le patron requis de 135° (Zanone & Kelso, 1997 ; voir également Kelso & Zanone, 2002).

Que ce soit par la route par transition de phase ou par déplacement, un nouvel attracteur est stabilisé vers la valeur requise. Seule la manière dont il apparaît est différente.

4.1.5.2. Conséquences sur l'apprentissage de la graphomotricité – Problématique

Athènes et collaborateurs (2004) ont évalué la dynamique de coordination graphomotrice chez l'adulte. Ces auteurs ont repéré une dynamique de coordination quadristable avec 0°, 45°, 120°-135° et 180° de PR. Cette caractéristique d'être quadristable peut être vue comme la nécessité de produire un certain nombre de formes différentiables, imposées par l'écriture conventionnelle, qui ne peuvent pas correspondre à la seule synchronisation des deux oscillateurs en phase et en antiphase. Théoriquement, cette dynamique de coordination pourrait provenir de l'interaction entre les contraintes de la tâche (les formes requises) et la dynamique intrinsèque disponible avant tout nouvel apprentissage (Schöner & Kelso, 1988b et 1988c, pour une revue théorique). Dans cette perspective, des études sur l'apprentissage au niveau de la coordination bimanuelle ont montré que des patrons originellement instables pouvaient être stabilisés par la pratique (Fink *et al.*, 2000 ; Smethurst & Carson, 2001) et être intégrés de façon permanente à la dynamique de coordination initiale (Zanone & Kelso, 1992). De plus, les études centrées sur la coordination bimanuelle ont montré que les patrons à 45° et 135° ne sont jamais produits spontanément mais résultent d'un apprentissage (Atchy-Dalama *et al.*, 2005; Kelso, 1995; Tallet *et al.*, 2008; Zanone & Kelso, 1992, 1997). La dynamique de coordination multistable de la graphomotricité peut alors être envisagée comme le résultat d'une longue pratique d'écriture, permettant aux individus de stabiliser de nouveaux patrons de coordination imposés par la tâche d'écriture. L'objectif de la prochaine expérience est de comprendre comment la dynamique de coordination graphomotrice quadristable chez l'adulte s'acquiert chez l'enfant entre 7 et 11 ans, en plein apprentissage de l'écriture scolaire.

4.2. Méthode

4.2.1. Participants

Quarante-cinq enfants (de 7 à 11 ans) et neuf adultes (de 20 à 29 ans) ont participé à l'expérience. Neuf enfants par groupe de niveau ont été sélectionnés dans les cinq niveaux de classes de l'école primaire (en CP, CE1, CE2, CM1 et CM2). Tous les participants étaient droitiers et ne présentaient pas de trouble du langage ni moteur affectant la réalisation de l'expérience. Les enfants ont effectué un test M-ABC (Soppelsa & Albaret, 2004, adaptation française du Movement ABC de Henderson & Sugden, 1992). Les adultes étaient droitiers selon le « Edinburgh Handedness Inventory » (moyenne = 77.17 ; écart-type = 18.02, selon le test de Oldfield, 1971). L'étude a été conduite avec l'accord de l'inspecteur de l'académie de Toulouse et le consentement écrit des parents.

4.2.2. Tâche et procédure

La tâche consistait à reproduire différentes formes elliptiques (allant du trait au cercle) par-dessus le modèle affiché au centre de l'écran d'une tablette graphique. Chaque modèle restait affiché durant 8s avant l'apparition du modèle suivant. Comme dans l'étude d'Athènes *et al.* (2004), les formes modèles ont été construites en combinant le mouvement de deux oscillateurs orthogonaux, un sur chaque composante (voir le paragraphe 2.3.3. du chapitre II, p. 59, pour plus de détails). Deux scans ont été analysés. Nous parlerons de scan oblique et cardinal plutôt que de scan de la PR et de l'AR, pour rappeler la nature abstraite du paysage dynamique de coordination graphomotrice observée par Athènes *et al.* (2004) et confirmée dans notre première étude (cf. chapitre III). La Figure 39 présente toutes les formes produites par le scan de la PR entre 0° et 180°. Le scan oblique correspond à la variation de la PR de 0° à 180° par pas de 15° entre les oscillateurs des composantes x et y . Pour une meilleure lisibilité, le scan cardinal est envisagé comme la variation de la PR de 0° à 180° par pas de 15° entre deux oscillateurs orthogonaux similaires dans un système de référence $x'-y'$ tourné de 45°. Toutes les formes étaient inscrites dans un carré de 2 cm de côté.



Oblique scan	
RP	0° 15° 30° 45° 60° 75° 90° 105° 120° 135° 150° 165° 180°
Cardinal scan	

Figure 39 : Représentation des scans oblique (ligne du haut) et cardinal (ligne du bas) avec leur expression en phase relative (RP).

Chaque scan était effectué dans un sens de rotation spontané. Comme dans l'étude d'Athènes *et al.*, 2004, deux ordres d'apparition étaient contrebalancés entre les participants, un ascendant de 0° à 180° et un descendant de 180° à 0°. Chaque forme restait à l'écran pendant 8 s. avant l'apparition de la forme suivante. Dès que la première forme apparaissait, les participants devaient reproduire la forme et arrêter son mouvement seulement à la fin de la série des formes constituant le scan. Chaque scan durait 101 s. Les instructions étaient d'être aussi précis que possible à une vitesse confortable qui peut être maintenue constante durant l'ensemble du scan de 13 formes.

Chaque scan était reproduit deux fois. Au total, les huit scans ($2 \times 2 \times 2$) étaient reproduits de manière aléatoire. Toutes les données ont été moyennées sur les deux répétitions. En début de session, les participants étaient familiarisés avec le matériel et les stimuli en effectuant la reproduction de quatre formes : un cercle, un trait et deux ellipses. Durant cette phase de familiarisation, la position de l'avant-bras sur la tablette était relevée et maintenue similaire pendant l'expérience. Enfin, la forme à reproduire était affichée sur l'écran alors que la trace produite ne l'était pas.

4.2.3. Matériel

Les formes apparaissaient au centre d'une tablette graphique (Wacom DTF-720, 17.0" diagonal) posée horizontalement sur une table. Comme dans la première expérience, les participants étaient assis sur une chaise ajustable en hauteur avec leurs deux bras posés sur la table. Dès que le stylet était en contact avec la tablette, les coordonnées en x et en y de la trace étaient enregistrées à une fréquence de 100 Hz (précision spatiale de 0,5 mm).

4.2.4. Analyse de données

Pour chaque PR requise, nous avons calculé la moyenne et la variabilité de la PR produite (en degré). La PR dans le scan cardinal a été déterminée après avoir effectué une rotation de 45° des trajectoires enregistrés par la tablette (voir les équations 2.8 et 2.9 p. 60, pour des détails).

Vu le faible nombre de cycles effectués lors d'un essai, la PR a été calculée par la méthode de la transformée de Hilbert. Nous avons ainsi calculé l'Erreur Constante (EC) correspondant à la différence signée entre la PR produite et la PR requise pour chaque patron, l'Erreur Absolue (EA) correspondant à la valeur absolue de cette différence, la déviation standard (DS) de la PR (sa variabilité) et la fréquence.

Pour chaque scan, trois variables indépendantes ont été analysées : cinq groupes de Niveau et un groupe contrôle d'adulte, deux Ordres d'apparition (ascendant et descendant) et 13 PR. Nous avons effectué des ANOVA (6 Niveaux \times 2 Ordres \times 13 PR) à mesures répétées sur l'EC, l'EA, la DS de la PR et la fréquence. Une analyse plus fine des effets significatifs a été obtenue par des tests post-hoc de Newman-Keuls. Le seuil de significativité était fixé à $p < 0.05$.

4.3. Résultats

4.3.1. Analyse de l'Erreur Constante (EC)

Comme nous l'avons déjà précisé dans les chapitres précédents, l'EC permet de localiser les patrons préférentiels dans le paysage dynamique exploré par la méthode de scanning. D'un côté, l'EC minimale reflète la précision de la performance pour un patron particulier. D'un autre côté, une surestimation de l'EC pour des valeurs de PR voisines inférieures et une sous-estimation de l'EC pour des valeurs de PR voisines supérieures reflète l'attraction de ce patron particulier.

4.3.1.1. Scan oblique

L'ANOVA a révélé un effet principal de l'Ordre et de la PR ($F(1, 48) = 12.88, p < .001$, et $F(12, 576) = 159.87, p < .0001$, respectivement), des interactions Ordre \times Niveau et PR \times Niveau ($F(5, 48) = 7.39, p < .0001$ et $F(60, 576) = 1.60, p < .01$, respectivement) et la double interaction ($F(60, 576) = 1.39, p < .05$). Les effets significatifs de l'EC sont présentés dans les Figures 40A et 40C. L'analyse post-hoc de l'interaction Ordre \times Niveau a révélé que l'effet Ordre concerne uniquement le groupe adulte. L'analyse post-hoc de l'interaction PR \times Niveau n'a pas révélé de différence entre les cinq groupes d'enfants.

Dans la Figure 40, nous pouvons facilement identifier les patrons préférentiels à partir de l'intersection de la courbe d'EC avec l'axe des abscisses, c'est-à-dire quand l'erreur est minimale. Pour tous les enfants, les figures 40A et 40C suggèrent que les patrons à 0° , 90° et

180° sont reproduits avec une erreur minimale. De plus, la pente négative autour de 90° indique qu'il serait un attracteur à proprement parler, c'est-à-dire qu'il biaiserait la performance pour les valeurs de PR voisines. Pour les adultes, 0°, 45°, 105° et 180° sont reproduits avec une EC minimale dans l'ordre ascendant alors que 0°, 75°, 135° et 180° sont reproduits plus précisément dans l'ordre descendant. L'ordre d'apparition des formes semble déplacer la localisation des patrons préférentiels intermédiaires (entre 45° et 75° ou entre 105° et 135° pour les patrons orientés à gauche et à droite, respectivement).

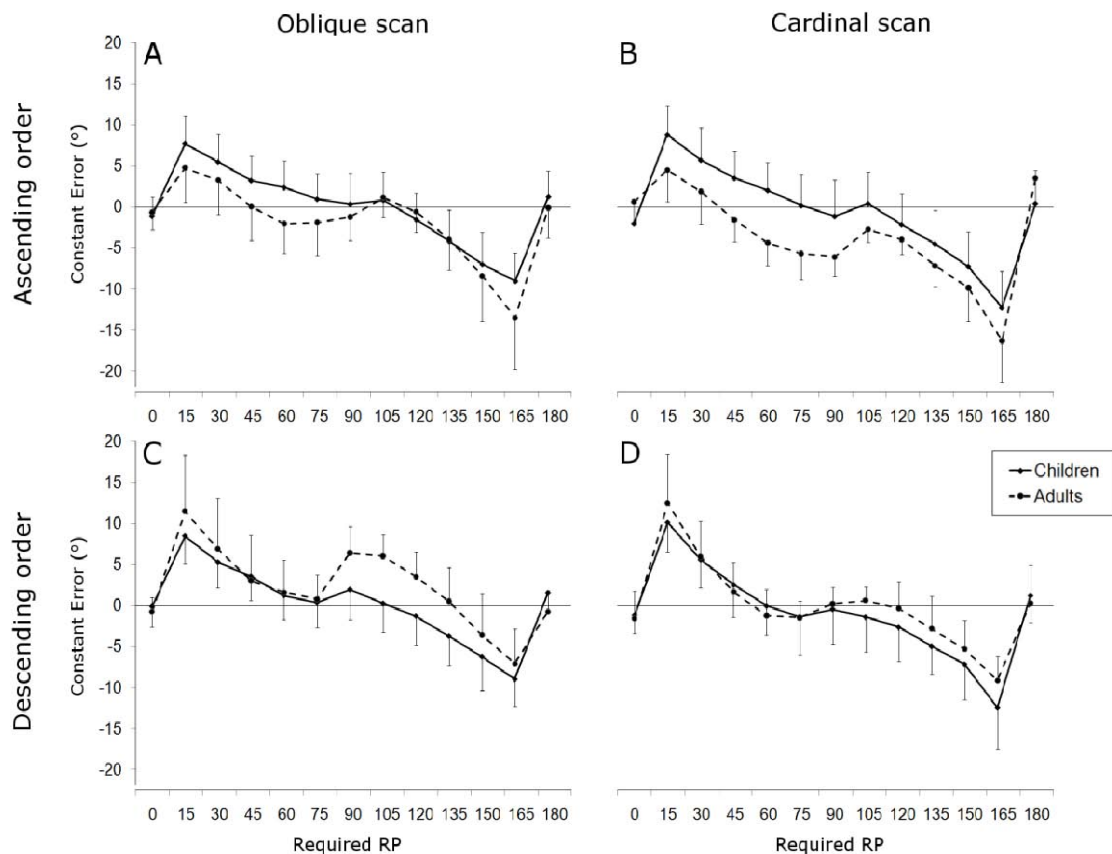


Figure 40 : Moyenne de l'EC en fonction des PR requises (en degré) dans les ordres ascendant (ligne du haut) et descendant (ligne du bas), dans les scans oblique (colonne de gauche) et cardinal (colonne de droite). Les barres d'erreur correspondent aux variabilités interindividuelles.

4.3.1.2. Scan cardinal

L'ANOVA a révélé un effet principal de la PR ($F(12, 576) = 210.23, p < .0001$), des interactions Ordre \times Niveau, PR \times Niveau et Ordre \times PR ($F(5, 48) = 6.72, p < .0001, F(60, 576) = 1.87, p < .001$ et $F(12, 576) = 3.45, p < .0001$, respectivement) et la double interaction ($F(60, 576) = 1.92, p < .0001$). Les effets significatifs de l'EC sont présentés dans les Figures 40B et 40D. Comme pour le scan oblique, les analyses post-hoc de l'interaction Ordre \times

Niveau ont révélé que l'effet Ordre concerne uniquement le groupe adulte. L'analyse post-hoc de l'interaction PR \times Niveau n'a pas révélé de différence entre les cinq groupes d'enfants : 0°, 90° et 180° sont les patrons les mieux reproduits par les enfants. Concernant le groupe adulte, 0°, 45°, 105° et 180° sont reproduits plus précisément dans l'ordre ascendant alors que 0°, 60°, 120° et 180° le sont dans l'ordre descendant.

La comparaison des résultats des deux scans (cf. Figures 40A et 40B et Figures 40C et 40D) suggère qu'au-delà de la localisation exacte des patrons préférentiels intermédiaires selon l'ordre d'apparition, les performances entre les adultes et les enfants diffèrent de la même manière, indépendamment des scans.

4.3.2. Analyse de la variabilité de la phase relative

La variabilité de la phase relative, déterminée par l'écart-type de la PR produite, est un indice classique pour déterminer la stabilité des patrons préférentiels identifiés par l'EC et l'EA.

4.3.2.1. Scan oblique

L'ANOVA a révélé des effets principaux du Niveau, de l'Ordre et de la PR ($F(5, 48) = 2.98$, $p < .05$, $F(1, 48) = 4.09$, $p < .05$ et $F(12, 576) = 68.35$, $p < .0001$, respectivement), des interactions PR \times Niveau et Ordre \times PR ($F(60, 576) = 1.49$, $p < .05$ et $F(12, 576) = 12.16$, $p < .0001$, respectivement) et la double interaction ($F(60, 576) = 1.41$, $p < .05$). L'effet Ordre a révélé que la variabilité de la PR était plus faible dans l'ordre ascendant que dans l'ordre descendant (8.53° versus 8.78°). L'effet principal du Niveau et l'interaction Ordre \times PR sont présentés sur les Figures 41A et 41C, respectivement. Les analyses post-hoc de l'effet Niveau ont révélé que la variabilité de la PR était significativement inférieure dans le groupe adulte que dans les groupes de CP, CE1 et CE2. Les analyses post-hoc de l'interaction PR \times Niveau ont révélé que la variabilité de la PR était significativement inférieure à 0° et 180° chez tous les enfants mais seulement à 0° chez le groupe adulte. Enfin, l'analyse post-hoc de l'interaction Ordre \times PR a indiqué que la variabilité de la PR à 0° et entre 30° et 60° était significativement inférieure dans l'ordre ascendant par rapport à l'ordre descendant et que la variabilité de la PR entre 150° et 180° était inférieure dans l'ordre descendant par rapport à l'ordre ascendant (cf. Figure 41C).

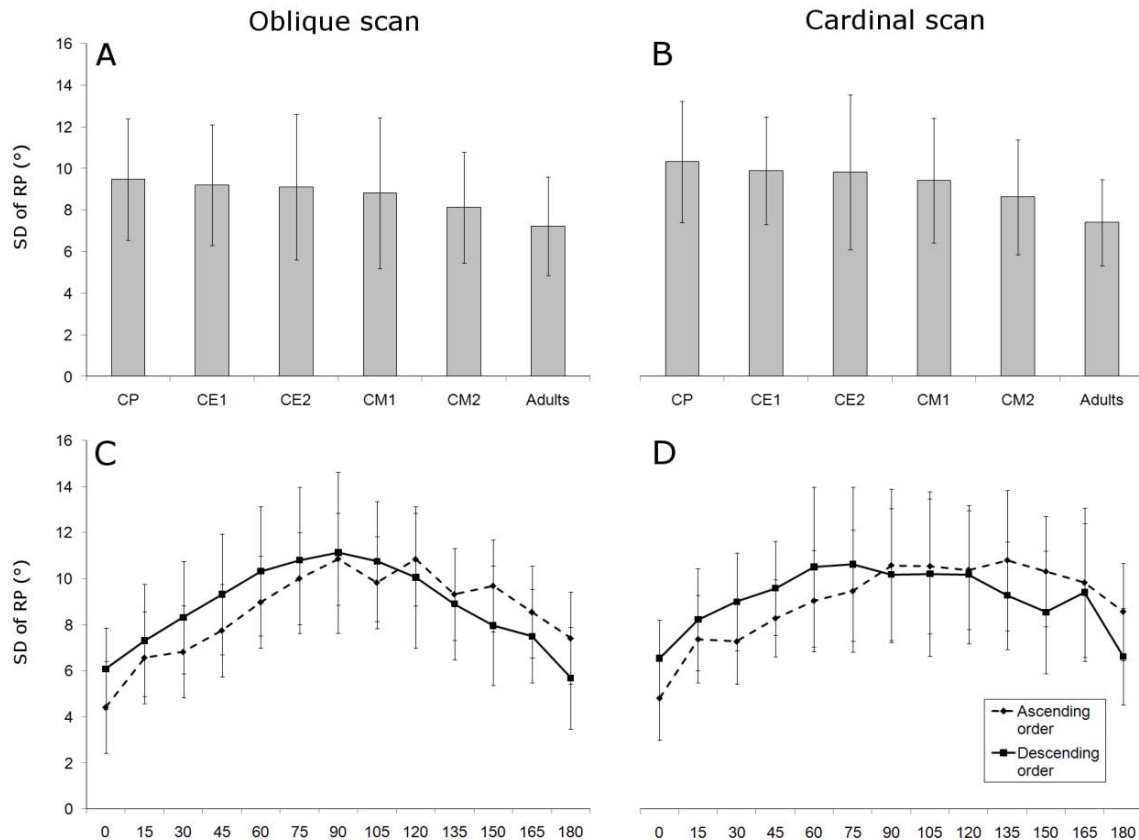


Figure 41 : Variabilité de la PR en fonction des groupes de niveau (ligne du haut) et en fonction de l'interaction Ordre × PR (ligne du bas) dans les scans oblique (colonne de gauche) et cardinal (colonne de droite). Les barres d'erreur correspondent aux variabilités interindividuelles.

4.3.2.2. Scan cardinal

L'ANOVA a révélé des effets principaux du Niveau et de la PR ($F(5, 48) = 6.40, p < .001$ et $F(12, 576) = 44.74, p < .0001$, respectivement) et une interaction Ordre × PR ($F(12, 576) = 11.67, p < .0001$). L'effet principal du Niveau et l'interaction Ordre × PR sont présentés sur les Figures 41B et 41D, respectivement. Les analyses post-hoc de l'effet Niveau ont révélé que la variabilité de la PR était significativement inférieure dans le groupe adulte que dans tous les groupes d'enfants. Enfin, l'analyse post-hoc de l'interaction Ordre × PR a indiqué que la variabilité de la PR entre 0° et 60° était significativement inférieure dans l'ordre ascendant par rapport à l'ordre descendant et que la variabilité de la PR à 135°, 150° et 180° était inférieure dans l'ordre descendant par rapport à l'ordre ascendant (cf. Figure 41D).

4.3.3. Analyse de l'Erreur Absolue (EA)

L'EA permet de confirmer la présence des attracteurs qui ont été « localisés » par l'analyse de l'EC.

4.3.3.1. Scan oblique

L'ANOVA a révélé un effet principal de la PR ($F(12, 576) = 70.61, p < .0001$), une interaction Ordre \times PR ($F(12, 576) = 3.94, p < .0001$) et la double interaction ($F(60, 576) = 2.44, p < .0001$). Comme pour l'EC, les analyses post-hoc de la double interaction n'ont révélé aucune différence entre les différents groupes d'enfants. Chez les enfants, l'EA minimale a été localisée à 0°, 90° et 180°. Chez les adultes, l'EA minimale a été localisée à 0°, 45°, 120° et 180° dans l'ordre d'apparition ascendant et 0°, 75°, 135° et 180° dans l'ordre d'apparition descendant

4.3.3.2. Scan cardinal

L'ANOVA a révélé un effet principal de la PR ($F(12, 576) = 93.59, p < .0001$), des interactions Ordre \times Niveau et Ordre \times PR ($F(5, 48) = 3.06, p < .05$ et $F(12, 576) = 3.34, p < .001$, respectivement) et la double interaction ($F(60, 576) = 2.51, p < .0001$). Les analyses post-hoc de l'interaction Ordre \times PR n'ont pas révélé de différence significative entre les ordres d'apparition à l'intérieur des différents groupes. L'analyse post-hoc de la double interaction n'a pas non plus révélé de différence entre les six groupes dans l'ordre descendant : les patrons préférentiels ont été localisés à 0°, 90° et 180°. Dans l'ordre ascendant, les patrons préférentiels ont été localisés à 0°, 90° et 180° pour tous les groupes d'enfants et à 0°, 45°, 105° et 180° pour le groupe adulte.

4.3.4. Analyse de la fréquence

La fréquence est un indicateur fiable de la difficulté à tracer des formes avec la même précision requise par la tâche.

4.3.4.1. Scan oblique

L'ANOVA a révélé des effets principaux du Niveau et de la PR ($F(5, 48) = 31.10, p < .0001$ et $F(12, 576) = 26.78, p < .0001$, respectivement), des interactions PR \times Niveau et Ordre \times PR ($F(60, 576) = 1.97, p < .0001$ et $F(12, 576) = 8.25, p < .0001$, respectivement) et la double interaction ($F(60, 576) = 1.50, p < .05$). L'effet du Niveau est présenté sur la Figure 42A. Les analyses post-hoc de l'effet Niveau ont révélé que la fréquence était plus élevée chez les adultes que chez tous les groupes d'enfants. Les analyses post-hoc de l'interaction PR \times Niveau ont révélé que 0° et 180° étaient reproduits à une fréquence plus élevée que tous les autres patrons chez les CP, CE1 et le groupe adulte.

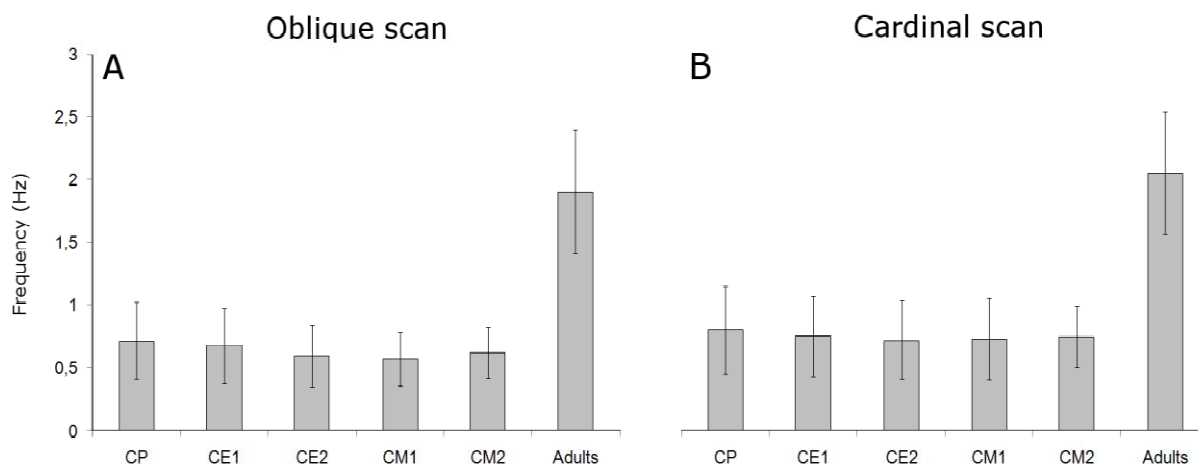


Figure 42 : Fréquence moyenne en fonction des groupes de niveau dans le scan oblique (panel de gauche) et le scan cardinal (panel de droite). Les barres d'erreur correspondent aux variabilités interindividuelles.

4.3.4.2. Scan cardinal

L'ANOVA a révélé des effets principaux du Niveau, de l'Ordre et de la PR ($F(5, 48) = 27.94$, $p < .0001$, $F(1, 48) = 6.01$, $p < .05$ et $F(12, 576) = 62.40$, $p < .0001$, respectivement), des interactions PR \times Niveau et Ordre \times PR ($F(60, 576) = 1.43$, $p < .05$ et $F(12, 576) = 7.04$, $p < .0001$, respectivement) et la double interaction ($F(60, 576) = 1.71$, $p < .01$). L'effet du Niveau est présenté sur la Figure 42B. Comme pour le scan oblique, les analyses post-hoc de l'effet Niveau ont révélé que la fréquence était plus élevée chez les adultes que chez tous les groupes d'enfants. Les analyses post-hoc de l'interaction PR \times Niveau ont révélé que 0° et 180° étaient reproduits à une fréquence plus élevée que tous les autres patrons chez les CP et le groupe adulte. Pour tous les autres groupes, seul 0° est reproduit à une fréquence significativement plus élevée.

4.4. Discussion

Cette étude avait pour objectif d'observer et de comprendre comment la dynamique de coordination chez l'adulte se construit chez l'enfant. Plus précisément, en envisageant la dynamique de coordination multistable de la graphomotricité chez l'adulte comme le résultat d'une longue pratique de l'écriture, permettant aux individus de stabiliser de nouveaux patrons de coordination imposés par la tâche d'écriture, l'analyse de la dynamique de coordination chez l'enfant en plein apprentissage de l'écriture apporterait un éclairage sur la présence ou l'apparition des patrons préférentiels autre que 0° et 180° dans la coordination graphomotrice.

4.4.1. Synthèse des principaux résultats

Un premier résultat est que, indépendamment du niveau d'âge dans lequel les enfants se situent, tous les enfants reproduisent trois patrons de manière préférentielle : 0° , 90° et 180° . Ces trois patrons sont produits avec une plus grande précision, les patrons en phase et antiphase étant reproduits plus rapidement que tous les autres. Concernant les performances des adultes, les résultats ont confirmé la présence d'une dynamique de coordination quadristable initialement déterminée par Athènes *et al.* (2004). Quatre patrons étaient donc reproduits avec une bonne précision, à savoir, 0° , autour de 60° (entre 45° et 75°), autour de 120° (entre 105° et 135°) et à 180° . La localisation des patrons préférentiels intermédiaires (autour de 60° et de 120°) dépend de l'ordre d'apparition des scans. Cet effet est interprété comme une tendance à reproduire précisément des formes plus arrondies (plus proche du cercle) quand les ellipses changent d'orientation par rapport à l'orientation de départ. Cet effet de l'orientation est identique à celui observé dans l'expérience précédente (cf. chapitre III). En comparant les données chez l'enfant et l'adulte, les patrons en phase et antiphase (0° et 180°) sont aussi bien reproduits dès le plus jeune âge, de manière similaire à l'adulte. Par contre, l'existence d'un patron préférentiel chez l'enfant à 90° ne correspond pas avec les patrons préférentiels de l'adulte repérés à 60° et 120° . Cette différence suggère que la dynamique de coordination graphomotrice de l'adulte n'est pas encore observée chez l'enfant, même à l'âge de 11 ans. D'un point de vue géométrique, les enfants tendent à reproduire plus facilement des formes plus arrondies que les adultes. Cette tendance persisterait ainsi jusqu'à l'âge de 11 ans.

Un second résultat est que tous les groupes d'enfants semblent avoir des performances similaires dans les deux scans. La dynamique de coordination graphomotrice chez l'enfant serait donc relativement abstraite, c'est-à-dire peu affectée par l'orientation des formes définie dans notre première expérience comme une contrainte liée à l'effecteur (Danna, Athènes & Zanone, sous presse ; Danna, Wamain, Kostrubiec, Tallet & Zanone, 2010). Comme le tracé des formes dans les différentes orientations implique la mobilisation des articulations et des muscles de la main et du bras de différente manière, une conclusion assez étonnante est que dès un âge relativement précoce, les enfants réussiraient à recruter les multiples ddl avec une certaine flexibilité pour réaliser la trace. Ce phénomène n'est pas sans rappeler celui de l'équivalence motrice qui serait présent dès le début de l'apprentissage de l'écriture. Enfin, notons comme troisième résultat que la fréquence de mouvement des enfants était plus faible que celle des adultes (0.7 Hz vs. 2 Hz).

4.4.2. Validation de l'hypothèse théorique

Comment l'acquisition de la dynamique de coordination graphomotrice de l'adulte se construit-elle ? En postulant que cette dynamique de coordination graphomotrice résulte de l'apprentissage de l'écriture durant l'enfance et que les patrons en phase et antiphase sont deux patrons présents dans la dynamique intrinsèque, comme c'est le cas dans de nombreuses tâches de coordination motrice chez l'enfant et l'adulte (e.g. Lantero & Ringenbach, 2009 ; Volman & Geuze, 2000), une hypothèse séduisante est que l'apprentissage des patrons préférentiels les moins stables (autour de 60° et de 120°) passerait par la stabilisation d'un patron intermédiaire à 90°, comme dans le cas de l'apprentissage de nouveaux patrons en coordination bimanuelle (Amazeen, 2002 ; Atchy-Dalama *et al.*, 2005 ; Tallet *et al.*, 2008). En effet, ces auteurs ont montré que l'apprentissage d'un nouveau patron de coordination à 135° chez des participants initialement caractérisés par deux patrons préférentiels (à 0° et 180°) est précédé par la stabilisation intermédiaire d'un patron à 90°.

Les patrons de coordination préférentiels chez l'adulte autour de 60° et de 120° seraient donc précédés par l'acquisition d'un patron intermédiaire à 90° chez l'enfant en plein apprentissage de l'écriture. Le patron préférentiel à 120° résulterait d'un transfert spontané de l'apprentissage du patron à 60°, respectant un principe de symétrie reportée dans la littérature sur l'apprentissage de patrons de coordination bimanuelle (Zanone & Kelso, 1997; Kelso & Zanone, 2002). La différence dans la localisation et dans la stabilité à 45° et 105° dans l'ordre ascendant et à 75° et 135° dans l'ordre descendant serait expliquée par des contraintes d'orientation liées à l'effecteur (Danna *et al.*, sous presse ; Danna *et al.*, 2010).

Comme nous l'avons vu dans le chapitre II, le modèle HKB offre une formalisation de l'évolution d'une dynamique bistable à une dynamique monostable. En reprenant ce modèle et en le complétant par l'ajout d'un terme du 4^{ème} ordre et d'un terme du 6^{ème} ordre, nous obtenons une description précise de la modification du paysage dynamique entre l'enfant et l'adulte telle que nous l'envisageons. L'équation serait de type :

$$V(\varnothing) = -\cos(\varnothing) - 2 * \cos(2\varnothing) - c * \cos(4\varnothing) - d * \cos(6\varnothing) \quad 4.1$$

Pour une meilleure lisibilité, nous limitons l'illustration du modèle dans l'espace défini entre 0° et 180°, assumant l'évolution symétrique dans l'espace compris entre 180° et 360°. Les deux premiers termes de l'équation correspondent au modèle HKB initial (Haken *et al.*, 1985), définissant la dynamique graphomotrice intrinsèque avec des patrons préférentiels localisés à 0° et 180°. Comme nous pouvons le voir sur la Figure suivante,

l'augmentation du paramètre c dans le terme du 4^{ème} ordre amène à un paysage dynamique tristable (avec 0°, 90° et 180° comme patrons préférentiels), caractéristique du paysage dynamique graphomoteur chez les enfants. Enfin, l'augmentation du paramètre du 6^{ème} ordre modifie ce paysage tristable en un paysage quadristable (avec 0°, 60°, 120° et 180°), simulant le passage du paysage dynamique graphomoteur chez l'enfant à celui de l'adulte.

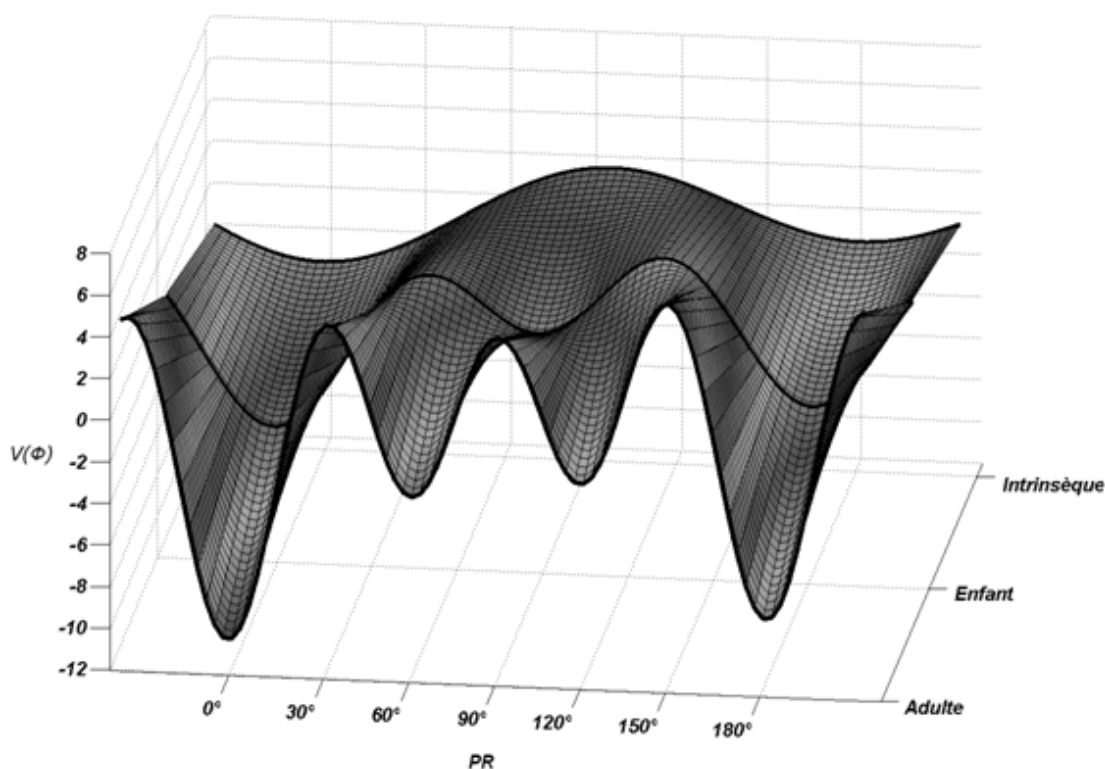


Figure 43 : Extension du modèle HKB (Haken *et al.*, 1985) modifié à partir des patrons graphomoteurs préférés chez l'enfant (à 0°, 90° et 180°) et l'adulte (à 0°, 45°, 120° et 180°). La profondeur du bassin d'attraction détermine le degré de stabilité des patrons préférés.

Concernant l'hypothèse d'une des deux routes d'acquisition (*par déplacement* d'un patron stable préexistant et *par transition de phase*), nos résultats amènent à considérer l'hypothèse de l'emprunt successif des deux routes. Dans un premier temps, nous pouvons supposer que l'émergence d'une dynamique tristable chez l'enfant (avec 0°, 90° et 180° comme patrons préférentiels) résulte de la formation d'un nouveau patron préférentiel intermédiaire (à 90°) par transition de phase de la dynamique intrinsèque bistable (avec 0° et 180°). Le nombre de patrons préférentiels ayant augmenté, l'apprentissage donne lieu à un changement qualitatif de la dynamique de coordination (Zanone & Kelso, 1992), c'est-à-dire à une bifurcation caractérisée par l'augmentation de paramètre c dans le terme du 4^{ème} ordre du modèle HKB modifié. Dans un second temps, nous supposons que le passage d'une

dynamique tristable chez l'enfant à une dynamique quadristable chez l'adulte résulte d'un déplacement du patron préférentiel le moins stable (90°) vers le(s) patron(s) préférentiel(s) le(s) plus stable(s) face à une augmentation de contrainte de vitesse. Comme nous l'avons déjà remarqué, l'augmentation du nombre de patrons préférentiels dans l'ensemble du paysage dynamique (entre 0° et 360°) résulterait du transfert d'apprentissage du patron à 60° , vraiment acquis, sur le patron à 120° , comme sur les autres patrons symétriques (240° et 300°), suite à la stabilisation du terme d'ordre 6 du modèle. L'hypothèse de l'emprunt de cette route par déplacement serait confortée par la variation de la localisation des patrons intermédiaires en fonction d'un effet d'orientation des formes à reproduire (voir chapitre III).

Pour valider cette hypothèse de l'emprunt des deux routes, il faudrait 1) valider la présence d'une dynamique intrinsèque bistable et 2) observer le processus d'émergence du patron à 90° pour vérifier le phénomène de transition de phase

4.4.3. La différence entre le paysage dynamique graphomoteur de l'enfant et celui de l'adulte peut-elle être expliquée par la fréquence du mouvement ?

4.4.3.1. Le point de vue de l'approche cognitive

Si la vitesse de l'exécution est un facteur critique, elle peut affecter la manière dont les enfants contrôlent leur mouvement d'écriture (voir chapitre I, pour des détails). A faible vitesse, les enfants se concentreraient sur les paramètres spatiaux de la tâche, essayant de reproduire exactement la forme modèle, comme une tâche de dessin. Les lettres seraient produites en juxtaposant des morceaux de trace, menant à une production lente et fragmentaire des lettres plutôt grandes et bosselées. Ce mode de production s'effectuerait par un contrôle rétroactif du mouvement : l'enfant utiliserait fortement les retours visuels pour surveiller le déplacement du stylo. Sovik (1974) a démontré que la vitesse et la qualité à copier des formes géométriques sans rétroaction visuelle sont systématiquement détériorées chez les enfants entre 7 et 11 ans, suggérant que la rétroaction visuelle soit fondamentale pour l'écriture au cours de cette période. Ce mode de contrôle rétroactif, où les enfants sont visuellement guidés par la trace produite, pourrait contribuer à leur tendance d'être très lents afin de prendre en compte les informations visuelles provenant du bout du stylo et de la trace produite. Van Mier (2006) a également démontré que les enfants en bas âge effectuent des mouvements continus en mode discret, produisant des mouvements courts séparés par des pauses : le contrôle rétroactif fortement fondé sur la position induirait un mouvement lent et saccadé. A une vitesse d'écriture plus élevée, imposé par l'enseignement au collège (par

exemple, par la prise de notes ou lors d'une dictée rapide), les enfants et adolescents plus âgés se conformeraient à la vitesse plutôt qu'à la précision du geste, comme dans une tâche d'écriture à proprement parlé. Ce contrôle plus proactif du mouvement serait possible à partir d'une représentation interne du mouvement (Zesiger, 1995). L'apprentissage de l'écriture correspondrait au passage d'un contrôle rétroactif à un contrôle proactif (Meulenbroek et Van Galen, 1988), comme c'est souvent le cas dans l'acquisition d'autres habiletés motrices (par exemple, Gachoud, Mounoud, Hauert, et Viviani, 1983, concernant la préhension).

4.4.3.2. *Le point de vue de l'approche dynamique de la coordination motrice*

La question de l'évolution de la coordination motrice impliquée dans la graphomotricité selon l'évolution de la fréquence a été abordée par Dounskaïa et collaborateurs (2000). Comme nous l'avons expliqué dans le chapitre II, ces auteurs ont démontré que les cercles produits à vitesse spontanée sont progressivement transformés en formes elliptiques quand la vitesse d'exécution augmente. Cette diminution de la PR de 90° (produisant le cercle) vers 45° (produisant l'ellipse) peut être comprise comme l'émergence d'un mode de coordination préférentiel en réponse à une augmentation de contrainte de la tâche. De la même manière, nous pouvons supposer que les enfants reproduisent de manière préférentielle des cercles (90°) en vertu de leur vitesse d'exécution plus lente que celle des adultes. Une fois la stabilisation du patron à 90° à vitesse lente, les enfants pourraient par la suite augmenter leur vitesse de production, réduisant ainsi leur tendance à écrire de manière arrondie, dans l'exacte mesure où 90° se déstabilise.

La question est alors de savoir si l'augmentation de vitesse de production amènerait les enfants à démontrer une dynamique de coordination comparable à celle des adultes. La réponse théorique est que l'augmentation de vitesse est une augmentation de contraintes si bien que la vitesse spontanée d'écriture de l'adulte ne correspond en aucun cas à la vitesse rapide d'écriture de l'enfant. Si la vitesse de production devient excessive chez l'enfant, le mode de coordination se détériorerait totalement pour laisser place à l'émergence d'un mode de coordination plus stable, comme par exemple 180°. L'ordre de disparition des patrons de coordination préférentiels suivrait l'ordre inverse de la stabilité des patrons de coordination (Kelso, 1995 ; Sallagoïty *et al.*, 2004). Ainsi, la stabilisation des patrons préférentiels à 60° et 120° ne résulterait pas simplement d'une modification de contraintes de la tâche mais d'une modification plus profonde liée à l'apprentissage de l'écriture.

4.4.4. Conclusion

Les théories des systèmes dynamiques offrent un éclairage intéressant pour la compréhension des mécanismes sous-jacents à l'acquisition de nouvelles habiletés motrices au cours du développement de l'enfant (Smith & Thelen, 2003 ; Thelen and Smith, 1994 ; Van Hofsten et Lee, 1982). La conceptualisation du mouvement d'écriture en termes d'oscillateurs couplés (Athènes *et al.*, 2004) a permis de disposer d'une variable pertinente, la phase relative, pour capturer l'état de coordination et son évolution au niveau ontogénétique. En 1992, Berninger et Rutberg ont montré que la manière de coordonner ses mouvements dans le tapement successif des doigts permet d'obtenir de bonnes prédictions sur le début de l'apprentissage de l'écriture. De la même manière, la dynamique de la coordination graphomotrice dans la reproduction de formes elliptiques représente également un indicateur pertinent pour comprendre et prédire les régularités dans la formation de la trace écrite.

4.4.5. Perspectives – de la graphomotricité à l'écriture

De par les contraintes temporelles (écrire vite) et spatiales (écrire des formes conventionnelles) supplémentaires, écrire des lettres et des mots nécessite la formation de trajectoires d'écriture aux apparences bien plus complexes que la formation de simples trajectoires elliptiques. Comment la coordination graphomotrice détermine-t-elle la formation de trajectoires préférentielles d'écriture à proprement parlé? La modélisation de Hollerbach (1981) revisitée à la lumière des théories des patrons dynamiques (Kelso, 1995, 2009) nous permettra de comprendre les processus de formation, de changement et de détérioration de l'écriture.

CHAPITRE V

- Discussion générale -

Vers une dynamique de coordination de l'écriture

5.1. Vers une modélisation oscillatoire dynamique de la trace écrite

5.1.1. Du modèle classique...

Comme présenté dans le chapitre II, Hollerbach (1981) a proposé un modèle de l'écriture à partir de l'activité oscillatoire des deux composantes principales orthogonales (Pour des détails, voir le paragraphe 2.3.1, p. 51). En modifiant les paramètres de chaque composante au cours du temps, des séries de boucles ou de vagues sont produites de telle manière à former des mots. Selon Hollerbach (1981), le changement des paramètres de chaque composante oscillatoire s'effectue à des moments particuliers, à savoir quand la vitesse verticale s'annule. Au moment où la vitesse verticale s'annule, la vitesse horizontale se calcule par l'équation suivante :

$$\dot{x} = c - A_x * \sin(\varphi_x - \varphi_y) \quad 5.1$$

où c correspond à la constante de translation vers la droite, A_x à l'amplitude de l'oscillation horizontale et $\varphi_x - \varphi_y$ à la différence de phase entre les deux oscillations.

La production de boucles telles que des e ou des ℓ résulterait d'une vitesse horizontale négative alors que la production de u résulterait d'une vitesse horizontale nulle (en additionnant simplement la constante de déplacement vers la droite c).

La modélisation de Hollerbach (1981) offre comme principal intérêt la construction de mots uniquement à partir de la concaténation de plusieurs traces construites par la modulation d'un faible nombre de paramètres des oscillateurs horizontal et vertical, précisément aux moments où la vitesse verticale s'annule. Dans ce modèle, l'unité fondamentale de l'écriture correspond à la trace produite entre deux points successifs où la vitesse verticale s'annule.

La Figure 44 illustre l'exemple du mot « *mam* » écrit à partir de la concaténation de 15 unités fondamentales créées selon la modulation des paramètres de chaque oscillateur où la vitesse verticale s'annule. Ces paramètres sont répertoriés dans la table 1 qui suit.

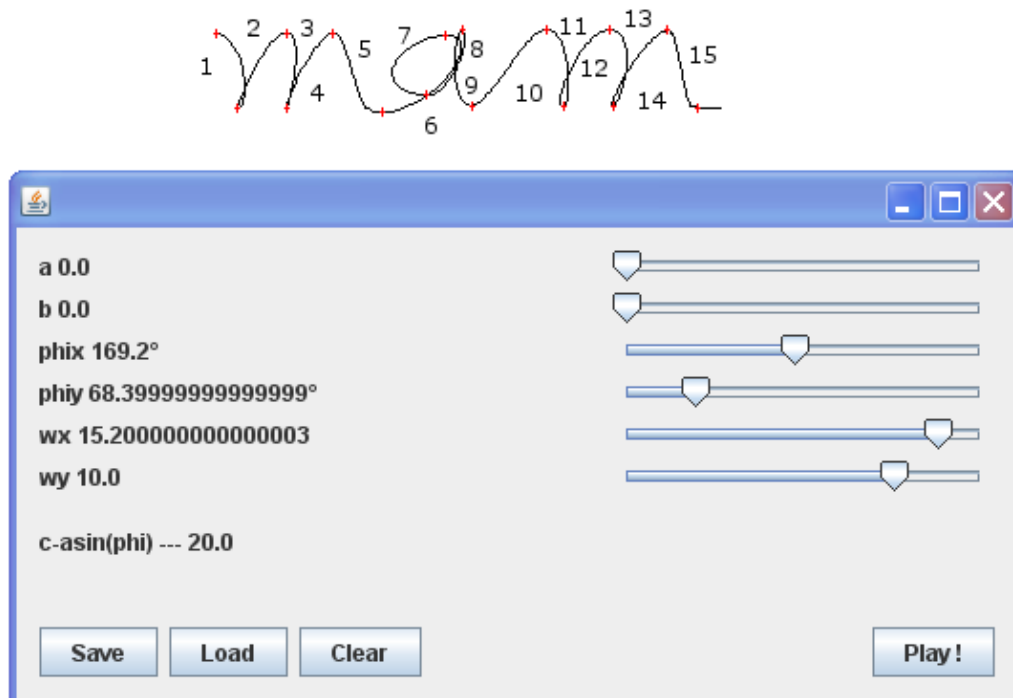


Figure 44 : Mot « mam » produit par la modulation des paramètres de 15 unités fondamentales délimitées par les moments où la vitesse verticale s'annule matérialisés par les points rouges. En dessous du mot, représentation de la fenêtre de paramétrage. Cette fenêtre est une interface graphique qui permet de créer des mots à partir des modulations des paramètres de chaque composante oscillatoire.

Table 1

Unités fondamentales	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
a	46	40	40	40	10	100	124	34	38	52	52	52	52	52	2
b	100	100	100	100	100	100	78	78	100	100	100	100	100	100	100
φ_x	90	144	144	144	72	208,8	208,8	208,8	176,4	180	180	72	72	93,6	93,6
φ_y	180	180	180	180	180	154,8	144	144	115,2	126	126	126	126	126	126
wx	10	10	10	10	4,8	10	10	10	10	5,6	5,6	10	10	10	10
wy	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
c-asin(phi)	63,75	-43,5	-43,5	-43,5	39,02	-60,9	-92,2	-10,76	-13,3	-22,07	-22,07	62,07	62,07	47,86	21,07

Hollerbach postule que le SNC contrôle de manière indépendante les paramètres de phase et d'amplitude de chaque composante x et y (φ_x , φ_y , a et b). Cependant, deux premières limites de ce modèle sont à relever :

1. A partir de l'observation empirique de la formation de la majorité des lettres, Hollerbach postule une taille de l'unité de base uniquement aux moments où la vitesse verticale s'annule. Nous pouvons nous demander 1) comment le SNC repère-t-il ces moments particuliers et 2) pourquoi ne considérerait-il pas d'autres moments comme par exemple ceux où la vitesse horizontale s'annule en plus ou à la place de ceux choisis dans le modèle.
2. Cet auteur postule que la translation de l'écriture de la gauche vers la droite s'effectue à partir d'un vecteur additionnel sur l'axe horizontal. Si cette constante additionnelle peut avoir une origine ou une signification sur le plan culturel, elle n'a aucune utilité en termes de formation de trajectoire. En effet, le modèle tel que peut créer toutes les trajectoires d'écriture sans cette composante additionnelle. Si la qualité d'un modèle dépend de sa simplicité, alors, le réduire à un minimum de paramètres pour obtenir le même résultat ne peut le rendre que meilleur.

5.1.2. ... à un modèle perfectionné

Des solutions peuvent palier les limites du modèle de Hollerbach (1981). Par exemple, une piste est proposée par André et Buisson (données non publiées) qui formulent un modèle oscillatoire alternatif avec deux apports principaux :

- Pour la simplification et la symétrie du modèle originel, ce modèle perfectionné spécifie les modulations des oscillations verticales (amplitude, phase et fréquence) entre deux annulations de la vitesse verticale et les modulations des

oscillations horizontales entre deux annulations de la vitesse verticale. Ainsi, des segments plus petits peuvent être créés.

- La constante de translation c a été supprimée.

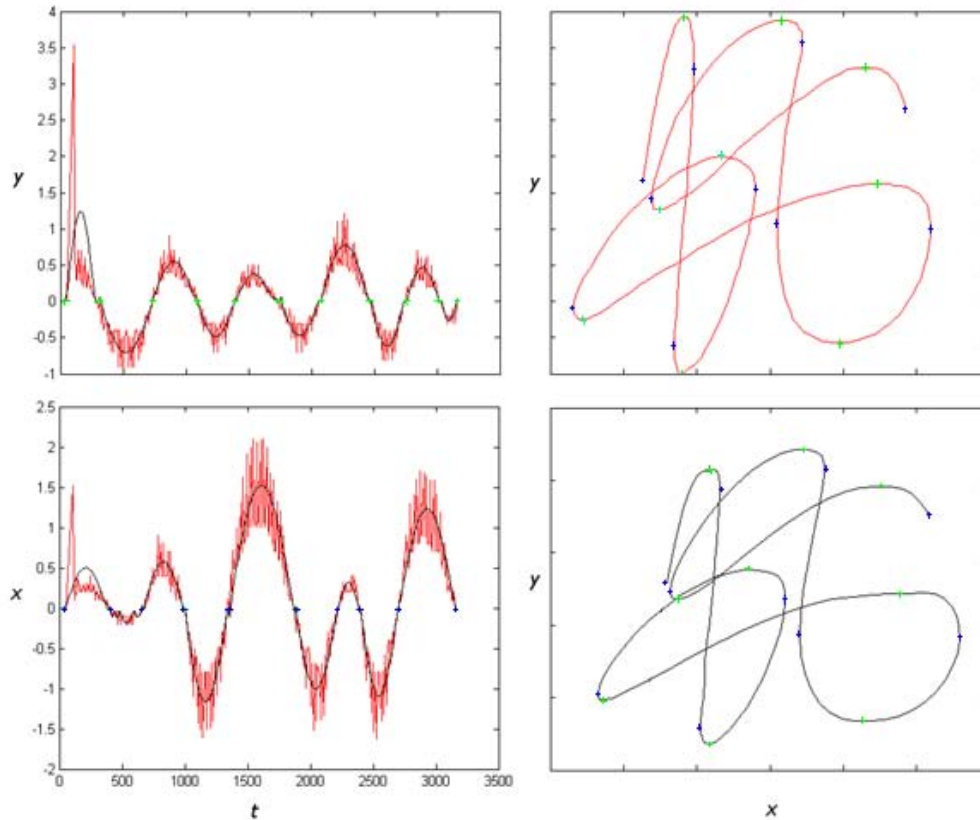


Figure 45 : Reconstruction d'une trajectoire complexe (en noir) à partir de l'enregistrement des paramètres d'une trace produite (en rouge) à chaque demi-cycle des composantes déterminé par l'annulation des vitesses verticales (points verts) et horizontales (points bleus).

Ce modèle fonctionne en deux étapes. Dans un premier temps, il extrait les trois paramètres de chaque composante (x et y) après avoir repéré les instants d'annulation de la vitesse de celles-ci. Dans un second temps, il reconstruit une trace à partir des paramètres extraits. Comme nous pouvons le voir sur la Figure 45, il présente comme intérêt la reconstruction de n'importe quelle trajectoire produite à partir du calcul de l'amplitude, de la phase et de la fréquence de chaque oscillateur avec une étonnante qualité de reproduction.

L'ergonomie, l'accessibilité et la qualité du modèle le rendent particulièrement intéressant car l'ensemble des caractéristiques spatio-temporelles de la trace sont conservées. De plus, contrairement au modèle de Hollerbach où la progression gauche-droite induisait la production de mots, ce modèle perfectionné (re)construit toutes les trajectoires. Enfin, une différence fondamentale entre les deux modèles est à noter dans la dépendance entre les deux

oscillateurs. Dans ce modèle perfectionné, les modulations d'un des deux oscillateurs ne peuvent s'effectuer qu'à des moments où il n'est plus possible de moduler les paramètres d'oscillations de l'autre oscillateur. Ainsi, la construction d'une unité de segmentation dépend de l'unité précédente ou plus exactement de la paramétrisation de l'autre oscillateur à l'unité précédente. Autrement dit, il n'est plus possible avec ce modèle de produire n'importe quelle trace indépendamment de la trace antérieure, même si, rappelons-le, la modulation de chaque oscillateur est complètement indépendante et la (re)construction de la trace résulte d'une combinaison linéaire entre les deux composantes oscillatoires.

5.1.3. ... Vers une modélisation dynamique ?

Comme nous l'avons vu, il est établi que certaines traces sont préférentielles, c'est-à-dire plus précises et plus faciles à écrire que d'autres (Meulenbroek & Thomassen, 1991 ; Van Sommers, 1984). Ces préférences résultent d'une coordination, c'est-à-dire d'une « mise en ordre mutuelle » (au sens étymologique du mot « co-ordination ») entre les très nombreux éléments impliqués dans le geste graphique (Athènes *et al.*, 2004 ; Sallagoïty *et al.*, 2004). Nous envisageons la coordination graphomotrice comme un processus génératif de patron de coordination qui assure une dépendance mutuelle entre les deux dimensions de la trajectoire. Par conséquent, nous pouvons faire l'hypothèse qu'un modèle de couplage non-linéaire entre les deux composantes de la trajectoire (x et y) rend compte des préférences et des contraintes d'écriture. Alors, en considérant la phase relative comme la variable collective qui rend compte du processus de coordination mis en place pour générer la trace, serait-il possible de prendre en considération les patrons préférentiels de coordination graphomotrice dans la modélisation oscillatoire de l'écriture ? Il s'agit ici d'envisager l'écriture comme la concaténation de traces générées et déterminées par la phase relative. Ces traces constitueraient l'unité fondamentale de l'écriture et le passage d'une unité à l'autre résulterait d'un changement de la phase relative.

5.2. La phase relative comme unité fondamentale de l'écriture

Nos expériences antérieures ont montré que le phénomène de couplage entre ces deux composantes oscillatoires rend compte de tracés préférentiels dans l'ensemble des composantes de la formation de trajectoire à savoir l'orientation, l'excentricité et, dans une moindre mesure, le sens de rotation de la trace (Danna *et al.*, sous presse). En reprenant le

modèle de Hollerbach (1981) et les préférences de couplage entre ces deux oscillateurs orthogonaux chez l'adulte et l'enfant, la Figure 46 illustre comment la modification d'une phase relative stable peut affecter les propriétés spatiales de la trace écrite, et plus précisément, rendre compte des différences d'écriture connues entre l'enfant et l'adulte.

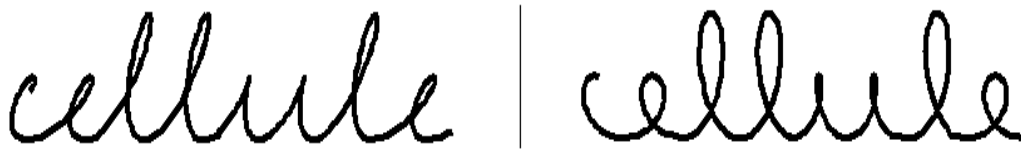


Figure 46 : Modélisation de l'écriture cursive d'un mot à partir des couplages préférentiels chez l'adulte et l'enfant. A gauche, le mot est écrit avec une PR à 45° (préférentielle chez l'adulte), à droite le même mot écrit avec une PR à 90° (préférentielle chez l'enfant).

Notons que dans cet exemple de tracé du mot « cellule », la même phase relative est maintenue entre le début et la fin du mot, seuls l'amplitude et la constante de déplacement changent pour tracer les *l* et le *u*. Les concepts et notions de l'approche des systèmes dynamiques dans l'étude des phénomènes d'hystérèse et de transition de phase nous amène à faire l'hypothèse que le changement de phase relative ne s'effectuerait qu'en réponse à une contrainte non spécifique (e.g., la fréquence) ou spécifique (e.g., le changement intentionnel).

5.2.1. D'une unité à l'autre : transition spontanée et transition intentionnelle

Le paradigme de Kelso (1981, 1984) est l'exemple prototypique du passage d'une dynamique de coordination bistable (avec 0° et 180° comme patrons préférentiels) à une dynamique de coordination monostable (avec 0° comme patron préférentiel) qui survient quand une contrainte (ici, la fréquence de mouvement) dépasse un seuil critique. Le modèle HKB permet d'observer et de prédire ce type de transition spontanée du paysage dynamique dans une tâche de coordination motrice à partir de l'observation de la stabilité de couplage entre les membres coordonnés en fonction de l'évolution de contraintes requises par la tâche et l'environnement (Haken *et al.*, 1985, détaillé dans le chapitre II).

Si l'adaptation des êtres vivants est envisagée par leur capacité d'apprendre de nouveaux patrons de coordination (Zanone & Kelso, 1992, 1997) ou de stabiliser des patrons de coordination instables (Fink, Foo, Jirsa & Kelso, 2000), il ne faut pas oublier leur capacité à changer intentionnellement leurs patrons de coordination (Carson, Goodman, Kelso & Elliott, 1994 ; Scholz & Kelso, 1990). Les prédictions théoriques concernant l'influence de la

dynamique de coordination spontanée sur les capacités à passer intentionnellement d'un patron à un autre proviennent d'un complément du modèle HKB (Haken *et al.*, 1985) dans lequel le rôle de l'intention est incorporée (Schöner & Kelso, 1988a). L'objectif de cette extension n'est pas seulement de déterminer comment l'intention peut modifier la dynamique spontanée mais surtout de déterminer en retour comment cette dynamique spontanée influence et contraint ce changement intentionnel entre les patrons. Théoriquement, le temps que met le système pour passer d'un patron à l'autre dépend de la stabilité de ces deux patrons de coordination. Par exemple, retournons aux résultats comportementaux des expériences de Kelso (1984) dans le cadre de la coordination bimanuelle. De par la plus grande stabilité du patron en phase, « sortir » intentionnellement de ce mode de coordination préférentiel devrait être plus coûteux et donc prendre plus de temps que « sortir » intentionnellement d'un autre patron de coordination. Par contre, « rentrer » intentionnellement dans ce mode de coordination préférentiel devrait être moins coûteux et plus rapide. Ainsi, le patron de coordination en antiphase étant moins stable que le patron en phase, la transition intentionnelle du patron 180° vers 0° est plus rapide que la transition intentionnelle du patron 0° vers 180° (Kelso, Scholz, & Schöner, 1988 ; Scholz & Kelso, 1990). Dans ce sens, l'identification de la dynamique de coordination spontanée permet de proposer des prédictions concernant leurs capacités d'adaptation en réponse à une contrainte non spécifique (e.g., la fréquence) ou spécifique (e.g., le changement intentionnel)⁷.

5.2.2. Conséquences en graphomotricité et en écriture

5.2.2.1. Transition intentionnelle

L'écriture est un acte de production individuelle en référence à une norme. Elle ne correspond pas seulement à la production de formes graphiques indépendantes les unes des autres. Les boucles ou les traits sont liés afin de produire une succession de lettres désirées et ainsi former un mot. Selon le modèle de Hollerbach (1981), la production d'un mot s'effectuerait par le changement volontaire des paramètres de chaque composante oscillatoire à des moments particuliers (quand la vitesse verticale s'annule). D'un point de vue de l'approche dynamique de la coordination motrice, ce passage correspondrait à la transition intentionnelle d'un patron de coordination à un autre. Partant de ce postulat, les travaux de Sallagoity (Sallagoity, 2004 ; Zanone, Athènes, Sallagoity et Albaret, 2005) ont cherché à

⁷ Contrairement à la transition spontanée, la déstabilisation du patron initial dans la transition intentionnelle n'est pas précédée d'une augmentation des fluctuations de la variable collective.

démontrer que les transitions intentionnels entre les patrons graphomoteurs préférentiels dépendent de leur stabilité respective à partir de l'étude du temps de transition entre les différents patrons préférentiels. Utilisant le paradigme de "switching intentionnel" (Scholz, Kelso & Schöner, 1987), quatre patrons graphomoteurs préférentiels dans les deux scans (oblique et cardinal) ont été choisis (à 0°, 45°, 135° et 180° de PR⁸). Les transitions étudiées étaient de 0° à 180°, de 0° à 45°, de 0° à 135°, de 45° à 180°, de 45° à 135°, et de 135° à 180°. L'hypothèse était que quels que soient les patrons impliqués dans la transition, le temps de passage d'un patron plus stable vers un patron moins stable sera plus long que la transition dans le sens inverse. Les résultats ont montré que :

1. Quelle que soit la transition considérée, le temps pour passer d'un patron plus stable vers le patron moins stable est significativement plus long que de passer d'un patron moins stable vers un patron plus stable.
2. Quelle que soit la transition considérée, le temps de passage d'un patron à un autre est significativement plus long quand les deux patrons n'ont pas la même orientation, par exemple, le temps de transition est plus long de 0° à 135° que de 0° à 45°. Ce temps supplémentaire d'environ 100 ms serait à mettre en lien avec un problème de recrutement et/ou de suppression de ddl (Buchanan, Kelso, de Guzman & Ding, 1997 ; Fink, Kelso, Jirsa, & de Guzman, 2000) impliqué dans le changement d'orientation (Sallagoity, 2004).

L'ensemble de ces résultats indiquent que le changement de patrons de coordination peut être décrit et prédit par l'évolution de la phase relative. Comme dans le cas de la coordination bimanuelle (Kelso & Schöner, 1988a ; Scholz & Kelso, 1990) ou de la formation de trajectoire en 2D (de Guzman, Kelso & Buchanan, 1997), la formation de patrons graphiques stables ainsi que le passage intentionnel d'un patron graphique à un autre pourraient être modélisés et prédits par l'approche dynamique de la coordination motrice.

5.2.2.2. *Transition spontanée*

Les concepts et notions de l'approche des patrons dynamiques nous permettent de comprendre que la préférence résulte de la stabilité des patrons de coordination (Kelso, 1995). En ce qui concerne l'écriture, si le changement d'un mode de coordination suite à une contrainte spécifique telle que l'intention provient de la perte de stabilité complète d'un

⁸ En fait, les patrons à 0°, 53°, 127° et 180° avaient été choisis pour le scan cardinal mais les résultats entre les deux scans étant similaires, nous parlerons de 0°, 45°, 135° et 180° dans les deux scans pour une meilleure lisibilité.

Comme nous pouvons l'observer sur cette Figure, l'hypothèse que l'augmentation de contrainte de vitesse dans le tracé de mots biaise les patrons de coordination produits vers le patron le plus stable, c'est-à-dire en phase, est tout-à-fait envisageable.

5.3. Premières analyses de la dynamique de coordination de l'écriture

Comme disait Kapista, « la théorie est une bonne chose mais rien ne vaut une bonne expérience ». (Kapista, 1980, p. 160, notre traduction). Nous avons demandé à six adultes droitiers, âgés entre 21 et 29 ans et ne présentant aucun trouble du langage ni moteur, d'écrire le mot « cellule » à trois vitesses d'exécution : à vitesse faible, spontanée et élevée. Les participants devaient écrire le mot dans un rectangle de 14,5 cm de longueur sur 4,5 cm de largeur. Un rappel de l'orthographe du mot était donné avant chaque essai. Le même matériel et la même méthode de recueil des données ont été utilisés. A partir des coordonnées, une segmentation du mot a été effectuée pour déterminer la PR continue à chaque lettre. Cette segmentation s'est effectuée à partir de l'identification des vallées sur les ordonnées. Au total, sept PR ont été moyennées, une par lettre. Nous avons ensuite effectué une ANOVA (3 Vitesses × 7 Lettres) à mesures répétées sur la PR produites ainsi que sur la fréquence de production de chaque lettre. Une analyse plus fine des effets significatifs a été obtenue par des tests post-hoc de Newman-Keuls. Le seuil de significativité était fixé à $p < 0.05$.

Concernant l'analyse de la PR produite, l'ANOVA a révélé des effets principaux de la Vitesse et de la Lettre ($F(2,10) = 8.16, p < 0.01$ et $F(6, 30) = 20.39, p < 0.0001$, respectivement). Les résultats sont présentés sur la Figure 48. L'analyse post-hoc de l'effet Vitesse a indiqué que la PR produite à vitesse élevée est significativement plus faible que dans les deux autres conditions (46.7° versus $59,2^\circ$ et $65,7^\circ$). L'analyse post-hoc de l'effet Lettre a révélé que la PR produite à la première lettre est significativement plus élevée que la PR produite dans toutes les autres lettres.

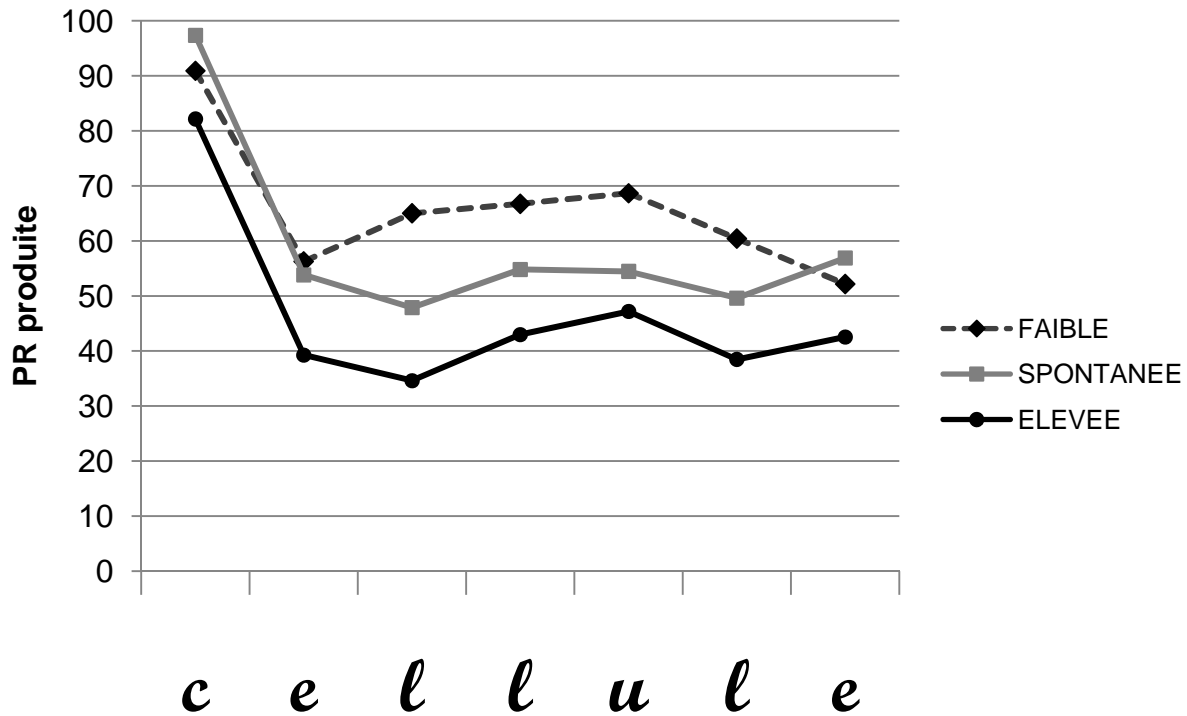


Figure 48 : Moyenne de la PR produite en fonction de chaque lettre composant le mot cellule selon des vitesses de production faible, spontanée et élevée.

Concernant l'analyse de la fréquence, l'ANOVA a révélé des effets principaux de la Vitesse et de la Lettre ($F(2,10) = 74.58, p < 0.0001$ et $F(6, 30) = 10.47, p < 0.0001$, respectivement) ainsi que l'interaction significative ($F(12, 60) = 4.23, p < 0.0001$). Les résultats sont présentés sur la Figure 49. L'analyse post-hoc de l'effet Vitesse a révélé une augmentation significative de la fréquence de production selon les trois conditions (de 1.1 Hz à vitesse faible à 2.5 Hz à vitesse spontanée et jusqu'à 4.14 Hz à vitesse élevée). L'analyse post-hoc de l'effet Lettre a révélé une fréquence plus importante pour la première lettre par rapport à toutes les autres lettres et une diminution significative de la fréquence de production de la lettre *u* par rapport aux trois premières lettres. L'analyse post-hoc de l'interaction a révélé une augmentation significative de la fréquence de production de chaque lettre en fonction des trois vitesses demandées sauf pour la lettre *u* où l'analyse ne révèle une différence significative qu'entre la condition vitesse faible et vitesse élevée.

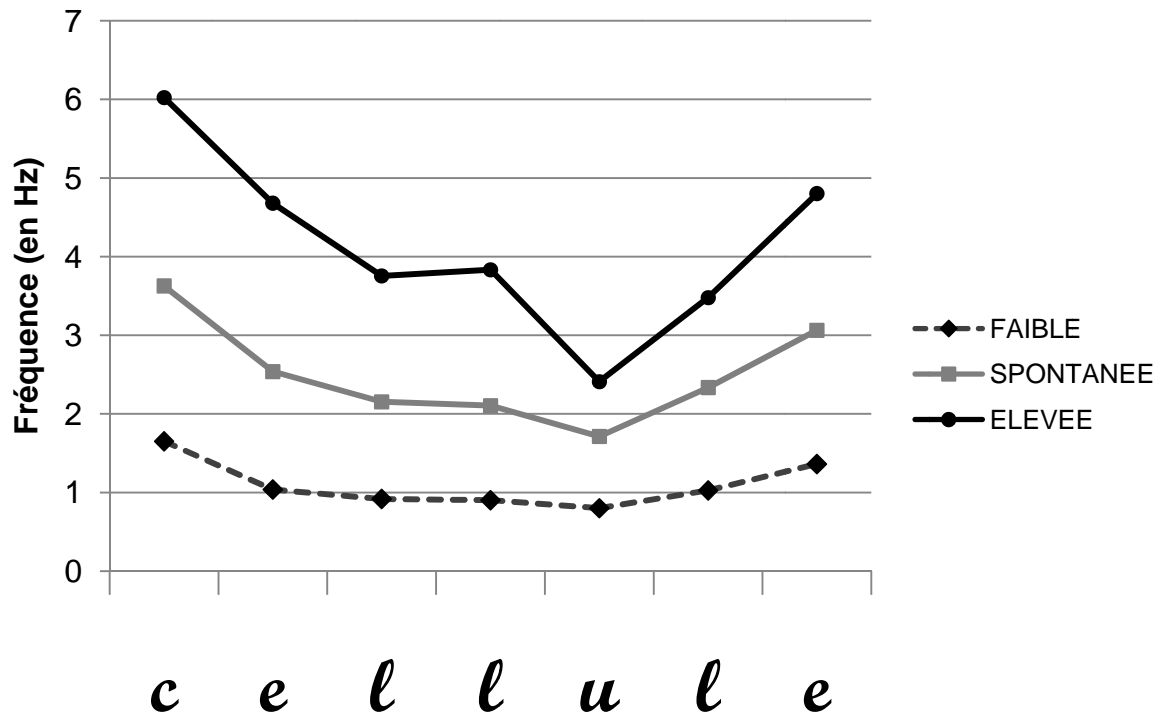


Figure 49 : Moyenne de la fréquence en fonction de chaque lettre composant le mot cellule selon des vitesses de production faible, spontanée et élevée.

Un premier résultat est que, mise à part la production de la première lettre autour de 90° de PR, toutes les lettres sont produites en maintenant sensiblement la même phase relative. Cette tendance à maintenir la même phase relative confirmerait les prédictions de l'approche des systèmes dynamiques sur le phénomène d'hystérèse. Un second résultat est que la PR produite ne diminue significativement que dans la condition de production à vitesse élevée. L'augmentation de la contrainte de vitesse déstabilise le patron de coordination autour de 60° en moyenne vers le patron à 45° , repéré par les précédentes expériences et l'étude princeps d'Athènes et collaborateur (2004) comme préférentiel.

Vitesse faible	<i>cellule</i>	<i>cellule</i>	<i>cellule</i>	<i>cellule</i>	<i>cellule</i>	<i>cellule</i>
Vitesse spontanée	<i>cellule</i>	<i>cellule</i>	<i>cellule</i>	<i>cellule</i>	<i>cellule</i>	<i>cellule</i>
Vitesse élevée	<i>cellule</i>	<i>cellule</i>	<i>cellule</i>	<i>cellule</i>	<i>cellule</i>	<i>cellule</i>

Figure 50 : Mot cellule produit par six adultes droitiers dans les trois vitesses demandées. L'encadré rouge signale la présence de boucles dans la production de la lettre u dû comme conséquence géométrique du maintien de la même phase relative.

Comme nous pouvons le constater, pour cinq participants sur six, la lettre *u* est produite en effectuant une boucle sur la première montée (voire même sur les deux montées chez deux participants). La présence de ces boucles est un indicateur du maintien de la phase relative la plus stable face à l'augmentation de la contrainte de vitesse, en dépit du changement de forme requise par la tâche. Comment expliquer ce maintien de la PR autour de 45° plutôt qu'une transition de phase vers le patron à 0° ? Rappelons que l'écriture du mot *cellule* résulte de lettres principalement composées de boucles. Le mot cellule avec une phase relative proche de 0° devient illisible car toutes les boucles disparaissent (voir l'exemple de la Figure 47, à vitesse la plus élevée). Nous pouvons supposer que la contrainte de lisibilité a empêché la déstabilisation du patron préférentiel autour de 45° qui permet encore de « faire une boucle ».

5.4. Perspectives de recherche

Le mot *cellule* n'a pas été choisi par hasard, mais parce qu'il résulte d'un rapport de fréquences entre les deux composantes orthogonales de 1:1. Or, l'ensemble des mots en écriture manuscrite est bien plus complexe, car la majorité des lettres et mots résultent d'un régime multifréquentiel entre les oscillations des composantes, c'est-à-dire différent de 1:1. Par exemple, dans l'écriture du chiffre 8, l'oscillateur *x* effectue deux cycles alors que l'oscillateur *y* effectue un seul cycle dans la même période, si bien que le rapport est en l'occurrence 2:1 (voir Figure 19 du chapitre II, p. 55). La synchronisation d'oscillateurs ayant chacun une fréquence propre différente de l'un s'effectue aussi par attraction de phase qui couple les deux cadences. Les principes régissant les systèmes multifréquentiels ainsi établis sont que :

1. les rapports de fréquence les plus simples sont les plus stables ;
2. l'ordre de préférence des rapports de fréquence suit l'arbre de Farey.

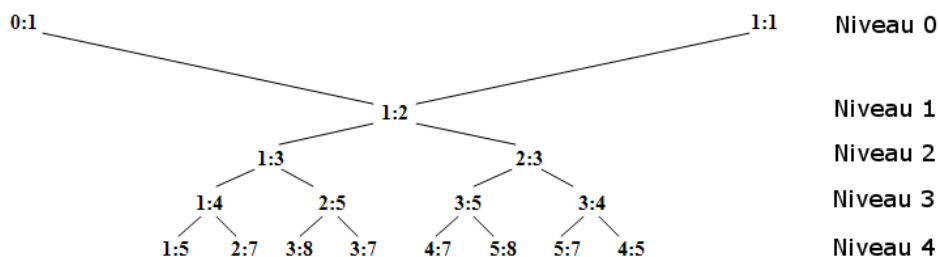


Figure 51 : Structure hiérarchisée des rapports de fréquence selon l'arbre de Farey (Tiré de Kelso, 1995, p. 122)

Comme le montre la Figure 51, la séquence de Farey représente la succession croissante de nombres rationnels p/q tel que $q \leq 8$ dans notre cas. Elle hiérarchise les nombres rationnels entre 0 et 1 de telle manière que la somme des numérateurs et des dénominateurs des nombres parents forment les niveaux successifs. Par exemple, 0:1 et 1:1 (Niveau 0) donne (0+1):(1+1) soit 1:2 (Niveau 1). Les branches du niveau 2 résultent de la somme des numérateurs et des dénominateurs des niveaux précédents à savoir 1:3 d'une part et 2:3 d'autre part. La construction des niveaux suivants s'effectue ensuite selon cette même récurrence appelée la suite de Fibonacci. La séquence de Farey est hiérarchique, c'est-à-dire qu'elle indique également le niveau d'accessibilité aux différents régimes de fréquence (Kelso, 1995 ; Peper *et al.*, 1995 ; Treffner & Turvey, 1993 ; Villard, Casties & Mottet, 2005). Théoriquement, le niveau 0 est plus facile à réaliser que le niveau 1, lui-même plus simple à réaliser que le niveau 2 etc.

Les principales expériences ont été menées sur des tâches de synchronisation avec un stimulus auditif en tapping (Boonstra *et al.*, 2007 ; Peper *et al.*, 1995 ; voir également Repp, 2005, pour une revue) et les résultats sont contradictoires. D'un côté, Treffner & Turvey (1993) ont montré que les rythmes simples sont plus stables que des polyrythmes suivant les rapports de Fibonacci. Ils ont également montré que les rapports appartenant à l'arbre de Farey sont plus facilement synchronisés que les rapports n'y appartenant pas. D'un autre côté, Repp (cité dans sa revue de 2005) a montré dans une tâche de tapping que les fréquences 1:5 et 1:7 ont un niveau de synchronisation bien meilleur que les fréquences 1:2, 1:3, 1:4 et 1:8 qui elles ne diffèrent pas significativement entre elles. Dans une tâche de coordination bimanuelle à l'aide d'un stimulus visuel tel que des figures de Lissajou, Kovacs, Buchanan & Shea (2010) ont montré que la coordination des deux mains à des fréquences 5:3 et 4:3 est aussi stable qu'à des fréquences 2:1 et 3:2. Enfin, en graphomotricité, Chan & Chan (1995) ont étudié une tâche de coordination graphomotrice bimanuelle où les participants devaient tracer des cercles avec une main et des traits verticaux ou horizontaux avec l'autre. Les résultats ont montré que l'interférence liée au tracé de traits sur le tracé de cercles était affecté par le rapport de fréquence comme indiqué par l'arbre de Farey. Autrement dit, l'interférence de la tâche de tracé de trait était la plus importante quand le rapport de fréquence était de 1:1 puis elle diminuait au rapport 1:2 puis 2:3.

En conclusion, la définition de l'unité fondamentale de l'écriture en termes de patrons de phase relative et de rapport de fréquence entre les composantes oscillatoires permet de décrire simplement, c'est-à-dire avec peu de variables, la formation de trajectoires

complexes, tel le tracé de nombreuses lettres, leur coarticulation et leur déformation en fonction des conditions d'exécution, des exigences de la tâche et des caractéristiques du scripteur. Une des nombreuses perspectives de recherche est donc d'étudier l'évolution du rapport de phase et de fréquence dans le tracé de formes complexes. Cela apporterait un nouvel éclairage pour comprendre comment évolue notre manière d'écrire.

Références bibliographiques

- Adi-Japha, E., & Freeman, N. H. (2001). Development of differentiation between writing and drawing systems. *Developmental Psychology*, *37*(1), 101-114.
- Ajuriaguerra, J., Auzias, M., Coumes, L., Lavondes-Monod, V., Perron, M., & Stambak, M. (1964). *L'écriture de l'enfant: Volume 1. L'évolution de l'écriture et ses difficultés*. Paris: Delachaux et Nestlé.
- Amazeen, P. G. (2002). Is dynamics the content of a generalized motor program for rhythmic interlimb coordination? *Journal of Motor Behavior*, *34*(3), 233-251.
- Amundson, S. J. (1995). *Evaluation Tool of children's Handwriting*. Homer: AK: OT KIDS.
- Anderson, S. W., Damasio, A. R., & Damasio, H. (1990). Troubled letters but not numbers: domain specific cognitive impairments following focal damage in frontal cortex. *Brain*, *113*, 749-766.
- Atchy-Dalama, P., Peper, C. E., Zanone, P. G., & Beek, P. J. (2005). Movement-related sensory feedback mediates the learning of a new bimanual relative phase pattern. *Journal of Motor Behavior*, *37*, 186-196.
- Athènes, S., Sallagoity, I., Zanone, P. G., & Albaret, J. M. (2004). Evaluating the coordination dynamics of handwriting. *Human Movement Science*, *23*, 621-641.
- Babcock, M. K., & Freyd, J. J. (1988). Perception of dynamic information in static handwritten forms. *The American Journal of Psychology*, *101*(1), 111-130.
- Baldissera, F., Borroni, P., Cavallari, P., & Cerri, G. (2002). Excitability changes in human corticospinal projections to forearm muscles during voluntary movement of ipsilateral foot. *Journal of Physiology*, *539*, 903-911.
- Baowang, L., Mattew, R. P., & Ralph, D. F. (2003). Oblique effect: a neural basis in the visual cortex. *Journal of Neurophysiology*, *90*, 204-217.
- Basso, A., Taborelli, A., & Vignolo, L. A. (1978). Dissociated disorders of speaking and writing in aphasia. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, *41*(6), 556-563.
- Baxter, D. M., & Warrington, E. K. (1986). Ideational agraphia: A single case study. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, *49*, 369-374.

- Berninger, V. W., & Rutberg, J. (1992). Relationship of finger function to beginning writing: application to diagnosis of writing disabilities. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 34(3), 198-215.
- Bernstein, N. A. (1947). *On the construction of movements*. Moscow: Medgiz (in Russian).
- Bernstein, N. A. (1967). *The co-ordination and regulation of movements*. Oxford, England Pergamon Press.
- Bertrand, C. (2006). *La graphologie pour mieux comprendre votre enfant*. Paris : Studyrana – Vocatis.
- Binet, A., & Courtier, J. (1893). Sur la vitesse des mouvements graphiques. *Revue philosophique*, XXXV, 664-671.
- Blau, T. H. (1977). The torque test: a measure of cerebral dominance. *JSAS Catalog of Selected Documents in Psychology*, 7, 16.
- Bluteau, J., Coquillard, S., Payan, Y., & Gentaz, E. (2008). Haptic guidance improves the visuo-manual tracking of trajectories. *Plos One* 3(3), e1775.
- Boonstra, T. W., Daffertshofer, A., Breakspear, M., & Beek, P.J. (2007). Multivariate time-frequency analysis of electromagnetic brain activity during motor learning. *Neuroimage*, 36, 370–377.
- Buchanan, J. J., Kelso J. A. S., & Fuchs, A. (1996). Coordination dynamics of trajectory formation. *Biological Cybernetics*, 74, 41-54.
- Buchanan, J. J., Kelso, J. A. S., de Guzman, G. C., & Ding, M. (1997). The spontaneous recruitment and suppression of degrees of freedom in rhythmic hand movements. *Human Movement Science*, 16, 1-32.
- Bullock, D., Grossberg, S., & Mannes, C. (1993). A neural network model for cursive script production. *Biological Cybernetics*, 70, 15-28.
- 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.
- Cadopi, M., & Viviani, P. (1984). L'espace du geste morphocinétique : relation entre amplitude et durée d'exécution du geste. *Comportements*, 1, 127-132.
- Camazine, S., Deneubourg, J.L., Franks, N.R., Sneyd, J., Theraulaz, G. & Bonabeau, E. (2003). *Self-Organization in Biological Systems*. Princeton: Princeton University Press.

- Carson, R. G., Goodman, D., Kelso, J. A. S., & Elliot, D. (1994). Intentional switching between patterns of interlimb coordination. *Journal of Human Movement Studies*, 27, 201-218.
- Chan, T., & Chan, K. (1995). Effect of frequency ratio and environmental information on spatial coupling: a study of attention. *Ecological psychology*, 7(2), 125-144.
- Chang, S. H., & Yu, N. Y. (2009). Characterization of motor control in handwriting difficulties in children with or without developmental coordination disorder. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 52(3), 244:250.
- Charles, M., Soppelsa, R., & Albaret, J.-M. (2003). *BHK - Echelle d'évaluation rapide de l'écriture chez l'enfant*. Paris: Editions et Applications Psychologiques.
- 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, 45-65.
- Chartrel, E., & Vinter, A. (2008). The impact of spatio-temporal constraints on cursive letter handwriting in children. *Learning and Instruction*, 18, 537-547.
- Collins, J. J., & Stewart, I. N. (1993). Coupled nonlinear oscillators and the symmetries of animals gaits. *Journal of Nonlinear Sciences*, 3, 349-392.
- Cratty, B. J., & Goldman, R. L. (1996). *Learning disabilities: Contemporary viewpoints*. Amsterdam: Harwood academic publishers.
- Danna, J., Athènes, S., & Zanone, P. G. (sous presse). Coordination Dynamics of Elliptic Shape Drawing: Effects of Orientation and Eccentricity. *Human Movement Science*.
- Danna, J., Wamain, Y., Kostrubiec, V., Tallet, J., & Zanone, P.G. (2010). Vers une prise en compte de la contrainte liée à l'effecteur dans la dynamique de coordination graphomotrice. *Psychologie Française*, 55 (2), 171-180.
- Decety, J., & Michel, F. (1989). Comparative analysis of actual and mental movement times in two graphic tasks. *Brain and Cognition*, 11, 145-148.
- de Guzman, G. C., Kelso, J. A. S., & Buchanan, J. J. (1997). Self-organization of trajectory formation: II. Theoretical model. *Biological Cybernetics*, 76, 275-284.
- Denier van der Gon, J. J., & Thuring, J. P. (1965). The guiding of human writing movements. *Biological Cybernetics*, 2, 145-148.
- Denier van der Gon, J. J., Thuring, J. P., & Strackee, J. (1962). A handwriting simulator. *Physics in Medical Biology*, 6, 407-414.
- Dooijes, E. H. (1983). Analysis of handwriting movements. *Acta Psychologica*, 54, 99-114.

- Dounskaïa, N., Van Gemmert, A. W. A., & Stelmach, G. E. (2000). Interjoint coordination during handwriting-like movements. *Experimental Brain Research*, *135*, 127-140.
- Du Pasquier-Grall, M.-A. (1990). L'évolution de l'écriture de l'enfant : point de vue clinique. Actes du colloque international du CNRS, Collège de France, Paris Mai 1988, *Bibliologia*, *10*, Brépols- Turnhout, 249-273.
- Edelman, S., & Flash, T. (1987). A model of handwriting. *Biological Cybernetics*, *57*, 25-36.
- Ellis, A. W., & Young, A. W. (1988). *Human cognitive neuropsychology*. Hove: Lawrence Erlbaum Associates Ltd.
- Engelbrecht, S. E. (2001). Minimum principles in motor control. *Journal of Mathematical Psychology*, *45*, 497-542.
- Faure, C. (2006). Préférences et variabilité dans les tracés de formes simples. *Actes du Coll. Int. Francophone sur l'Écrit et le Document, Fribourg, Suisse*, 163-168.
- Fayol, M., & Miret, A. (2005). « Écrire, orthographier et rédiger des textes ». *Psychologie Française*, *50*(3), 391-402.
- Feldman, A.G. (1974a). Change of muscle length due to shift of the equilibrium point of the muscle-load system. *Biofizika*, *19*, 534-538.
- Feldman, A.G. (1974b). Control of muscle length. *Biofizika*, *19*, 749-753.
- Fink, P.W., Foo, P., Jirsa, V., & Kelso, J. A. S. (2000). Local and global stabilization of coordination by sensory information. *Experimental Brain Research*, *134*, 9-20.
- Fink, P. W., Kelso, J. A. S., Jirsa, V. K., & de Guzman, G. C. (2000). Recruitment of degrees of freedom stabilizes coordination. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *26*(2), 671-692.
- Flash, T., & Hogan, N. (1985). The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model. *Journal of Neuroscience*, *5*, 1688-1703.
- Fleishman, E. A., & Rich, S. (1963). Role of kinesthetic and spatial-visual abilities in perceptual-motor learning. *Journal of Experimental Psychology*, *66*, 6-11.
- Gachoud, J. P., Mounoud, P., Hauert, C. A., & Viviani, P. (1983). Motor strategies in lifting movements: a comparison of adult and child performance. *Journal of Motor Behavior*, *15*(3), 202-216.
- Gander, W., Golub, G. H., & Strebel, R. (1994). Fitting of circles and ellipses least squares solution, *BIT Numerical Mathematics*, *34*, 558-578.
- Gentaz, E. (2009). *La main, le cerveau et le toucher*. Paris : Dunod.

- Gentaz, E., & Ballaz, C. (2000). La perception visuelle des orientations et l'effet de l'oblique. *Année Psychologique*, 100, 715-744.
- Gentaz, E., & Tschopp, C. (2002). The oblique effect in the visual perception of orientations. In: S. Shovov (Ed.), *Advances in psychology research*, 11 (pp. 137-163). New York, Nova Sciences Publishers.
- Gentner, D. R. (1982). Evidence against a central control model of timing in typing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 8(6), 793-810.
- Goodnow, J., & Levine, R. A. (1973). "The grammar of action": sequence and syntax in children's copying. *Cognitive Psychology*, 4, 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, 620-633.
- Grainger, J., Rey, A., & Dufau, S. (2008). Letter perception: from pixels to pandemonium. *Trends in Cognitive Science* 12(10), 381-387.
- Greer, K. L., & Green, D. W. (1983). Context and motor control in handwriting. *Acta Psychologica*, 54, 205-215.
- 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, 990-1046.
- Haken, H. (1983). *Synergetics: An introduction. Nonequilibrium phase transitions and self-organization in physics, chemistry, and biology*. Berlin and New York: Springer-Verlag.
- Haken, H., & Wunderlin, A. (1990). Synergetics and its paradigm of self-organization in biological systems. In H. T. A. Whiting, O. G. Meijer, & P. C. W. van Wieringen (Eds.), *The natural-physical approach to movement control*. Amsterdam: VU university press.
- Haken, H., Kelso, J. A. S., & Bunz, H. (1985). A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological Cybernetics*, 51, 347-356.
- Hamstra-Bletz, E., de Bie, J., & den Brinker, B. P. L. M. (1987). *Beknopte beoordelingsmethode voor kinderhandschriften* (Une méthode rapide d'évaluation de l'écriture chez l'enfant). Lise: Swets & Zeitlinger.
- Harris, T. L., & Rarick, G. L. (1959). The relationship between handwriting pressure and legibility of handwriting in children and adolescents. *Journal of Experimental Education*, 28, 65-84.

- Henderson, S. E., & Sugden, D. A. (1992). *Movement Assessment Battery for Children*. London: The Psychological Corporation.
- Hollerbach, J. M. (1981). An oscillation theory of handwriting. *Biological Cybernetics*, 39, 139-156.
- Hoyt, D. F., & Taylor, C. R. (1981). Gait and energetics of locomotion in horses. *Nature*, 292, 239-240.
- 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.
- Irigoin, J. (1990). L'alphabet grec et son geste des origines au IX^{ième} siècle après J.-C. In C. Sirat, J. Irigoin, & E. Poulle (Eds.), *L'écriture: le cerveau, l'oeil et la main*. *Bibliologia*, 10, 299-305.
- Jack, W. R. (1895). On the analysis of voluntary muscular movements by certain new instruments. *Journal of Anatomy and Physiology*, XXIX, 473-478.
- Jeannerod, M. (1988). *The neural and behavioral organization of goal-directed movements*. Oxford: Clarendon Press.
- Johansson, G. (1973). Visual perception of biological motion and a model for its analysis. *Perception and Psychophysics*, 14(2), 201-211.
- Kaiser, M.-L. (2009). *Facteurs endogènes et exogènes influençant l'écriture manuelle chez l'enfant*. Thèse non publiée, Université de Lausanne – UNIL, Lausanne et Université de Toulouse III – Paul Sabatier, Toulouse.
- Kant, I. (1790). *Kritik der urteilkraft* [The critique of judgement]. Berlin.
- Kapista, P. L. (1980). *Experiment, theory, practice*. Boston Studies in the Philosophy of Science, vol. 46.
- 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, 387-403.
- Kelso, J. A. S. (1981). On the oscillatory basis of movement. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 18, 63.
- Kelso, J. A. S. (1984). Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. *American Journal of Physiology: Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 15, 1000-1004.

- Kelso, J. A. S. (1994). The informational character of self-organized coordination dynamics. *Human Movement Science, 13*, 393-413.
- Kelso, J. A. S. (1995). *Dynamic patterns: The self-organization of brain and behavior*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Kelso, J. A. S. (2009). Coordination dynamics. In R. A. Meyers (Ed.), *Encyclopedia of complexity and system science*. Heidelberg: Springer.
- Kelso, J. A. S., & Zanone, P. G. (2002). The coordination dynamics of learning and transfer across effector systems. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 28*, 776-797.
- Kelso, J. A. S., Scholz, J. P., & Schöner, G. (1988). Dynamics governs switching among patterns of coordination in biological movement. *Physics Letters, 134(A)*, 8-12.
- Kelso, J. A. S., Holt, K. G., Kugler, P. N., & Turvey, M. T. (1980). On the concept of coordinative structures as dissipative structures: II. Empirical lines of convergence. In G. E. Stelmach & J. Requin (Eds.), *Tutorials in motor behavior* (pp. 49-70). New-York. North Holland.
- Kharraz-Tavakol, O. D., Eggert, T., Mai, N., & Straube A. (2000). Learning to write letters: transfer in automated movements indicates modularity of motor programs in human subjects. *Neuroscience Letters, 282(1-2)*, 33-36.
- Konzem, P. B. (1987). *Extended practice and patterns of bimanual interference*. Unpublished doctoral dissertation, University of Southern California, Los Angeles.
- Kostrubiec, V., & Zanone, P. G. (2002). Memory dynamics: distance between the task requirements and the closest stable patterns affects learning and recall in bimanual coordination. *Neuroscience Letters, 331*, 193-197.
- Kovacs, A. J., Buchanan, J. J., & Shea., C. H. (2010). Impossible is nothing: 5:3 and 4:3 multi-frequency bimanual coordination. *Experimental Brain Research, 201*, 249-259.
- Kugler, P. N., Kelso, J. A. S., & Turvey, M. T. (1980). On the concept of coordinative structures and dissipative structures: I. Theoretical line. In G. E. Stelmach & J. Requin (Eds.), *Tutorials in Motor Behavior* (pp. 3-47). Amsterdam: North-Holland.
- Lacquaniti, F., Terzuolo, C., & Viviani, P. (1983). The law relating the kinematic and figural aspects of drawing movements. *Acta Psychologica, 54*, 115-130.
- Lambert, E., & Espéret, E. (1996). Chunking phenomena in novice writers: Changes in lexical unit size, writing speed and pauses all along the first grade year, *Paper presented at the European Writing Conference*. Barcelone.

- Lanero, D. A., & Ringenbach, S. D. (2009). Factors influencing children's performances of a steady-state bimanual coordination task. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 80(2), 205-212.
- Lashley, K. S. (1930). Basic neural mechanisms in behavior. *Psychological Review*, 37, 1-24.
- Leclerc, F., Plamondon, R., & Lorette, G. (1992). Des gaussiennes pour la modélisation des signatures et la segmentation des tracés manuscrits. *Traitement du signal*, 9, 347-358.
- Lelivelt, A. B. M., Meulenbroek, R. G. J., & Thomassen, A. J. W. M. (1996). Mapping abstract main axes in handwriting to hand and finger joints. In M. L. Simner, C. G. Leedham, & A. J. W. M. Thomassen (Eds.), *Handwriting and Drawing Research: Basic and Applied Issues* (pp. 29-40). Amsterdam: IOS Press.
- Le Roux, Y. (2005). *Apprentissage de l'écriture et psychomotricité*. Marseille : Solal.
- Li, J. L., & Yeh, S. L. (2003). Do "Chinese and American see opposite apparent motions in a Chinese character"? Tse and Cavanagh 2000 replicated and revised. *Visual Cognition*, 10, 537-547.
- Longcamp, M., Hlushchuk, Y., & Hari, R. (2010). What differs in visual recognition of handwritten vs. printed letters? An fMRI study. *Human Brain Mapping*, 32: n/a.
- Longcamp, M., Lagarrigue, A., & Velay, J.-L. (2010). Contribution de la motricité graphique à la reconnaissance visuelle des lettres. *Psychologie Française*, 55, 181-194.
- 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.
- 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.
- Maarse, F. J., Schomaker, L. R. B., & Thomassen, A. J. W. M. (1986). The influence of changes in the effectors coordinate system on handwriting movements. In H. S. R. Kao, G. P. van Galen, & R. Hoosain (Eds.), *Graphonomics: Contemporary Research in Handwriting* (pp. 33-46). Amsterdam: North-Holland.
- Mergl, R., Tigges, P., Schröter, A., Möller, H.-J., & Hegerl, U. (1999). Digitized analysis of handwriting and drawing movements in healthy subjects: methods, results and perspectives. *Journal of Neuroscience Methods*, 90(2), 157-169.
- Merton, P. A. (1972). How we control the contraction of our muscles. *Scientific American*, 226, 30-37.
- Meulenbroek, R. G. J., & Thomassen, A. J. W. M. (1991). Stroke-direction preferences in drawing and handwriting. *Human Movement Science*, 10, 247-270.

- Meulenbroek, R. G. J., & Van Galen, G. P. (1986). Movement analysis of repetitive writing behaviour of first, second and third grade primary school children. In H. S. R. Kao, G. P. Van Galen, & R. Hoosain (Eds.), *Graphonomics: Contemporary research in handwriting* (pp. 71-91). Amsterdam: Elsevier.
- Meulenbroek, R. G., et Van Galen, G. P. (1988). The acquisition of skill handwriting: Discontinuous trends in kinematic variables. In A. M. Colley et J. R. Beechs (Eds.), *Cognition and action in skilled behavior*. Amsterdam: North-Holland.
- 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., Vinter, A., & Mounoud, P. (1993). Development of the start-rotation principle in circle production. *British Journal of Developmental Psychology*, 11, 307-320.
- Meulenbroek, R. G. J., Thomassen, A. J. W. M., Schillings, J. J., & Rosenbaum, D. A. (1996). Synergies and sequencing in copying L-shaped patterns. In M. L. Simner, C. G. Leedham, & A. J. W. M. Thomassen (Eds.), *Handwriting and Drawing Research: Basic and Applied Issues* (pp. 41-55). Amsterdam: IOS Press.
- Michel, F. (1971). Etude expérimentale de la vitesse du geste graphique. *Neuropsychologia*, 9, 1-13.
- Néda, Z., Ravasz, E., Vicsek, T., Brechet, Y. & Barabasi, A. L. (2000). Physics of the rhythmic applause. *Physical Review*, 61, 6987-6992.
- Neilson, P. D. (1993). The problem of redundancy in movement control: the adaptative model theory approach. *Psychological Research*, 55, 99-106.
- Nelson, W. L. (1983). Physical principles for economies of skilled movements. *Biological Cybernetics*, 46, 135-147.
- Niaudet, A. (1878). Plume électrique d'Edison. *La Nature : Revue des sciences et de leurs applications aux arts et à l'industrie*, 250, 324-326.
- Nihei, Y. (1984). Limit of duration of a generalized motor program for handwriting. *Tohoku Psychologica Folia*, 43(1-4), 846-849.
- O'Hare, A. E., & Brown, J. K. (1989). Childhood dysgraphia. Part 1. An illustrated clinical classification. *Child : Care, Health and Development*, 15, 79-104.
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9, 97-113.

- Orliaguet, J. P., Kandel, S., & Boë, L. J. (1997). Visual perception of motor anticipation in cursive handwriting: Influence of spatial and movement information on the prediction of forthcoming letters. *Perception* 26(7), 905–912.
- Paillard, J. (1990). Les bases nerveuses du contrôle visuo-manuel de l'écriture. In C. Sirat, J. Irigoin, & E. Poulle (Eds.), *L'écriture : le cerveau, l'œil et la main* (pp. 23-52), Turnhout : Brepols.
- Paine, R. W., Grossberg, S., & Van Gemmert, A. W. A. (2004). A quantitative evaluation of the AVITEWRITE model of handwriting learning. *Human Movement Science*, 23, 837-860.
- Panter, P. (1965). *Modulation, noise, and spectral analysis*. McGraw-Hill, New-York.
- Peper, C. E., Beek, P. J., & van Wieringen, P. C. W. (1995). Multifrequency coordination in bimanual tapping: A symmetrical coupling and signs of supercriticality. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21(4), 1117-1138.
- Phelps, J., & Stempel, L. (1988). *Children's Handwriting Evaluation Scale*. Dallas: CHES.
- Pick, H. L., & Teulings, H. L. (1983). Geometric transformations of handwriting as a function of instruction and feedback. *Acta Psychologica*, 54, 327-340.
- Pikovsky, A., Rosenblum, M., & Kurths, J. (2001). *Synchronization. A universal concept in nonlinear sciences*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Plamondon, R. (1993). Looking at handwriting generation from of velocity control perspective. *Acta Psychologica*, 82(1-3), 89-101.
- Plamondon, R. (1995a). A kinematic theory of rapid human movements: Part I: Movement representation and generation. *Biological Cybernetics*, 72(4), 295-307.
- Plamondon, R. (1995b). A kinematic theory of rapid human movements: Part II: Movement time and control. *Biological Cybernetics*, 72(4), 309-320.
- Plamondon, R. (1998). A kinematic theory of rapid human movements: Part III: Kinetic outcomes. *Biological Cybernetics*, 78, 133-145.
- Plamondon, R., & Guerfali, W. (1998). The generation of handwriting with delta-lognormal synergies. *Biological Cybernetics*, 78, 119-132.
- Plamondon, R., Feng, C., & Woch, A. (2003). A Kinematic Theory of rapid human movement. Part IV: a formal mathematical proof and new insights. *Biological Cybernetics*, 89, 126-138.

- Portier, S. J., Van Galen, G. P., & Meulenbroek, R. G. J. (1990). Practice and the dynamics of handwriting performance: Evidence for a shift of motor programming load. *Journal of Motor Behavior*, 22(4), 474-492.
- Postel, J. (1993). *Dictionnaire de psychiatrie et de psychopathologie clinique*. Paris : Dunod.
- Préteur, Y., et Telleria-Jauregui, B. (1986). L'empan de copie comme un des indicateurs de l'acquisition de langue écrite chez des enfants de 5-8 ans. *Psychologie Scolaire*, 56, 5-29.
- Prigogine, I. (1978). Time, structure and fluctuations. *Science*, 201(4358), 777-785.
- Proteau, L. (1991). On the specificity of learning and the role of visual information for movement control. In L. Proteau & D. Elliott (Eds.), *Vision and Motor Control*. Amsterdam: Elsevier.
- Proteau, L., Marteniuk, R. G., Girouard, Y., & Dugas, C. (1987). On the type of information used to control and learn an aiming movement after moderate and extensive training. *Human Movement Science*, 6, 181-199.
- Raibert, M. H. (1977). Motor control and learning by the state-space model. *Technical Report, Artificial Intelligence Laboratory, MIT AI-TR-439*.
- Reisman, J. (1995). *The Minnesota Handwriting Test: Research edition*. Minneapolis: University of Minneapolis.
- Repp, B. H. (2005). Sensorimotor synchronization: a review of the tapping literature. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12(6), 969-992.
- Rosenblum, M. G., & Kurths, J. (1998). Analysing Synchronization Phenomena from Bivariate Data by Means of the Hilbert Transform. In H. Kantz, J. Kurths, & G. Mayer-Kress (Eds.), *Nonlinear Analysis of Physiological Data* (pp. 91-99). Berlin: Springer.
- Rosenblum, S., & Livneh-Zirinsky, M. (2008). Handwriting process and product characteristics of children diagnosed with Developmental Coordination Disorder. *Human Movement Science*, 27(2), 200-214.
- Rosenblum, S., Aloni, T., & Josman, N. (2010). Relationships between handwriting performance and organizational abilities among children with and without dysgraphia: A preliminary study. *Research in Developmental Disabilities*, 31, 502-509.
- Rosenblum, S., Weiss, P. L., & Parush, S. (2003). Product and process evaluation of handwriting difficulties: A review. *Educational Psychology Review*, 15, 41-81.
- Roux, F. E., Draper, L., Köpke, B., & Démonet, J. F. (2010). Who actually read Exner? Returning to the source of the frontal “writing centre” hypothesis. *Cortex*, 46(9), 1204-1210.

- Roux, F. E., Dufor, O., Giussani, C., Wamain, Y., Draper, L., Longcamp, M., & Démonet, J. F. (2009). The graphemic/motor frontal area Exner's area revisited. *Annals of Neurology*, 66(4), 537-545.
- Sallagoïty, I. (2004). *Dynamique de coordination spontanée de l'écriture*. Thèse non publiée, Université de Toulouse III – Paul Sabatier, Toulouse.
- Sallagoïty, I., Athènes, S., Zanone, P. G., & Albaret, J. M. (2004). Stability of Coordination Patterns in Handwriting: Effects of Speed and Hand. *Motor Control*, 8, 405-421.
- Sasaki, M. (1987). Why do Japanese write characters in space? *International Journal of Behavioral Development*, 10, 135-149.
- Schmidt, R.A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, 82, 225-260.
- Schmidt, R. A. (1976). The schema as a solution to some persistent problems in motor learning theory. In G. Stelmach (Ed.), *Motor control: Issues and trends* (pp. 41-65). New York: Academic Press.
- Schmidt, R. A. (1988). *Motor control and learning: A behavioral emphasis*. Champaign, Illinois: Human Kinetics (1st Ed., 1982).
- Schmidt, R. A., & Wrisberg, C. A. (2004). *Motor control and performance: A problem-based learning approach*. Champaign, Illinois: Human Kinetics (3rd Ed., 1982).
- Scholz, J. P., & Kelso, J. A. S. (1990). Intentional switching between patterns of bimanual coordination depends on the intrinsic dynamics of the patterns. *Journal of Motor Behavior*, 22, 98-124.
- Scholz, J. P., Kelso, J. A. S., & Schöner, G. (1987). Nonequilibrium phase transitions in coordinated biological motion: Critical slowing down and switching time. *Physics Letters*, 123(8), 390-394.
- Schöner, G. (1989). Learning and recall in a dynamic theory of coordination patterns. *Biological Cybernetics*, 62, 39-54.
- Schöner, G. (1994). From interlimb coordination to trajectory formation: Common dynamical principles. In S. Swinnen, H. Heuer, J. Massion, & P. Casaer (Eds.), *Interlimb Coordination: Neural, Dynamical, and Cognitive Constraints* (pp. 339-368). New York: Academic Press.
- Schöner, G., & Kelso, J. A. S. (1988a). A dynamic pattern theory of behavioral change. *Journal of Theoretical Biology*, 135, 501-524.

- Schöner, G., & Kelso, J. A. S. (1988b). A synergetic theory of environmentally-specified and learned patterns of movement coordination. I. Relative phase dynamics. *Biological Cybernetics*, 58, 71-80.
- Schöner, G., & Kelso, J. A. S. (1988c). A synergetic theory of environmentally-specified and learned patterns of movement coordination. II. Component Oscillator Dynamics. *Biological Cybernetics*, 58, 81-89.
- Schöner, G., Jiang, W.Y. & Kelso, J.A.S. (1990). A synergetic theory of quadrupedal gaits and gait transitions. *Journal of Theoretical Biology*, 135, 501-524.
- Schöner, G., Zanone, P. G., & Kelso, J. A. S. (1992). Learning as change of coordination dynamics: Theory and experiment. *Journal of Motor Behavior*, 24, 29-48.
- Selfridge, O.G. (1959) Pandemonium: a paradigm for learning. In D. V. Blake & A. M. Uttley (Eds.), *Proceedings of the Symposium on Mechanisation of Thought Processes* (pp. 511–529), H.M. Stationary Office.
- Siéroff, E. (2004). *Neuropsychologie: Approche cognitive des syndromes cliniques*. Paris : Armand Colin.
- Smethurst, C. J., & Carson, R. G. (2001). The acquisition of movement skills: practice enhances the dynamic stability of bimanual coordination. *Human movement science*, 20, 499-529.
- Smith, L. B., & Thelen, E. (2003). Development as a dynamic system. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(8), 343-348.
- Smith, M. J., & Mersereau, R. M. (1992). *Introduction to Digital Signal Processing. A Computer Laboratory Textbook*. New York, Wiley.
- Smyth, M. M., & Silvers, G. (1987). Functions of vision in the control of handwriting. *Acta Psychologica*, 65, 47-64.
- Soppelsa, R., & Albaret, J. M. (2004). *Batterie d'Evaluation du Mouvement chez l'Enfant*. Paris: Les Editions du Centre de Psychologie Appliquée.
- Sovik, 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.
- Tallet, J., Kostrubiec, V., & Zanone, P. G. (2008). The role of stability in the dynamics of learning, memorizing, and forgetting new coordination patterns. *Journal of Motor Behavior*, 40, 103-116.
- Teulings, H. L. (1996). Handwriting movement control. In S. W. Keele, & H. Heuer (Eds.), *Handbook of perception and action (Vol. 2)* (pp. 561–612). 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., & Van Galen, G. P. (1983). Preparation of partly precued movements: The size of movement units in handwriting. *Acta Psychologica*, 54, 165-177.
- 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. (1986). Invariants in handwriting: The information contained in a motor program. In H. S. R. Kao, G. P. Van Galen, & R. Hoosain (Eds.), *Graphonomics: Comtemporary Research in Handwriting* (pp. 305-315). Amsterdam: North-Holland.
- Thelen, E., & Smith, L. B. (1994). *A Dynamic Systems Approach to the Development of Cognition and Action*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Thomassen, A. J. W. M., & Meulenbroek, R. G. J. (1993). Effects of manipulation horizontal progression in handwriting. *Acta Psychologica*, 82, 329-352.
- Thomassen, A. J. W. M., & Meulenbroek, R. G. J. (1998). Low-frequency periodicity in the coordination of progressive handwriting. *Acta Psychologica*, 100, 133-144.
- Thomassen, A. J. W. M., & Teulings, H. L. (1983). Constancy in stationary and progressive handwriting. *Acta Psychologica*, 54, 179-196.
- 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., Schillings, J. J., & Steenbergen, R. G. J. (1996). Adaptative shifts in hand-finger coordination during handwriting across the page. In M. L. Simner, C. G. Leedham, & A. J. W. M. Thomassen (Eds.), *Handwriting and Drawing Research: Basic and Applied Issues* (pp. 15-27). Amsterdam: IOS Press.
- Thomassen, A. J. W. M., Meulenbroek, R. G. J., van Lieshout, P. H. M., & Swinnen, S. (1997). Phase relations among effector-segment and pen-tip movements in handwriting. In A. M. Colla, F. Masulli, & P. Morasso (Eds.), *Proceedings of the eighth biennial conference of the International Graphonomics Society* (Vol. 21-22). Genova: ART.
- Thoulon-Page, C. (2009). *La rééducation de l'écriture de l'enfant : pratique de la graphothérapie*. Issy-les-Moulineaux : Elsevier Masson SAS.

- Treffner, P. J., & Turvey, M. T. (1993). Resonance constraints on rhythmic movement. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *19*, 339-363.
- Tschopp-Junker, C., Gentaz, E., & Viviani, P. (2010). Effect of selective and distributed training on visual identification of orientation. *Experimental Brain Research*, *202*(3), 605-611.
- Tse, P., & Cavanagh, P. (2000). Chinese and Americans see opposite apparent motions in a Chinese character. *Cognition*, *74*, B27-B32.
- Tuller, B., & Kelso, J. A. S. (1985). Environmentally-specified patterns of movement coordination in normal and split-brain subjects. *Experimental Brain Research*, *75*, 306-316.
- van der Plaats, R. E., & Van Galen, G. P. (1991). Allographic variability in adult handwriting. *Human Movement Science*, *10*, 291-300.
- 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. (1980). Handwriting and drawing: a two-stage model of complex motor behavior. In: G.E. Stelmach and J. Requin (Eds.), *Tutorials in motor behavior* (pp. 567-579). Amsterdam : North Holland Publishing Company
- Van Galen, G. P. (1991). Handwriting: Issues for a psychomotor theory. *Human Movement Science*, *10*, 165-191.
- Van Hoftsen, C., & Lee, D. (1982). Dialogue on perception and action. *Human Movement Science*, *1*, 125-138.
- Van Mier, H. (2006). Developmental differences in drawing performance of the dominant and non-dominant hand in right-handed boys and girls. *Human Movement Science*, *25*, 657-677.
- Van Mier, H., & Hulstijn, W. (1993). The effects of motor complexity and practice on initiation time in writing and drawing. *Acta Psychologica*, *84*, 231-251.
- Van Sommers, P. (1984). *Drawing and cognition: Descriptive and experimental studies of graphic production processes*. New York: Cambridge University Press.

- Velay, J. L., Longcamp, M., Zerbato-Poudou, M. T. (2004). De la plume au clavier : est-il toujours utile d'enseigner l'écriture manuscrite ? In: E. Gentaz, & P. Dessus (Eds.), *Comprendre les apprentissages : sciences cognitives et éducation* (pp. 69–82). Dunod, Paris.
- Velay, J.-L., Hénin, F., Moulin, C., Thomas, T., Devos-Charles, I., & Habib, M. (2009). Handwriting Variability in children writing letters: a study in dyslexics, dysgraphics and proficient handwriters. *Advances in Graphonomics : Proceedings of IGS 2009*, 91-94.
- Villard, S., Casties, J.-F., & Mottet, D. (2005). Dynamic stability of locomotor respiratory coupling during cycling in humans. *Neuroscience Letters*, 383, 333-338.
- Viviani, P. (1986). Do units of motor action really exist? In H. Heuer & C. Fromm (Eds.), *Generation and Modulation of Action Patterns* (pp. 201-216). Berlin: Springer Verlag.
- Viviani, P. (1990). Motor-perceptual interactions: the evolution of an idea. In M. Piatelli Palarini (Ed.), *Cognitive science in Europe: issues and trends* (pp. 11-39). Golem.
- Viviani, P. (1994). Les habiletés motrices. In M. Richelle, J. Requin, & M. Robert (Eds.), *Traité de Psychologie Expérimentale - Tome I* (pp. 777-857). Paris: PUF.
- 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), 32-53.
- Viviani, P., & McCollum, G. (1983). The regulation between linear extent and velocity in drawing movement. *Neuroscience*, 10(1), 211-218.
- 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, 198-218.
- Viviani, P., & Stucchi, N. (1989). The effect of movement velocity on form perception: Geometric illusions dynamic displays. *Perception and Psychophysics*, 46(3), 266-274.
- Viviani, P., & Terzuolo, C. (1980). Space-time invariance in learned motor skills. In G. E. Stelmach & J. Requin (Eds.), *Tutorials in Motor Behavior* (pp. 525-533). Amsterdam: North-Holland.
- Viviani, P., & Terzuolo, C. (1982). Trajectory determines movement dynamics. *Neuroscience*, 7, 431-437.
- Volman, M. J., & Geuze, R. H. (2000). Temporal stability of rhythmic tapping "on" and "off the beat": a developmental study. *Psychological Research*, 63(1), 62-69.

- Von Holst, E. (1937/1973). *The behavioral physiology of animal and man*. Coral Gables, FL: University of Miami Press.
- Waber, D.-P., & Bernstein, J.-H. (1994). Repetitive graphomotor output in learning-disabled and nonlearning-disabled children: the repeated patterns test. *Developmental Neuropsychology*, *10*(1), 51-65.
- Wada, Y., & Kawato, M. (1995). A theory for cursive handwriting based on the minimization principle. *Biological Cybernetics*, *73*(1), 3-13.
- Wamain, Y., Kostrubiec, V., Longcamp, M., Tallet, J., Zanone, P. G. (2009). Does graphic shapes perception mirror handwriting patterns production? In: A. Vinter, J.-L. Velay (Eds.), *Advances in graphonomics*, International Graphonomics Society, France, pp. 202-205.
- Wamain, Y., Tallet, J., Zanone, P. G., & Longcamp, M. (2011). "Biological geometry perception": Visual discrimination of eccentricity is related to individual motor preferences. *PLoS ONE*, *6*(1): e15995.
- Weil, J. M., & Cunningham-Amundson, S. J. (1994). Relationship between visuomotor and handwriting skills of children in kindergarten. *The American Journal of Occupational Therapy*, *48*(11), 982-988.
- Wenderoth, N., & Bock, O. (2001). Learning of a new bimanual coordination pattern is governed by three processes. *Motor Control*, *5*(1), 23-35.
- Wertheimer, M. (1912). Experimentelle studien über das Sehen von bewegung [Experimental studies of the seeing of motion]. *Zeitschrift für Psychologie*, *61*, 161-265.
- Westheimer, G. (2003). Meridional anisotropy in visual processing: implications for a neural site of the oblique effect. *Vision Research*, *43*, 2281-2289.
- Wing, A. M. (1978). Response timing in handwriting. In G. E. Stelmach (Ed.), *Information Processing in Motor Control and Learning* (pp. 153-172). New York: Academic Press.
- Wing, A. M. (1980). The height of handwriting. *Acta Psychologica*, *46*, 141-151.
- Wing, A. M. (2000). Motor control: Mechanisms of motor equivalence in handwriting. *Current biology*, *10*, R245-248.
- Wing, A. M., Nimmo-Smith, I., & Eldridge, M. A. (1983). The consistency of cursive letter formations as a function of position in the word. *Acta Psychologica*, *54*, 197-204.
- 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* (pp. 294-320). Hillsdale: Erlbaum.

- Wright, C. E. (1993). Evaluating the special role of time in the control of handwriting. *Acta Psychologica*, 82, 5-52.
- Yamanishi, J.-I., Kawato, M., & Suzuki, R. (1980). Two coupled oscillators as a model for the coordinated finger tapping by both hands. *Biological Cybernetics*, 37, 219-225.
- Yasuhara, M. (1975). Experimental studies on handwriting process. *Rep. Univ. Electro-Comm.*, 25, 233-254.
- Zanone, P. G., & Kelso, J. A. S. (1992). Evolution of behavioral attractors with learning: Nonequilibrium phase transition. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, 403-421.
- Zanone, P.-G., & Kelso, J. A. S. (1994). The coordination dynamics of learning: theoretical structure and experimental agenda. In S. Swinnen, M. Heuer, J. Massion, & P. Casaer (Eds.), *Interlimb coordination: neural, dynamical and cognitive constraints* (pp. 461-490). San Diego: CA: Academic Press.
- Zanone, P. G., & Kelso, J. A. S. (1997). The coordination dynamics of learning and transfer: Collective and component levels. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23(5), 1454-1480.
- Zanone, P. G., Athènes, S., Sallagoity, I., & Albaret, J. M. (2005). Switching among graphic patterns is governed by coordination dynamics of handwriting. Proceedings of the 12th Conference of the International Graphonomics Society, Salerno, Italy, pp 255-260.
- Zesiger, P. (1995). *Ecrire: Approches cognitive, neuropsychologique et développementale*. Paris : PUF.
- Ziviani, J. (1984). Some elaboration on handwriting speed in 7 to 14 years old. *Perceptual and Motor Skills*, 58(2), 535-539.
- Ziviani, J. & Elkins, J. (1986). Effect of pencil grip on handwriting speed and legibility. *Educational Review*, 38, 247-257.

Auteur : Jérémy DANNA

Titre : Dynamique de coordination dans la formation de la trace écrite chez l'adulte et l'enfant

Directeur de thèse : Pier-Giorgio ZANONE

Laboratoire : Programme de Recherche Interdisciplinaire en Sciences du Sport et de Mouvement Humain (EA-4561), UFR STAPS – Toulouse III, Université Paul Sabatier

Discipline : Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives (STAPS)

Ecole doctorale : Comportement, Langage, Education, Socialisation et COgnition (CLESCO)

Résumé :

L'écriture est un mouvement parmi les plus complexes et les plus rapides de notre répertoire moteur. Elle requiert l'activité coordonnée de nombreux muscles et articulations du membre supérieur pour produire une succession de formes conventionnelles, des lettres, de manière suffisamment précise pour être reconnues. Ce travail de thèse a pour objectif de comprendre 1) comment les individus arrivent à contrôler et à coordonner l'ensemble des éléments du système moteur (ici graphomoteur) pour accomplir une telle tâche et 2) comment s'acquiert cette habileté motrice. Les concepts et outils de l'approche dynamique de la coordination motrice permettent d'envisager la formation de la trace écrite comme un processus auto-organisé qui répond aux modèles d'oscillateurs couplés. A partir de la modélisation de l'écriture en termes de couplage non linéaire de deux oscillateurs orthogonaux abstraits, la phase relative entre ces deux oscillateurs permet d'observer, de comprendre et de prédire la formation, le maintien et la dégradation de la trace écrite. Dans notre première étude, centrée sur la coordination graphomotrice adulte dans la reproduction de formes géométriques simples, nous avons confirmé qu'une ellipse d'excentricité intermédiaire et un trait sont plus faciles à tracer que toutes les autres formes elliptiques. Nous avons de plus montré que la production préférentielle d'ellipses d'excentricité intermédiaire est biaisée en faveur de formes plus arrondies lorsque leur orientation devient contraignante. Dans notre deuxième étude, centrée sur la coordination graphomotrice chez l'enfant de 7 à 11 ans, nous avons révélé que les enfants sont plus précis et plus stables dans le tracé de cercles que dans le tracé d'ellipses, préférentiel chez l'adulte. Nos résultats confirment que, comme tout mouvement rythmique coordonné, la stabilité des modes de coordination (grapho)motrice détermine la manière d'écrire.

Mots clés : Graphomotricité ; Théorie des patrons dynamiques ; Auto-organisation ; Coordination motrice ; Oscillateurs Couplés ; Ecriture