


## IMPRIMATUR

A l'issue de la soutenance de thèse, le Jury autorise l'impression de la thèse de Mme Emmanuelle Sciacca, candidate au doctorat en science forensique de l'Université de Lausanne en co-tutelle avec l'Université Paul Cézanne d'Aix-Marseille, intitulée

« Etude de mentions manuscrites apposées dans des conditions non conventionnelles »

Le Président du Jury



Professeur Christophe Champod

Lausanne, le 10 mai 2010

UNIVERSITE PAUL CEZANNE  
AIX-MARSEILLE III  
DOCTORAT DE GEOSCIENCES  
ET ENVIRONNEMENT

UNIVERSITE DE LAUSANNE  
ECOLE DES SCIENCES CRIMINELLES  
DOCTORAT EN SCIENCE FORENSIQUE

Emmanuelle SCIACCA  
Licence et Maîtrise de Biochimie (Marseille)  
DESS et DEA de Criminalistique (Lyon, Lausanne)

---

**ETUDE DE MENTIONS MANUSCRITES APOSEES DANS DES CONDITIONS NON  
CONVENTIONNELLES**  
(DANS LE CADRE DES ARTICLES 322-1 A 322-4 DU NOUVEAU CODE PENAL FRANÇAIS)

---

Thèse soutenue le 10 mai 2010  
A l'Université de Lausanne  
En vue de l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph. D)

*Disciplines :*

*Sciences de l'Environnement*

*Science Forensique*

Co-directeurs

Gilbert MILLE

Pierre MARGOT



THESE CRIMINALISTIQUE N°47  
ISBN 2-940098-51-4

UNIVERSITE PAUL CEZANNE  
AIX-MARSEILLE III  
DOCTORAT DE GEOSCIENCES  
ET ENVIRONNEMENT

UNIVERSITE DE LAUSANNE  
ECOLE DES SCIENCES CRIMINELLES  
DOCTORAT EN SCIENCE FORENSIQUE

Emmanuelle SCIACCA  
Licence et Maîtrise de Biochimie (Marseille)  
DESS et DEA de Criminalistique (Lyon, Lausanne)

---

**ETUDE DE MENTIONS MANUSCRITES APOSEES DANS DES CONDITIONS NON  
CONVENTIONNELLES**  
(DANS LE CADRE DES ARTICLES 322-1 A 322-4 DU NOUVEAU CODE PENAL FRANÇAIS)

---

Thèse soutenue le 10 mai 2010  
A l'Université de Lausanne  
En vue de l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph. D)

Co-directeurs

Gilbert MILLE

Pierre MARGOT

Composition du jury

Pr. Christophe CHAMPOD	Président	Suisse
Pr. Pierre MARGOT	co-Directeur	Suisse
Dr. Jean-Luc VELAY	co-Directeur	France
Mme Marie-Blanche LANGLOIS-PETER	Expert	France
Dr. Philippe SCHAAD	Expert	France
Dr. Raymond MARQUIS	Expert	Suisse

*Illustration de la couverture :*

Hommage à Kandinsky  
Montage photographique réalisé par Clélia Bontemps à  
partir de 13 tableaux de Wassily Kandinsky  
Publié le 9 juin 2006 dans <http://www.cleliart.over-blog.com>

*« N'appelle pas le médecin, je ne déraile pas. Je dis ce que je pense, c'est tout. »*

Simone de Beauvoir - Les Belles Images (1966)

# Remerciements

Je souhaiterais d'abord remercier,

Mes directeurs de recherche, les Professeurs Pierre Margot de l'Ecole des Sciences Criminelles de l'Université de Lausanne et Gilbert Mille de l'Université Paul Cézanne. Malgré la distance, ils ont su être là, m'encadrer, m'orienter et surtout me soutenir dans les choix qui ont jalonné ce parcours sinueux... Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde gratitude.

Les membres du jury de thèse, le Professeur Christophe Champod, le Docteur Raymond Marquis de l'Ecole des Sciences Criminelles de l'Université de Lausanne et Monsieur Philippe Schaad, Directeur du Laboratoire de Police Scientifique de Marseille pour avoir respectivement accepté de présider et de participer à ma soutenance, et pour m'avoir fait l'honneur de juger ce travail.

Madame Marie-Blanche Langlois-Peter, Ingénieur en chef de la section documents du Laboratoire de Police Scientifique de Marseille, pour m'avoir accueillie dans sa section et avoir fait en sorte que je m'y sente bien. Son expérience et ses conseils m'ont guidée tout au long de cette aventure.

Monsieur Jean-Luc Velay, chargé de recherches au CNRS, à l'Institut des Neurosciences Cognitives de la Méditerranée, pour avoir permis la mise en place et la réalisation des expériences. Merci de m'avoir donné l'impulsion nécessaire pour me lancer, ce petit rien supplémentaire qui ne m'a laissé aucun autre choix que de foncer. Merci pour tout le temps que vous avez accordé à mon travail et pour tous ces précieux conseils.

Monsieur Jean-Claude Gilhodes et tous les sujets, pour avoir respectivement accepté de collaborer et de participer aux nombreuses expériences. Merci d'avoir accepté les rudes conditions expérimentales que je leur ai imposées ! Merci à David.

Monsieur Philippe-Emmanuel Coiffait, ancien Directeur du Laboratoire de Police Scientifique de Marseille pour avoir accepté mon arrivée au laboratoire en 2004 et m'avoir

encouragée tout au long de ces années. A cette époque, tout était encore possible avec presque rien...

Mais également,

La Fondation Marcel Bleustein-Blanchet,  
Mesdames Anne de la Baume, Béatrice Netter-Leval et Nathalie Royer pour avoir cru en moi, et en particulier Anne pour la confiance qu'elle m'a accordée après cet entretien à Paris, en 2004. Dans ma tête c'est comme si c'était hier...  
Pour la Bourse de la Vocation qui m'a été décernée et qui m'a permis d'effacer ma dette avant même d'en voir la couleur!  
Pour m'avoir retenue pour représenter la Fondation lors de son cinquantenaire, en décembre 2009. C'était un réel honneur.

Le Centre National de la Recherche Scientifique,  
La Fondation du 450<sup>e</sup> anniversaire de l'Université de Lausanne,  
Et l'Institut National de Police Scientifique,  
Pour leur soutien financier ayant permis ma participation aux 13<sup>ème</sup> et 14<sup>ème</sup> Conférences de l'International Graphonomics Society, qui se tenaient à Melbourne en 2007 et Dijon en 2009.

Le Journal of Forensic Document Examiners et Patricia Fischer,  
Pour la parution de mon premier article dans une revue internationale, en 2009. Plus qu'une découverte, un réel enrichissement. A suivre en 2011...

L'International Graphonomics Society, Angelo Marcelli et Annie Vinter,  
L'Association of Forensic Document Examiners et Bonnie Schwid,  
Pour l'award du « Best Student Paper for Forensic Application » décerné en Septembre 2009.  
Quel encouragement...

Merci à tous mes répondants.

Merci enfin à tous ceux qui au cours de cette aventure, ont contribué à mon équilibre...  
et parfois à mon déséquilibre...

ISBN  
2-940098-51-4

## Résumé

Les experts forensiques en documents peuvent être confrontés à des écritures réalisées en conditions non conventionnelles. Ces circonstances atypiques pourraient être à l'origine d'une plus grande variabilité de la forme de l'écriture, en particulier lorsque des positions à priori inhabituelles du corps et / ou du support sont impliquées. En effet, en dépit de son aspect stéréotypé / standardisé évident, résultat d'un apprentissage par un modèle, notre écriture est caractérisée par une variabilité intrinsèque de la forme, qui évolue au cours du temps et qui, dans sa dimension qualitative, confère à l'écriture son caractère individuel. En d'autres termes, nous n'écrivons jamais deux fois de la même façon. Cette variabilité intra-individuelle (ou intra-variabilité) observée en condition conventionnelle, c'est-à-dire assis devant un support horizontal, pourrait augmenter en conditions non conventionnelles, par exemple dans une position inconfortable. Cela pourrait rendre plus difficile l'identification d'écrits apposés dans une condition non conventionnelle ou inconnue. Ne pas connaître les circonstances d'apposition d'une mention manuscrite ou ne pas s'interroger sur ces dernières, pourrait conduire l'expert à faire des erreurs d'appréciation. Et le simple fait d'étudier une trace sur laquelle le corps peut exercer une influence fait de l'expertise en écriture une spécialité qui se distingue des autres disciplines forensiques. En cela, la trace écrite diffère des autres types de traces "inanimées" (physiques, chimiques, biochimiques) considérées comme invariables (mais potentiellement sensibles à d'autres phénomènes tels que la température, la pression atmosphérique...). En effet, le mouvement d'écriture étant commandé et contrôlé par le cerveau, cela lui confère une certaine variabilité. Il est donc assez logique de penser que la connaissance des mécanismes neuroscientifiques à l'origine de ce mouvement facilitera la compréhension des phénomènes observés d'un point de vue forensique.

Deux expériences ont été menées afin de comparer les performances de sujets écrivant dans différentes conditions (conventionnelle vs. non conventionnelles). Les résultats ont montré que cinq des sept conditions non conventionnelles n'avaient pas d'impact significatif sur la variabilité d'écriture. L'ensemble des résultats fournit aux experts forensiques des pistes leur permettant de mieux appréhender les écritures rédigées dans des conditions inhabituelles.

### Mots-clés

Ecriture, intra-variabilité, inter-variabilité, conditions d'écriture, majuscule, minuscule.



# Table des matières

Liste des figures .....	4
Liste des tableaux .....	6
Liste des graphiques .....	7
Liste des diagrammes .....	8
Liste des abréviations .....	9
1. Résumé / Abstract .....	10
2. Introduction .....	14
<b>Partie théorique</b> .....	20
3. Approche globale : les graffitis urbains .....	20
3.1. Etat de l'art .....	20
3.1.1. Bref historique .....	20
3.1.2. Le tag : approche formelle .....	21
3.1.3. Le graff : approche formelle .....	23
3.1.4. Lieux .....	24
3.1.5. Supports .....	25
3.1.6. Technique .....	27
3.1.7. Spécificité du graphisme .....	28
4. Aspect forensique .....	33
4.1. Cadre légal .....	33
4.2. Etat de l'art .....	36
4.2.1. Documents de question / de comparaison .....	36
4.2.2. Variabilité .....	37
4.2.3. Influence de l'instrument scripturant .....	39
4.2.4. Influence du support .....	42
4.2.5. Influence de la position du corps .....	44
4.3. Démarche globale .....	45
5. Lien entre sciences forensiques et connaissances neuroscientifiques .....	47
6. Aspect neuroscientifique .....	50
6.1. Notions générales .....	50
6.1.1. Les structures nerveuses intervenant dans l'acte moteur .....	50
6.1.2. Les trois types de mouvements .....	51
6.1.2.1. Le mouvement réflexe .....	51
6.1.2.2. Le mouvement automatique .....	51
6.1.2.3. Le mouvement volontaire .....	51
6.1.2.4. Bilan .....	56
6.2. Modèles décrivant l'écriture .....	56
6.2.1. Evolution du concept de programme moteur .....	57
6.2.2. Approche neurocognitive .....	60
6.2.2.1. La psychologie cognitive .....	60
6.2.2.2. Modèles neurocognitifs .....	64
6.2.2.2.1. Démonstration de l'hypothèse d'équivalence motrice .....	67
6.2.2.2.2. Représentation de l'écriture au niveau cérébral .....	76
6.2.2.2.3. Lien entre la représentation des lettres et les mouvements permettant de les former .....	78
6.2.2.2.4. Composantes topocinétiques et morphocinétiques .....	79
6.2.3. Modèles computationnels de l'acte graphomoteur .....	82

6.2.3.1. Hypothèse de la moindre secousse .....	83
6.2.3.2. Modèle de Plamondon <i>et al.</i> (2003) .....	84
6.2.3.3. Modèle masse-ressort oscillatoire .....	84
6.2.4. Modèle dynamique de l'acte graphomoteur : théorie d'auto-organisation appliquée à l'écriture .....	85
7. Problématique.....	89
8. But de l'expérimentation .....	93
<u>Partie pratique</u> .....	94
9. Matériels.....	94
9.1. Tablette graphique .....	94
9.2. Sujets .....	95
9.3. Echantillon d'écriture .....	96
10. Méthodes .....	97
10.1. Expérience préparatoire .....	97
10.2. Première expérience .....	100
10.3. Deuxième expérience .....	101
10.4. Acquisition des données .....	104
10.5. Traitement des données .....	104
10.5.1. Première étape : segmentation .....	104
10.5.2. Deuxième étape : interpolation .....	106
10.5.3. Troisième étape : calcul du tracé moyen et de la variance moyenne.....	107
10.6. Méthode d'analyse des résultats : analyse de variance pour mesures répétées....	109
11. Résultats .....	113
11.1. Première expérience .....	113
11.1.1. Intra-variabilité .....	113
11.1.1.1. Mesure de l'intra-variabilité moyenne .....	113
11.1.1.2. Nombre de répétitions nécessaires pour mesurer l'intra-variabilité.....	114
11.1.1.3 Condition de référence <i>vs.</i> condition non conventionnelle .....	117
11.1.1.4. Majuscules / minuscules.....	118
11.1.2. Inter-variabilité .....	118
11.1.2.1. Mesure de l'inter-variabilité moyenne .....	118
11.1.2.2. Condition de référence <i>vs.</i> condition non conventionnelle .....	119
11.1.2.3. Majuscules / minuscules.....	119
11.1.3. Comparaison de l'intra et de l'inter-variabilités.....	119
11.1.3.1 Condition de référence <i>vs.</i> condition non conventionnelle .....	120
11.1.3.2. Majuscules / minuscules.....	120
11.2. Deuxième expérience .....	120
11.2.1. Intra-variabilité .....	120
11.2.1.1. Mesure de l'intra-variabilité moyenne .....	120
11.2.1.2. Effet de la posture .....	123
11.2.1.3. Effet de l'inclinaison.....	124
11.2.1.4. Interaction posture / inclinaison .....	125
11.2.1.5. Effet de la casse.....	126
11.2.2. Inter-variabilité .....	126
11.2.3. Comparaison de l'intra et de l'inter-variabilités.....	127
11.2.3.1. Condition de référence <i>vs.</i> condition non conventionnelle .....	127
11.2.3.2. Majuscules / minuscules.....	127
12. Discussion des résultats.....	128
12.1. Nombre de répétitions nécessaires pour estimer l'intra-variabilité .....	128
12.2. Conditions d'écriture et intra-variabilité.....	130

<b>12.3. Relations entre l'intra et l'inter-variabilités</b> .....	133
<b>12.4. Prise en compte de la trajectoire globale</b> .....	135
<b>13. Discussion générale</b> .....	137
<b>13.1. Lien avec les notions théoriques</b> .....	137
<b>13.1.1. Equivalence motrice</b> .....	137
<b>13.1.2. Niveau de stockage de l'information</b> .....	138
<b>13.1.3. Apprentissage</b> .....	139
<b>13.2. Perspectives</b> .....	141
<b>13.2.1. Mesure de distances</b> .....	141
<b>13.2.2. Possibilités d'exploitation des données fournies par la tablette</b> .....	142
<b>13.2.3. Complémentarité des approches</b> .....	142
<b>13.2.4. Fréquence d'apparition des lettres et combinaisons de lettres</b> .....	143
<b>14. Conclusion</b> .....	144
<b>Bibliographie</b> .....	146
<b>Annexes</b> .....	163

## Liste des figures

Figure 1 : Tracés réalisés en conditions non conventionnelles .....	14
Figure 2 : Tag réalisé à la bombe (Boulevard National, Marseille).....	22
Figure 3 : Tags réalisés au marqueur (a. Boulevard Franklin Roosevelt, Marseille) et à la bombe (b. Rue Jean Dussert, Marseille).....	23
Figure 4 : Graff réalisé à la bombe (Cours Julien, Marseille).....	24
Figure 5 : Graff réalisé à la bombe (Avenue des Chutes-Lavie, Marseille).....	25
Figure 6 : Graff réalisé à la bombe (Boulevard de la Libération, Marseille).....	26
Figure 7 : Tag réalisé au poska (Avenue Montcault, Marseille).....	28
Figure 8 : Tags réalisés au marqueur (Rue Ferdinand Rey, Marseille) et à la bombe (Avenue de Saint-Just, Marseille).....	30
Figure 9 : Inscriptions réalisées au marqueur (localisations diverses, Marseille).....	30
Figure 10a : Conservation du mode de formation des lettres quel que soit l'instrument scripturant utilisé (stylo à bille, stylo à pointe fibre et marqueur) .....	41
Figure 10b : L'épaisseur du trait peut parfois masquer le mode de formation d'une lettre .....	41
Figure 10c : Dans le cas d'un mode de formation particulier (« a »), l'examen du tracé au marqueur est insuffisant .....	41
Figure 11 : Ecriture retrouvée sur le ventre de la victime .....	42
Figure 12a : Inscriptions présentes sur le corps de la victime.....	43
Figure 12b : Comparaison des spécimens de question avec des spécimens spontanés appartenant à la victime.....	43
Figure 13 : (e) est la signature « normale » et (f) la signature rédigée debout avec une feuille de papier dans la main .....	44
Figure 14 : Vue d'ensemble des principales étapes impliquées dans la production d'écriture et variables correspondantes .....	48
Figure 15 : Les structures nerveuses intervenant dans l'acte moteur.....	50
Figure 16 : Face externe de l'hémisphère cérébral gauche .....	52
Figure 17 : Homunculus de Penfield (coupe verticale de l'hémisphère cérébral) .....	53
Figure 18 : Face externe de l'hémisphère cérébral gauche et face interne de l'hémisphère cérébral droit .....	54
Figure 19a : Séquence d'activation des aires motrices .....	55
Figure 19b : Séquence d'activation des aires motrices (coupe verticale de l'hémisphère cérébral).....	55
Figure 20 : Aires corticales du polygone du langage .....	56
Figure 21 : Les trois types de mouvements.....	56
Figure 22 : Temps de réaction mesurés dans trois conditions de rédaction (copie, pause, composition).....	62
Figure 23 : Exemple d'invariant spatial .....	65
Figure 24 : La forme générale d'un mot reste inchangée, au travers de différentes manières d'écrire .....	66
Figure 25 : Deux versions d'une même phrase .....	67
Figure 26 : Performances moyennes d'un sujet écrivant avec trois effecteurs différents.....	68
Figure 27 : Ecriture d'une femme tétraplégique .....	69
Figure 28 : Niveaux de traitement postulés dans la production de mouvements d'écriture, en aval des traitements linguistiques.....	70
Figure 29 : Modèle modulaire de l'écriture selon Van Galen (1991) .....	71

Figure 30 : Longueur des 12 traits initiaux composant un même mot, dans différentes conditions expérimentales .....	72
Figure 31 : Production d'une même lettre avec différents effecteurs .....	73
Figure 32a : Temps de préparation et d'exécution des lettres minuscules .....	77
Figure 32b : Temps de préparation et d'exécution des lettres majuscules .....	77
Figure 33 : Modèle de production de l'écriture selon Schomaker & Van Galen (1996) .....	78
Figure 34 : Ecriture spontanée d'un texte connu les yeux fermés et en conditions normales de vision .....	80
Figure 35 : Ecriture d'un patient déafferenté avec (en haut) et sans vision (en bas) (extrait de Teasdale, 1991) .....	81
Figure 36 : Catégorisation des connaissances selon Dolchy et Alexander (1995).....	82
Figure 37 : Notion de performance motrice intégrée .....	88
Figure 38 : Tablette graphique Wacom Intuos 2.....	94
Figure 39 : Phrase-test dictée à un sujet (papier libre / espace prédéfini).....	98
Figure 40 : Exemple d'acquisition (1 sujet, 1 condition).....	99
Figure 41a : Condition de référence .....	101
Figure 41b : Condition non conventionnelle.....	101
Figure 42 : Condition de référence (assis horizontal) et 7 positions non conventionnelles...	103
Figure 43 : Acquisition du mot « l'époque » (Programme Saisietrace®).....	104
Figure 44 : Trajectoire du mot « L'EPOQUE » avant segmentation (1sujet, 1 essai, CR) (Programme RunSeg®).....	105
Figure 45 : Trajectoire du mot « L'EPOQUE » après segmentation (1sujet, 1 essai, CR) (Programme RunSeg®).....	106
Figure 46 : Trajectoire moyenne du mot « L'EPOQUE » (■) et sa dispersion (□) (1sujet, 32 répétitions, CR) (Programme RunStats®).....	108
Figure 47 : Valeurs (x, y) impliquées dans le calcul d'intra et inter-variabilités (d'objets / debout / vertical).....	109
Figure 48 : Les progrès dus à l'apprentissage moteur.....	140

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Exemple de mesure de 11 critères topocinétiques (1 sujet) .....	98
Tableau 2 : 4 conditions testées lors de la 1 <sup>ère</sup> expérience .....	101
Tableau 3 : 16 conditions testées lors de la 2 <sup>ème</sup> expérience .....	102
Tableau 4 : Récapitulatif des 28 comparaisons possibles (□, ■) dont celles que l'on planifie	112
Tableau 5 : Intra-variabilité moyenne (u.a.) de chaque sujet (32 répétitions) et des 12 sujets (dernière ligne) (CR ■).....	114
Tableau 6 : Nombre de répétitions nécessaire pour atteindre au moins 80% de la variance finale (CR ■) .....	117
Tableau 7 : Inter-variabilité moyenne (u. a.) des 12 sujets dans chaque condition (CR ■)...	119
Tableau 8 : Intra-variabilité moyenne (u. a.) de chaque sujet (8 répétitions) et des 12 sujets (dernière ligne) .....	122
Tableau 9 : Intra-variabilité moyenne (u. a.) des 12 sujets dans chaque condition (CR ■)...	123
Tableau 10a : Résultats du test de Student « effet posture » (comparaison assis vs. debout)	124
Tableau 10b : Résultats du test de Student « effet posture » (comparaison assis vs. à genoux) .....	124
Tableau 10c : Résultats du test de Student « effet posture » (comparaison assis vs. couché)	124
Tableau 11 : Intra-variabilité moyenne (u. a.) des 12 sujets (a : majuscule, b : minuscule) (CR ■) .....	126
Tableau 12 : Inter-variabilité moyenne (u. a.) des 12 sujets (a : majuscule, b : minuscule) (CR ■) .....	127
Tableau 13 : Intra et inter-variabilités moyennes (u. a.) des 12 sujets dans chaque condition (CR ■).....	127

## Liste des graphiques

Graphique 1 : Variance (u. a.) en fonction du nombre de répétitions (1 sujet, L'EPOQUE, CR) .....	113
Graphique 2 : Pourcentage de la variance finale en fonction du nombre de répétitions (1 sujet, L'EPOQUE, CR).....	115
Graphique 3 : Evolution de la variance (%) en fonction du nombre de répétitions.....	116

## Liste des diagrammes

Diagramme 1 : Effet de la condition sur la variance (u. a.) (p=0,090052) .....	117
Diagramme 2 : Effet de la casse sur la variance (u. a.) (p=0,000135) .....	118
Diagramme 3 : Evolution de l'inter-variabilité moyenne (u. a.) en fonction de la condition (CR/CNC) et de la casse (MAJ/Min) .....	119
Diagramme 4 : Effet de la posture sur la variance (u. a.) (p=0,013240).....	123
Diagramme 5 : Effet de l'inclinaison sur la variance (u. a.) (p=0,001653) .....	124
Diagramme 6 : Interaction de la posture et de l'inclinaison (p=0,001487) sur la variance ...	125
Diagramme 7 : Effet de la casse (p=0,000002) sur la variance.....	126



## Liste des abréviations

**CR** : condition de référence

**CNC** : condition non conventionnelle

**SNC** : système nerveux central

**SNP** : système nerveux périphérique

**H** : horizontal

**V** : vertical

**M** : majuscule

**m** : minuscule

**ET** : écart-type

**u.a.** : unités arbitraires

# 1. Résumé

Les experts forensiques en documents peuvent être confrontés à des écritures réalisées en conditions non conventionnelles. Ces circonstances atypiques pourraient être à l'origine d'une plus grande variabilité de la forme de l'écriture, en particulier lorsque des positions à priori inhabituelles du corps et / ou du support sont impliquées. En effet, en dépit de son aspect stéréotypé / standardisé évident, résultat d'un apprentissage par un modèle, notre écriture est caractérisée par une variabilité intrinsèque de la forme, qui évolue au cours du temps et qui, dans sa dimension qualitative, confère à l'écriture son caractère individuel. En d'autres termes, nous n'écrivons jamais deux fois de la même façon. Cette variabilité intra-individuelle (ou intra-variabilité) observée en condition conventionnelle, c'est-à-dire assis devant un support horizontal, pourrait augmenter en conditions non conventionnelles, par exemple dans une position inconfortable. Cela pourrait rendre plus difficile l'identification d'écrits apposés dans une condition non conventionnelle ou inconnue. Ne pas connaître les circonstances d'apposition d'une mention manuscrite - et ce n'est pas toujours le cas, parfois des indices laissent présumer de conditions non conventionnelles de rédaction – ou tout du moins ne pas s'interroger sur ces dernières, pourrait conduire l'expert à faire des erreurs d'appréciation. Et le simple fait d'étudier une trace sur laquelle le corps peut exercer une influence fait de l'expertise en écriture une spécialité qui se distingue des autres disciplines forensiques. En cela, la trace écrite diffère des autres types de traces "inanimées" (physiques, chimiques, biochimiques) considérées comme invariables (mais potentiellement sensibles à d'autres phénomènes tels que la température, la pression atmosphérique...). En effet, le mouvement d'écriture étant commandé et contrôlé par le cerveau, cela lui confère une certaine variabilité. Il est donc assez logique de penser que la connaissance des mécanismes neuroscientifiques à l'origine de ce mouvement facilitera la compréhension des phénomènes observés d'un point de vue forensique.

Dans une première expérience, nous avons demandé à des sujets d'écrire dans deux conditions très différentes (conventionnelle vs. non conventionnelle), afin de comparer leur performance et de déterminer le nombre de répétitions nécessaires pour correctement estimer leur variabilité intra-individuelle dans chaque condition. Les mots ont été écrits sur une tablette graphique en majuscule et en minuscule, normalisés dans le temps et dans l'espace, moyennés, puis la variance a été calculée point à point. Les résultats ont montré que, en

conditions conventionnelle et non conventionnelle, la variabilité intra-individuelle atteignait un plateau comparable à partir de 8 répétitions du même mot (majuscule ou minuscule). Dans une seconde expérience, et sur la base de ce chiffre, nous avons multiplié le nombre de conditions expérimentales (assis / debout / à genoux / couché, support horizontal / vertical) et testé de nouveau les valeurs de variabilité. Les résultats ont montré que cinq des sept conditions non conventionnelles n'avaient pas d'impact significatif sur la variabilité. En revanche, les deux conditions les moins confortables (à genoux / support vertical et couché / support vertical) rendent l'écriture plus variable.

L'ensemble de ces résultats fournit aux experts forensiques des pistes leur permettant de mieux appréhender les écritures rédigées dans des conditions différentes. Ceci pourrait permettre une meilleure évaluation des écrits de question et / ou un recueil plus adapté du matériel de comparaison, qu'il s'agisse de spécimens spontanés ou de corps d'écriture obtenus après dictée.

### **Mots-clés**

Écriture, intra-variabilité, inter-variabilité, conditions d'écriture, majuscule, minuscule

## Abstract

Forensic document examiners may be confronted with handwriting carried out under unusual conditions. These atypical circumstances may give rise to more variability of the form of the written word, in particular when a priori unusual positions of the body or of the support are involved. In spite of its evident stereotypy, resulting from a pattern apprenticeship, our handwriting is characterized by some intrinsic variability of form, which evolves in time and, in its qualitative dimension, gives the handwriting its individual character. In other words, we never write twice exactly in the same manner. This within-subject variability under usual conditions, sitting and writing on a horizontal support, might increase under unusual conditions, for instance in an uncomfortable position. This could generate difficulties in attributing handwriting traces acquired in an unusual situation to a source. Unknowing the writing circumstances – and it is not always the case, sometimes signs let presume of unusual writing conditions – or at least not wondering about these conditions, may lead the forensic document examiner to be mistaken in his assessment. And the simple fact of studying a trace on which the body can exercise an influence, makes the handwriting expertise a speciality distinct from other forensic fields. In that, the written trace is different from other ‘inanimate’ traces (physical, chemical, biochemical) considered as invariable (but potentially sensitive to other phenomena like temperature, atmospheric pressure...). Indeed, the handwriting movement is commanded and controlled by the brain, which assigns to it a certain variability. And the knowledge of neuroscientific mechanisms causing this movement could facilitate the understanding of phenomena observed from a forensic point of view.

In a first experiment, we asked the subjects to write under two very different conditions (usual *vs.* unusual), in order to compare their performance and to determine, under each condition, the number of repetitions necessary to correctly estimate the within-subject variability. Words were carried out with a pen tablet, in upper and lower cases, normalized for space and time, averaged, and then the variance was calculated dot by dot. The results showed that, under the usual and unusual conditions, the within-subject variability reached a comparable ceiling and did not change any more beyond 8 repetitions of the same word. In a second experience, and on the basis of this number, we multiplied the number of conditions (sitting / standing / kneeling / lying, horizontal / vertical support) and tested again the values of variability. Results showed that five of the seven unusual conditions did not have a

significant impact on the variability. On the other hand, the two less comfortable conditions (kneeling / vertical support and lying / vertical support) make handwriting more variable.

These results suggest to forensic experts some ‘avenues’ for a better understanding of handwriting carried out under these conditions. This may lead to a better assessment of questioned written traces and / or a more appropriate collection of comparison material, whether spontaneous or made under dictation.

**Key-words**

Handwriting, within-subject variability, between-subjects variability, writing conditions, upper case, lower case.

## 2. Introduction

Le point de départ de ce travail de thèse est déterminé par la nature des affaires parvenant à la Section Documents du Laboratoire de Police Scientifique de Marseille. Une part d'entre elles implique des demandes de comparaison et identification d'écritures d'un caractère particulier, que nous qualifierons de « non conventionnelles ». Par ce terme, nous faisons référence à des écritures apposées dans des conditions s'éloignant du cas classique, à savoir un individu écrivant assis, sur un support horizontal avec un stylo (condition conventionnelle / de référence) (CR). Trois paramètres, entre autres, peuvent être amenés à varier et à placer le scripteur dans des conditions de rédaction peu communes : la position du corps, la position du support et l'instrument scripturant. C'est par exemple le cas lorsqu'une affaire de diffamation envers un particulier par inscriptions sur les murs d'une propriété privée parvient au laboratoire, ou bien dans le cas d'une signature rédigée au guichet d'une administration, ou d'un écrit apposé sur un tableau ou panneau d'affichage. Dans ces différents contextes, les mentions peuvent de plus être apposées à l'aide d'un instrument inhabituel (marqueur, bombe aérosol, craie...). On désigne par « conditions non conventionnelles d'écriture » (CNC) l'ensemble de ces conditions (figure 1).



Figure 1 : Tracés réalisés en conditions non conventionnelles (Source : LPS Marseille)

Selon Harrisson (1958), l'effet que peuvent avoir ces circonstances inhabituelles sur l'écriture est plus sévère que ce que l'inattention ou la négligence peuvent générer. A l'heure actuelle, le constat est le suivant : il est nécessaire de davantage se documenter sur ce sujet, d'effectuer des tests recréant ces conditions et de voir quels peuvent en être les résultats.

Ce travail de recherche a pour but essentiel de fournir à l'expert une meilleure connaissance des inscriptions non conventionnelles, données sur lesquelles il pourra s'appuyer pour éventuellement orienter différemment son expertise. En effet, la question centrale se résume à savoir si l'on retrouve dans les inscriptions non conventionnelles l'ensemble des éléments constitutifs de la variabilité naturelle de l'écriture classique d'un individu. Et si oui, dans quelle mesure ? Connaître les réponses à ces questions permettra à l'expert soit de continuer à réaliser un travail d'analyse / comparaison / évaluation tel qu'il est envisagé avec des écritures classiques, soit elles l'amèneront à revoir à la hausse le nombre de spécimens de comparaison qu'il demandera au requérant, ou encore à demander la réalisation de ces spécimens dans des conditions comparables.

Dans cette perspective, il est nécessaire de rappeler ce que l'on entend par variabilité naturelle de l'écriture. Aussi désignée par les termes d'intra-variabilité ou de variation naturelle, elle représente l'imprécision avec laquelle les habitudes du scripteur sont exécutées lors de différentes occasions. La raison de cette variabilité est simplement que les humains ne sont pas des machines et, par conséquent, les manuscrits qu'ils exécutent varient dans une certaine mesure, d'une occasion à l'autre. Il existe également une variabilité entre des écrits faits à des dates différentes, sur des documents différents et avec des instruments scripturants différents. La différence entre ces variations n'est habituellement qu'une question de degré et peut être plus ou moins grande selon les circonstances. L'écriture représente un aspect dynamique du comportement humain. En effet, elle subit des modifications constantes au cours du temps et elle est sujette à de nombreuses influences qui font qu'elle présente différents degrés de variation naturelle (Huber & Headrick, 1999).

Le mouvement physique de la main ne se répète pas systématiquement d'une façon identique, et il y a par conséquent, chez chaque scripteur, des variations individuelles qui permettent son identification. Ces variations sont d'amplitude variable selon le scripteur et peuvent être déterminées et classées. Elles découlent du fait que le mouvement de la main

n'est pas constant. Le rythme, la flexion et la pression du bras, de la main et des doigts sont instables et empêchent l'écriture manuscrite d'être aussi régulière que l'écriture dactylographiée (qui est aussi sujette à une certaine variabilité temporelle). Autrement dit, chaque fois qu'une même lettre est tracée, elle comporte certaines variantes, que leur amplitude exagérée permet de classer, pour chaque scripteur, dans le cadre des variations anormales ou contradictions. Signalons que les diverses variations d'une lettre, chez un scripteur, peuvent être assez importantes et même présenter des formes différentes mais, confrontées, elles présentent toujours les mêmes caractéristiques communes et individuelles. Le fait de considérer la variation naturelle comme une contradiction serait une grave erreur (Haggag, 1972).

On peut définir la variante d'écriture comme une différence portant sur une caractéristique et se répétant dans divers exemplaires de l'écriture d'un même individu. Ces variations sont, pour la plupart, légères. Toutefois les variantes de tracé d'une même lettre entrent dans cette catégorie. Il arrive certes que ces dernières soient considérables, cependant elles peuvent être classées parmi les variations lorsqu'il s'agit d'une dualité constante dans la façon d'écrire de l'auteur. Une différence, au contraire, est un défaut de ressemblance entre deux écritures : l'une de ces écritures sort si nettement des habitudes de l'un des scripteurs que ni les conditions inhabituelles dans lesquelles le texte a pu être écrit, ni le désir du scripteur de déguiser son écriture, ne sauraient la légitimer (Hilton, 1983). La difficulté réside dans le fait de pouvoir faire la distinction entre ce qui est le résultat de la variation naturelle et ce qui est le résultat de deux scripteurs différents (Whiting, 1997). La variation naturelle est une propriété essentielle de l'écriture de chaque individu. Selon les scripteurs, son étendue est plus ou moins grande. Les conditions ainsi que le but dans lesquels est rédigé un document sont autant de facteurs susceptibles d'agir sur la variation naturelle (Hilton, 2001). Selon Mac Alexander (1994), une différence fondamentale et une variation naturelle ont une chose en commun : jusqu'à ce que des éléments supplémentaires viennent s'ajouter à l'analyse de l'écriture, chacune d'entre elles demeure une différence inexplicée.

\*

Pour en revenir aux mentions qui nous intéressent, à savoir les mentions non conventionnelles, le travail de documentation à ce sujet nous a conduit de façon prévisible à nous intéresser au phénomène global des graffitis. En effet, ce type d'inscriptions peut à



première vue constituer la meilleure illustration d'une écriture non classique, aussi bien au niveau de la position du support, que de l'instrument scripturant ou de la position corporelle à adopter pour la réaliser.

Une étape de recherche et d'approfondissement sur ce thème a ainsi été réalisée. Cela a été possible grâce à la grande accessibilité de ce type de mentions. Dans un premier temps, le but était d'avoir une vision globale de ces inscriptions urbaines, et en particulier celles dépourvues d'ornementation, et de voir dans un deuxième temps quelles informations pouvaient en être tiré.

Les graffitis comprennent aussi bien des tracés « ornementés » (tags et graffs), que des graphismes simples que nous avons désignés par le terme d'« inscriptions ». Les premiers ne constituent qu'un sous-ensemble des écritures non conventionnelles et sont le résultat d'un travail de recherche sur le graphisme des lettres (lettrage) et d'un entraînement basé sur la répétition. En cela, le graffiti et plus précisément le tag, offre un tracé personnalisé (déformation de caractères, présence d'éléments additifs) qui n'est cependant pas le reflet de l'écriture classique du tagueur, puisque stylisé. En revanche, une catégorie minoritaire de graffitis sans fantaisie, *les inscriptions*, a permis de mettre en évidence certaines particularités. Parmi elles, nous pouvons citer le **recours fréquent aux lettres capitales**, et surtout le constat que lorsqu'elles sont destinées à être lisibles et porteuses de sens, ces inscriptions sont majoritairement réalisées avec un marqueur. L'emploi d'une bombe pour apposer ce type de mentions n'a été que très peu rencontré.

Parallèlement à ce travail sur les graffitis, une recherche dans la bibliographie forensique nous a permis de constater que très peu de travaux avaient été effectués sur les écritures dans des conditions non conventionnelles, et plus particulièrement celles impliquant des positions non classiques du corps et du support (l'influence de l'instrument scripturant a davantage été évoquée). Certaines questions, telles que les modifications que peuvent entraîner ces conditions particulières restent donc en suspens. Partant de ce constat, le but fixé est alors de comprendre les mécanismes qui régissent l'écriture. Pour cela, en plus d'être considérée comme une trace, l'écriture doit être envisagée en tant qu'**action neuromotrice** mettant en œuvre toute une série de processus biologiques.

Les découvrir et mieux les connaître pour peut-être mieux analyser et interpréter la trace écrite, voilà ce à quoi nous décidons de nous attacher dès à présent.

La bibliographie neuroscientifique a fourni un grand nombre d'articles décrivant des conditions variées d'écriture. Ces derniers, très instructifs pour la compréhension du processus qui se déroule en amont du résultat (trace écrite), ont de manière logique permis d'accéder à des données de type cinématique, ainsi qu'à l'enregistrement de l'activité cérébrale au cours de la génération d'écriture. Dans ces études, la constance des formes en fonction des conditions d'écriture est présentée comme un postulat de base (concept d'invariance). Les arguments détaillés à l'origine de cette affirmation sont peu nombreux. Dans le cadre de notre recherche, c'est justement cet aspect qui nous intéresse et que nous chercherons à expliciter. L'apport des neurosciences à une problématique forensique réside essentiellement dans l'intégration des concepts de variabilité (intra et inter) à la description du mouvement d'écriture, ainsi que dans l'emploi de méthodes expérimentales adaptées à l'enregistrement du geste complet d'écriture (trajectoire papier et aérienne).

Nous décidons donc, en collaboration avec l'Institut des Neurosciences Cognitives de la Méditerranée, de mettre en place un protocole expérimental destiné à tester différentes conditions non conventionnelles d'écriture, afin de comparer les écrits ainsi obtenus avec des écrits rédigés en condition classique.

Le but est d'une part de tenter de répondre aux questions laissées en suspens par nos recherches antérieures (explorations sur le terrain et bibliographiques), et plus précisément de mettre en évidence les modifications de variabilité inhérentes à ces changements de conditions. Dans cette perspective, un protocole expérimental adapté a été mis en place, afin d'extraire des données statistiques concernant la variabilité.

En effet, le cœur de notre questionnement est le suivant : dans quelles mesures les conditions non conventionnelles que nous avons définies agissent-elles sur la variabilité intra-individuelle? Pour cela, les acquisitions d'écriture seront réalisées sur une tablette graphique afin d'extraire des paramètres objectifs.

Dans cette perspective, nous présenterons tout d'abord une des manifestations les plus courantes de l'écriture non conventionnelle, regroupée sous le terme générique de graffiti

(urbains dans notre cas). Puis, nous aborderons l'écriture sous les angles forensique et neuroscientifique. Enfin, nous détaillerons le protocole expérimental retenu pour notre travail de recherche ainsi que les résultats obtenus.

\*

\*

\*

## Partie théorique

### 3. Approche globale : les graffitis urbains

#### 3.1. Etat de l'art

Le mot « graffiti » est d'abord tiré de l'italien « graffito » (dessin), dérivé de « graffio » (coup de griffe, égratignure), mais surtout du latin « graphium » (stylet), et du grec « grapheion » (poinçon à écrire). L'idée d'écrire avec un poinçon, par extension avec un objet agressif ou agressivement contre une surface, est présente dans le terme (Vulbeau, 1992). Notre travail s'intéresse exclusivement au graffiti le plus répandu dans la ville, à savoir le *graffiti urbain*. Il est appliqué à la bombe, au marqueur, ou peint sur les murs des villes, des écoles, etc. Ce graffiti traditionnel (puisque le plus ancien) est effectué sur des parois verticales (murs, balustrades, panneaux...), ou horizontales (sol, bancs...). Il utilise à la fois les mots et toute une panoplie de symboles et de signes.

Les graffitis semblent faire partie de l'environnement urbain ordinaire, et ce depuis longtemps. Ils peuvent se décliner en de nombreuses formes très différentes les unes des autres, de la signature réalisée en quelques traits à la fresque pleine de lettrages complexes, de personnages et de couleurs. Ces différentes formes, d'ailleurs souvent réalisées par les mêmes artistes, sont dictées en grande partie par leur support et par les conditions dictées par celui-ci (Desvoignes, 2003).

#### 3.1.1. Bref historique

Les tags appartiennent à la catégorie des graffitis en ce sens qu'ils sont des inscriptions non autorisées. Le sous-ensemble des tags désigne des graffitis répondant aux critères suivants : il s'agit d'une signature, d'un pseudonyme, d'une inscription répétée de nombreuses fois, en général dans le milieu urbain. « Tag » est un nom anglais qui veut dire « insigne » ou « étiquette » (de valise dans les aéroports) ; comme verbe, il désigne l'action d'étiqueter ou de marquer ; en américain, le mot a aussi des connotations issues du langage familier telles que le « toucher » quand on joue à chat, ou encore « éliminer » quand on joue au base-ball. Le mot tag, sous l'acception d'étiquette, est passé dans le domaine linguistique

francophone. Les tags sont apparus à New-York et ont été révélés au public par un article de presse du New-York Times daté du 21 juillet 1971, qui présente le cas d'un jeune homme de dix-sept ans, d'origine grecque, qui signe sur les monuments et le métro « TAKI 183 ». Ce tagueur légendaire inscrit partout un surnom inspiré de l'univers de la bande dessinée, et un nombre indiquant le numéro de sa rue de résidence. Il s'agit à la fois d'un *pseudonyme* qui masque le graffiteur et d'un *toponyme* qui le localise. TAKI 183 est suivi de quelques autres, et le mouvement de signature va se développer de manière particulièrement importante puisque seul un plan de nettoyage du métro, qui coûtera annuellement 52 millions de dollars de 1984 à 1989, parviendra à résorber les graffitis. C'est donc en 1989, année où le métro de New-York semble définitivement débarrassé de ses tags, que l'opinion publique française est alertée par une série d'articles sur l'invasion de Paris par les tags (Vulbeau, 1992). Les premiers métros et RER tagués apparaissent. Un terrain vague situé entre les métros de Stalingrad et La Chapelle sert de surface et de galerie ouverte aux graffiti-artistes. Entre 1989 et 1991, ont lieu les premières tentatives de dialogue entre la RATP et les graffiteurs. La société de transports offre des emplacements publicitaires mais se heurte au difficile rapport qu'entretiennent les tagueurs avec l'institution. Les premières vagues d'arrestations ont lieu, et de nouvelles surfaces telles que les stores des commerçants se développent. En 1999, Jean Tibéri, maire de Paris, décide de déléguer à une entreprise privée le nettoyage de Paris. Korrigan devra en dix-huit mois répertorier les graffitis, nettoyer toutes les façades à hauteur de quatre mètres, maintenir les surfaces propres, enlever les nouveaux tags sous quinze jours et mettre en place un système de cartographie du tag. En 2000, ce sont les camions des marchés parisiens qui deviennent la cible des writers (le terme « writer » choisi pour désigner les graffeurs et les tagueurs rappelle que les graffitis se basent sur un lettrage). Pendant la campagne électorale de 2002, très axée sur le tout sécuritaire, une centaine de graffiti-artistes sont interpellés. Certains sont arrêtés pour des tags à l'acide et plus généralement pour avoir peint sur des trains (Drewniak, 2003).

### **3.1.2. Le tag : approche formelle**

Le tag est une signature utilisant un pseudonyme, formé presque toujours de trois à cinq lettres. Il est effectué en quelques traits d'une seule couleur. Sa taille reste relativement modeste et ne dépasse en général pas les cinquante centimètres carrés. Comme dans l'écriture manuscrite, le trait délimite la lettre.

Traditionnellement illégal, il doit être réalisé aussi rapidement que possible et le fait qu'il doive pouvoir être reproduit de jour comme de nuit sur tout type de support, donc avec des techniques différentes, demande que l'artiste connaisse parfaitement son logo. Si la réalisation ne prend que quelques secondes, le développement de cette forme demande des heures de travail.



Figure 2 : Tag réalisé à la bombe (Boulevard National, Marseille)

Le tag utilise généralement des lettres majuscules (figure 2), bien que les exceptions soient nombreuses. A l'inverse de ce que l'on observe dans l'écriture manuscrite classique, les majuscules sont souvent liées. Cette particularité répond à la double exigence liée aux supports traditionnels du tag. D'un côté fait pour pouvoir être lu partout, parfois à une distance importante, parfois depuis un support en mouvement, ses lettres doivent pouvoir être identifiées très rapidement, cela justifie le choix d'une écriture majuscule. De l'autre, il doit pouvoir être réalisé en quelques secondes afin que soient réduits les risques d'être pris en flagrant délit de la commission d'un acte illicite. L'écriture liée est plus apte à répondre à ce besoin. La recherche d'une continuité n'est pas seulement un besoin purement pratique de vitesse, mais également une volonté de créer un tag qui ait l'air en mouvement et qui forme un tout, un logo. Les lettres peuvent également présenter des déformations destinées à donner du rythme au tag, à le mettre en mouvement (allongement de traits, formation de spirales...). Différents éléments additifs peuvent également participer à cette quête de rythme (figures 3 a&b), qui se fait parfois **au détriment de la lisibilité** (flèches, chiffres, couronnes). Les trop grandes déformations ou superpositions peuvent rendre quasiment impossible la reconnaissance des lettres. Si le tag est réalisé rapidement, ce n'est pas seulement parce que le writer se livre à un jeu de cache-cache avec les forces de l'ordre, mais également parce que la bombe de peinture produit des coulures si le trait n'est pas effectué rapidement.



Figure 3 : Tags réalisés au marqueur (a. Boulevard Franklin Roosevelt, Marseille) et à la bombe (b. Rue Jean Dussert, Marseille)

De la même façon qu'une signature traditionnelle, le tag présente un *ductus* différent selon les scripteurs –ie- la façon de taguer propre à chaque individu peut être reconnue, même si les lettres elles-mêmes sont indéchiffrables (Desvoignes, 2003). En général, l'enchaînement des lettres se fait de la gauche vers la droite comme dans l'écriture traditionnelle. Le maître geste demeure tout de même le maniement de la bombe. Il a un rôle essentiel et prend une importance majeure lorsqu'il s'agit d'effectuer un tracé direct, de colorier, de réaliser une coulure ou de dessiner le lettrage (Marconot, 1995).

### 3.1.3. Le graff : approche formelle

Le graff est de taille plus conséquente : sa longueur peut atteindre plusieurs dizaines de mètres dans certains cas, mais est rarement inférieure à un mètre cinquante. Il est toujours constitué de deux lettres au minimum. En plus du lettrage lui-même, un arrière-plan et des personnages sont souvent présents. Dans un graff, le trait délimite la surface des lettres, ce qui le différencie du tag et de l'écriture manuscrite.

Contrairement à ce qui est observé dans le tag, les éléments extérieurs au lettrage peuvent occuper une place primordiale, voire même l'éclipser complètement dans quelques cas. Les lettres ont ici un rôle décoratif au moins aussi important que leur fonction scripturale, et des éléments picturaux se transforment parfois en lettres.

Un graff dépasse rarement deux mètres de hauteur, ce qui montre que ses formes ne s'adaptent pas seulement au support, mais aussi aux capacités physiques de l'artiste. Les proportions sont avant tout définies par la hauteur que ce dernier peut atteindre à bout de bras, et par l'espace qu'occupent les lettres de son pseudonyme mises bout à bout.

Comme pour le tag, le rythme est, dans le graff, un concept primordial. Alors que dans le tag, la surface reste modeste et seul le bras entre en mouvement, dans le graff, le corps entier doit entrer en mouvement, dans une sorte de danse, pour pouvoir couvrir rapidement tout l'espace (Riout, 1985). Tout comme le rap, le graff est « un jeu de mots » : rappers et graffeurs jouent avec les mots, sur les mots. Ils les embellissent et les font rimer, les travaillent et les font sonner. Ils se jouent des mots par invention, déformation ou détournement du sens initial. Le graff s'intéresse à la matérialité formelle, physique de l'écriture. Ce mode à la fois ludique et esthétique de la langue et de l'écriture est ainsi décrit par DUKE (graffeur de Lyon) : « dans mon boulot, je veux arriver à faire n'importe quoi ...C'est l'amour de la lettre...pour l'instant [mon boulot] c'est d'arriver à faire danser les mots, leur donner une fluidité, un mouvement... » (Blanchon, 2000).

Le graffeur peut également chercher à donner un effet de profondeur à sa composition. Les lettres ne sont alors plus traitées comme des surfaces mais comme des volumes. L'outline (contour des lettres) disparaît au profit d'un jeu d'ombres et de lumières qui délimite les différentes facettes des lettres, parfois **au détriment de la lisibilité** (Desvoignes, 2003) (figure 4).



Figure 4 : Graff réalisé à la bombe (Cours Julien, Marseille)

#### 3.1.4. Lieux

Traditionnellement, les quartiers populaires demeurent un terrain particulièrement propice à l'éclosion graffitique. Les caractéristiques architecturales ont également une importance. D'une part, le manque d'entretien permet la longue durée de vie des messages



muraux. La décrépitude des murs, d'autre part, n'incite pas au respect, mais suggère au contraire de laisser sa propre marque, de continuer à affiner et préserver l'œuvre du temps.

Il faut aussi réserver une place à part aux lieux fermés, non pas seulement clos, mais encore protégés par une serrure, et dans lesquels le graffiteur jouit d'une protection totale. Les « petits coins », qu'ils soient publics ou privés, attirent et favorisent les graffitis. Les couloirs labyrinthiques du métropolitain sont à la frontière du fermé et de l'ouvert, qui échangent ici leurs vertus caractéristiques. Dans cet univers, le désir de marquer son passage est plus pressant qu'ailleurs : les banquettes des wagons, les céramiques des couloirs en savent quelque chose (Riout et al., 1990).

La recherche de surfaces insolites et exploitables conduit parfois tagueurs et graffeurs à se hisser jusqu'aux cimes de la ville (figure 5) ou à se glisser dans les souterrains, pour réaliser un exploit (Marconot, 1995).



Figure 5 : Graff réalisé à la bombe (Avenue des Chutes-Lavie, Marseille)

### 3.1.5. Supports

L'objectif premier du graffiti est d'être vu, non le graffeur en action. Trouver un équilibre entre ces deux éléments est alors le but de tout graffiteur, de celui qui opte pour la légalité complète à celui qui va courir le risque le plus élevé en s'attaquant à un train. Pour y parvenir, il va appliquer, consciemment ou non, quelques règles de base telles que trouver un support à son œuvre, de dimensions et de textures adéquates, mais aussi trouver une bonne visibilité, braver le risque, et enfin assurer l'avenir du graffiti (figure 6).



Figure 6 : Graff réalisé à la bombe (Boulevard de la Libération, Marseille)

Toute trace est dépendante du support qui capte et retient les caractéristiques du geste instaurateur. La vitre couverte de buée ne nécessite qu'un simple doigt pour recueillir le dessin de l'enfant fasciné de pouvoir si aisément écrire. Mais il lui faudra une craie, ou à défaut, un morceau de calcaire pour marquer le bitume du trottoir. En retour, le support confère aux graphies qu'il expose des caractéristiques stylistiques spécifiques. La ductilité du sable humide dégagé par la marée basse, permet une grande souplesse et un certain gigantisme aux circonvolutions des écritures laissées par les promeneurs, et vite reprises par la marée montante. En revanche, elle interdit les finesses d'exécution. A l'inverse, la dureté du plâtre, l'étrécissement du tronc incitent ou obligent les graveurs à la modestie des formats. Résistants comme du béton, ou aussi tendres que le sont certaines écorces de bois, verticalement dressés avec toutes les possibles coulures de peinture que cela entraîne, ou horizontaux comme la table et les sols, lisses et bien polis, ou rendus granuleux par les crépis, les supports peuvent encore être neufs, impeccablement propres, patinés ou bien barbouillés par le temps.

Où commence, où s'arrête le graffiti ? Toute coupure est une violence. Le regard qui fixe un pochoir, un bombage, voit aussi le mur, la maison, la rue, les passants. Rien de tout cela n'est négligeable, car le graffiti joue de ces éléments, participe aux caractéristiques de l'espace bâti et vécu qu'il vient habiter. A ce titre, il serait une sorte de peinture qui accèderait à l'architecture. Le graffiti réussi, c'est celui qui parvient à transformer en œuvre d'art non seulement son support immédiat, mais encore et aussi le quartier, et peut-être même la ville (Riout et al., 1990).

### 3.1.6. Technique

Sans entrer dans les détails, il est nécessaire de passer en revue les différents outils du writer et de tenter de comprendre comment la technique est choisie en fonction du support, car **ce choix va peser largement sur les formes de l'œuvre**. Les deux pratiques les plus courantes sont la peinture au spray et l'utilisation de gros feutres indélébiles, les *markers*.

Le feutre indélébile est utilisé par les tagueurs sur des surfaces lisses comme des panneaux de circulation, des vitres, des matériaux métalliques ou plastiques. Il n'est en général pas utilisé sur des surfaces comme le béton ou la pierre, qui le détruiraient trop rapidement. Les traits du marker sont assez larges par rapport à ce que ferait un feutre classique, mais pas assez pour pouvoir produire des formes de très grande taille. C'est pourquoi il est totalement inutile dans la réalisation d'un graff (Desvoignes, 2003). Il est plus facile d'utilisation et permet plus de précision dans le style. Les temps d'arrêt sont moins marqués par une séparation. Il peut être utilisé dans un contexte plus difficile. Plus discret, il prend moins de place, ne fait pas de bruit et n'imprègne pas l'air de cette odeur si propre à la bombe (Bazin, 1995).

Le spray permet une application sur des surfaces poreuses comme la pierre ou le béton, et reste l'outil qui permet le mieux de s'adapter à toutes les situations. En effet, là où la mine du marker serait détériorée, là où elle ne pourrait franchir les obstacles d'une architecture ou d'une texture (séparation d'une fenêtre, ouverture d'une porte, forme particulière d'une statue, rugosité d'un support...), la bombe peut passer outre. Le writer peut alors se servir de ces barrières comme des lignes d'un cahier ou au contraire « transgresser la règle » et casser le cadre (Bazin, 1995).

Deux autres techniques viennent s'ajouter au spray et au marker : le bâton de cirage et une sorte de large marker appelé *poska*, dont la peinture est soluble à l'eau (figure 7). Ces deux outils permettent d'inscrire des traits plus larges, sur le même type de surfaces que celles sur lesquelles le marker est utilisé. S'il est difficile de les distinguer l'une de l'autre, ces deux techniques sont facilement différenciables du marker ou de la bombe, par le fait que leurs traits sont moins compacts. Certains artistes semblent utiliser ces techniques parce qu'elles sont facilement effaçables. Ceci peut être une circonstance atténuante en cas de jugement. Il

n'est donc pas étonnant que le poska et le cirage soient utilisés surtout dans des lieux où le graffiti est illégal (Desvoignes, 2003).



Figure 7 : Tag réalisé au poska (Traverse Montcault, Marseille)

Par rapport au corps à proprement parler, l'activité du graffiti dans la clandestinité oblige à une grande rapidité d'exécution, à un contrôle total du mouvement, dans une position peu commode. En quelques secondes parfois, en quelques gestes vifs et habiles, il faut avoir terminé le tracé, et disparaître sans avoir été vu (Marconot, 1995).

### 3.1.7. Spécificité du graphisme

Les premiers tags se devaient d'être lisibles : ils visualisaient et répétaient à l'infini l'affirmation d'une existence individuelle. Bientôt vont apparaître des graphies plus sophistiquées, que les puristes condamnèrent : « comment voulez-vous faire connaître votre nom en faisant toutes ces manières ? », disent-ils. Alors les lettres enflent, gonflent comme celles des bulles de bandes dessinées. Ou bien encore, elles acquièrent un relief feint. Les styles se succèdent, par emprunts et transformations des modèles répandus dans les divers médias. Le *wildstyle* apparaît, complexe construction de lettres entremêlées. Dans le même temps, saisies de gigantisme, elles abandonnent l'intérieur des rames aux jeux des graffitistes débutants, pour ne plus s'étaler que sur les parois extérieures. Après le *panel piece* – peinture exécutée sous les fenêtres, et entre deux portes – ce sera le grandiose *top-to-bottom*, de haut jusqu'en bas, sur toute la longueur du wagon. On traçait son tag en quelques secondes, d'un simple geste du poignet. Il faut courir le long des voies pour inscrire les énormes messages. Les plus habiles font parfois simultanément usage de leurs deux bras, pour couvrir plus vite

des surfaces toujours plus étendues. La technologie des bombes favorise cette escalade : des embouts spéciaux permettent de pulvériser un large nuage coloré (Riout et al., 1990).

L'espace dans son entier est utilisé, passé et repassé jusqu'à donner parfois une impression d'entrelacement inextricable de stylisations et d'inventions, une « foutraille » apparente mais qui dévoile une structuration travaillée. La forme est utilisée avec maîtrise et précision, la tonalité avec un jeu de nuances allant jusqu'aux limites de ce que peuvent rendre les matériaux disponibles, la couleur est choisie et maniée avec recherche. Tout cela donne l'impression que toutes les données graphiques possibles sont exploitées au service de l'œuvre : la structure formelle, le trait, l'espace envahi d'une façon équilibrée dans toutes ses dimensions. L'ensemble donne également l'impression d'une aisance d'exécution mais qui, au-delà d'un éventuel fourmillement apparent des motifs, témoigne d'une planification avancée et très dynamique, jointe à une bonne capacité d'adaptation. L'impression d'improvisation n'est donc qu'apparente, la rapidité et la sûreté dans l'exécution de l'œuvre pouvant se révéler trompeuse à cet égard (Lani-Bayle, 1993).

Bien que l'écriture s'exécute sous la contrainte de la rapidité, le graffiti peut avoir différents styles. En effet, la rapidité d'exécution n'empêche pas une recherche calligraphique, même si elle pousse à priori à une écriture en lettres enchaînées. Le tag en lettres détachées existe également, même si le travail à la bombe est impitoyable en ce sens où tout arrêt du geste, aussi infime soit-il, provoquera une marque ou une coulure. En cela, les impératifs de la bombe sont les mêmes pour le tagueur et pour le graffeur. Il faut garder exactement au centimètre près la même distance et une vitesse régulière (Bazin, 1995).

\*

Les tags et les graffs répondent ainsi à des contraintes précises. Cela leur confère des caractéristiques formelles spécifiques qui **empêchent toute comparaison avec l'écriture manuscrite classique**. Cette idée est résumée par Amar & Bras (dernière consultation le 9/12/09) qui qualifient les tags de « fausses lettres qui ne veulent rien dire, [...] des genres de signatures cabalistiques dont le dessin est fait d'un seul geste » (figure 8). Colette Guedj (2005), au sujet des graffitis de Cy Twombly, parle d'une oeuvre « à la lisière du lisible et de l'illisible, du communicable et de l'incommunicable, de l'écriture et du dessin, du verbal et du

figural [...] un mouvement spontané, le désir d'inscrire un geste, une trace, la griffure d'une expérience mentale ».



Figure 8 : Tags réalisés au marqueur (Rue Ferdinand Rey, Marseille) et à la bombe (Avenue de Saint-Just, Marseille)

Au cours de cette première phase que nous pouvons qualifier de « phase de découverte », nous avons été confrontés à trois inconvénients majeurs.

Tout d'abord, nous avons eu affaire à une prédominance des tags et graffs, ne laissant au groupe des inscriptions qu'une part minoritaire (15 inscriptions sur un total de 213 graffitis) (figure 9).



Figure 9 : Inscriptions réalisées au marqueur (localisations diverses, Marseille)

Ensuite, la mesure des différentes dimensions de l'écriture s'avérait inutile de par l'indisponibilité de spécimen de comparaison, et donc de référence. Enfin, l'absence de suivi

en direct du tracé, soit l'impossibilité de travailler sur des données enregistrées empêchait tout traitement informatisé ultérieur. Cette étape de recherche n'a donc pas été approfondie, mais elle nous a cependant permis d'habituer notre œil aux modifications éventuelles pouvant être provoquées par l'utilisation de tels instruments. En effet, il est par exemple possible de déceler la présence ou au contraire l'absence de certains détails de l'écriture usuelle d'une personne dans ces mentions. En effet, il est aisé d'imaginer que la sollicitation de segments corporels différents de ceux utilisés en condition classique d'écriture (bras / main) ou le mode d'apposition sans contact (dans le cas de la bombe, il y a déposition de l'encre par pulvérisation) soient des éléments susceptibles de modifier le geste habituel du scripteur. Dans ce cas, le scripteur s'adapte à l'instrument et produit une forme différente de celle qu'il projetait de faire. A contrario, il est également possible que le scripteur, même s'il est contraint d'adopter une gestuelle différente, aboutisse à un tracé 'habituel'.

Le scripteur peut enfin volontairement modifier son tracé, soit à des fins artistiques, soit à des fins de déguisement. Et que cette intention se manifeste au moment de la réalisation de la lettre, ou après coup, en ajoutant des artifices, le résultat est le même, à savoir une **complexification du processus d'identification**.

Les observations effectuées au cours de cette étape ont constitué des éléments d'information déterminants pour l'amélioration de notre connaissance des mentions non conventionnelles. Elles nous ont entre autres permis de mieux connaître les différentes adaptations au support choisies par les graffeurs, ou les diverses caractéristiques que peuvent présenter les multiples instruments utilisés. Ces éléments sont évidemment autant d'atouts pour une meilleure appréhension de la trace non conventionnelle.

Il est toutefois important de noter que dans le cadre des dossiers traités par les experts forensiques, nous ne sommes la plupart du temps pas dans le cas de scripteurs entraînés. Les auteurs ne présentent pas ou peu d'aisance dans leurs mouvements, n'ont pas forcément planifié de manière minutieuse la dimension formelle de leur tracé et n'ont de surcroît pas la capacité d'adaptation qu'ont les graffeurs professionnels. L'intérêt premier étant de faire passer un message, l'aspect esthétique n'intervient quasiment pas, voire pas du tout. D'où au final, une moins grande sûreté dans l'exécution. Il est important de garder cet élément à l'esprit, en ce sens où, dans le cadre de mentions non conventionnelles exploitées dans le

domaine forensique, nous sommes face à des auteurs qui, la plupart du temps, découvrent leur « espace de rédaction » et les conditions qui y sont associées, au moment où ils apposent le tracé. Cette notion implique une absence préalable d'adaptation à l'« environnement scriptural » dans sa globalité (type de support, matériaux de surface, inclinaison, position corporelle nécessaire...). La question à laquelle nous tenterons de répondre sera donc celle qui consiste à savoir si cet inconfort global génère des difficultés telles que la variabilité scripturale d'un individu s'écarte considérablement de sa variabilité naturelle (en condition classique) ?



## 4. Aspect forensique

### 4.1. Cadre légal

En France, d'un point de vue juridique, l'apposition d'inscriptions sur un bien appartenant à autrui entre dans la catégorie des « Destructions, dégradations et détériorations de biens appartenant à autrui ». Ce sont la nature du support, son degré d'altération et les possibilités de nettoyage qui déterminent la qualification de l'infraction. Si le dommage est léger, il s'agit d'une contravention (article R635-1 du Nouveau Code Pénal Français). Dans le cas contraire, c'est un délit (articles L322-1 à 4 du Nouveau Code Pénal Français).

L'ensemble des articles ci-dessous est extrait du Nouveau Code Pénal Français.

#### **Article R635-1**

#### **Des destructions, dégradations et détériorations dont il n'est résulté qu'un dommage léger**

La destruction, la dégradation ou la détérioration volontaires d'un bien appartenant à autrui dont il n'est résulté qu'un dommage léger est punie de l'amende prévue pour les contraventions de la 5e classe.

Les personnes coupables de la contravention prévue au présent article encourent également les peines complémentaires suivantes :

1° La suspension, pour une durée de trois ans au plus, du permis de conduire, cette suspension pouvant être limitée à la conduite en dehors de l'activité professionnelle ;

2° L'interdiction de détenir ou de porter, pour une durée de trois ans au plus, une arme soumise à autorisation ;

3° La confiscation d'une ou de plusieurs armes dont le condamné est propriétaire ou dont il a la libre disposition ;

4° Le retrait du permis de chasser, avec interdiction de solliciter la délivrance d'un nouveau permis pendant trois ans au plus ;

5° La confiscation de la chose qui a servi ou était destinée à commettre l'infraction ou de la chose qui en est le produit ;

6° Le travail d'intérêt général pour une durée de vingt à cent vingt heures.

Le fait de faciliter sciemment, par aide ou assistance, la préparation ou la consommation de la contravention prévue au présent article est puni des mêmes peines.

Les personnes morales peuvent être déclarées responsables pénalement, dans les conditions prévues par l'article 121-2, de l'infraction définie au présent article.

Les peines encourues par les personnes morales sont :

1° L'amende, suivant les modalités prévues par l'article 131-41 ;

2° La confiscation de la chose qui a servi ou était destinée à commettre l'infraction ou de la chose qui en est le produit.

La récidive de la contravention prévue au présent article est réprimée conformément aux articles 132-11 et 132-15.

**Articles L322-1 à 4 du Nouveau Code Pénal Français**  
**Des destructions, dégradations et détériorations ne présentant pas de danger**  
**pour les personnes**

**Article L322-1**

(Ordonnance n° 2000-916 du 19 septembre 2000 art. 3 Journal Officiel du 22 septembre 2000 en vigueur le 1er janvier 2002)

(Loi n° 2002-1138 du 9 septembre 2002 art. 24 Journal Officiel du 10 septembre 2002)

La destruction, la dégradation ou la détérioration d'un bien appartenant à autrui est punie de deux ans d'emprisonnement et de 30000 euros d'amende, sauf s'il n'en est résulté qu'un dommage léger.

Le fait de tracer des inscriptions, des signes ou des dessins, sans autorisation préalable, sur les façades, les véhicules, les voies publiques ou le mobilier urbain est puni de 3750 euros d'amende et d'une peine de travail d'intérêt général lorsqu'il n'en est résulté qu'un dommage léger.

**Article L322-2**

(Loi n° 95-877 du 3 août 1995 art. 26 Journal Officiel du 4 août 1995)

(Ordonnance n° 2000-916 du 19 septembre 2000 art. 3 Journal Officiel du 22 septembre 2000 en vigueur le 1er janvier 2002)

(Loi n° 2002-5 du 4 janvier 2002 art. 27 Journal Officiel du 5 janvier 2002)

(Loi n° 2002-1138 du 9 septembre 2002 art. 24 Journal Officiel du 10 septembre 2002)

(Loi n° 2003-88 du 3 février 2003 art. 8 Journal Officiel du 4 février 2003)

L'infraction définie au premier alinéa de l'article 322-1 est punie de trois ans d'emprisonnement et de 45000 euros d'amende et celle définie au deuxième alinéa du même

article de 7500 euros d'amende et d'une peine de travail d'intérêt général, lorsque le bien détruit, dégradé ou détérioré est :

1° Destiné à l'utilité ou à la décoration publiques et appartient à une personne publique ou chargée d'une mission de service public ;

2° Un registre, une minute ou un acte original de l'autorité publique ;

3° Un immeuble ou un objet mobilier classé ou inscrit, une découverte archéologique faite au cours de fouilles ou fortuitement, un terrain contenant des vestiges archéologiques ou un objet conservé ou déposé dans un musée de France ou dans les musées, bibliothèques ou archives appartenant à une personne publique, chargée d'un service public ou reconnue d'utilité publique ;

4° Un objet présenté lors d'une exposition à caractère historique, culturel ou scientifique, organisée par une personne publique, chargée d'un service public ou reconnue d'utilité publique.

Dans le cas prévu par le 3° du présent article, l'infraction est également constituée si son auteur est le propriétaire du bien détruit, dégradé ou détérioré.

Lorsque l'infraction définie au premier alinéa de l'article 322-1 est commise à raison de l'appartenance ou de la non-appartenance, vraie ou supposée, de la personne propriétaire ou utilisatrice de ce bien à une ethnie, une nation, une race ou une religion déterminée, les peines encourues sont également portées à trois ans d'emprisonnement et à 45 000 Euros d'amende.

### **Article L322-3**

(Loi n° 96-647 du 22 juillet 1996 art. 13 Journal Officiel du 23 juillet 1996)

(Ordonnance n° 2000-916 du 19 septembre 2000 art. 3 Journal Officiel du 22 septembre 2000 en vigueur le 1er janvier 2002)

(Loi n° 2002-1138 du 9 septembre 2002 art. 24 Journal Officiel du 10 septembre 2002)

(Loi n° 2003-88 du 3 février 2003 art. 9 Journal Officiel du 4 février 2003)

L'infraction définie au premier alinéa de l'article 322-1 est punie de cinq ans d'emprisonnement et de 75000 euros d'amende et celle définie au deuxième alinéa du même article de 15000 euros d'amende et d'une peine de travail d'intérêt général:

1° Lorsqu'elle est commise par plusieurs personnes agissant en qualité d'auteur ou de complice ;

2° Lorsqu'elle est facilitée par l'état d'une personne dont la particulière vulnérabilité, due à son âge, à une maladie, à une infirmité, à une déficience physique ou psychique ou à un état de grossesse, est apparente ou connue de son auteur ;

3° Lorsqu'elle est commise au préjudice d'un magistrat, d'un juré, d'un avocat, d'un officier public ou ministériel, d'un militaire de la gendarmerie, d'un fonctionnaire de la police nationale, des douanes, de l'administration pénitentiaire ou de toute autre personne dépositaire de l'autorité publique ou chargée d'une mission de service public, en vue d'influencer son comportement dans l'exercice de ses fonctions ou de sa mission ;

4° Lorsqu'elle est commise au préjudice d'un témoin, d'une victime ou d'une partie civile, soit pour l'empêcher de dénoncer le fait, de porter plainte ou de déposer en justice, soit en raison de sa dénonciation, de sa plainte ou de sa déposition ;

5° Lorsqu'elle est commise dans un local d'habitation ou dans un lieu utilisé ou destiné à l'entrepôt de fonds, valeurs, marchandises ou matériels, en pénétrant dans les lieux par ruse, effraction ou escalade.

Lorsque l'infraction définie au premier alinéa de l'article 322-1 est commise à l'encontre d'un lieu de culte, d'un établissement scolaire, éducatif ou de loisirs ou d'un véhicule transportant des enfants, les peines encourues sont également portées à cinq ans d'emprisonnement et à 75 000 Euros d'amende.

#### **Article L322-4**

La tentative des infractions prévues à la présente section est punie des mêmes peines.

\*

Voyons à présent comment la littérature scientifique aborde cette thématique.

## **4.2. Etat de l'art**

La bibliographie forensique met à notre disposition de nombreux travaux concernant l'influence de l'instrument scripturant sur l'écriture. Ce n'est en revanche pas le cas pour les effets que peuvent avoir la position du support ou celle du corps sur la trace graphique.

### **4.2.1. Documents de question / de comparaison**

Dans la forme la plus simple du processus de comparaison et identification d'écriture, l'expert dispose d'un échantillon d'écriture dont l'auteur est inconnu ou contesté. Cet échantillon est appelé document de question. Cette écriture de question est comparée à un

autre échantillon d'écriture appelé échantillon de comparaison. Le spécimen de comparaison peut être dicté ou spontané (Found & Rogers, 1999). En pratique, l'étendue du matériel de comparaison est souvent en deçà de ce dont devrait théoriquement disposer l'expert. Il lui est possible de demander un complément d'information auprès du service requérant, mais cette requête n'est pas toujours complètement satisfaite, aussi bien du point de vue du nombre que de la nature des écrits de comparaison. Ceci pose entre autres la question de la quantité de matière suffisante pour estimer la variabilité naturelle d'un scripteur. En d'autres termes, et si on se place par exemple à l'échelle du mot, cela reviendrait à se demander combien d'exemplaires d'un mot sont nécessaires pour avoir une idée de l'étendue de la variabilité scripturale d'un individu.

#### **4.2.2. Variabilité**

La variabilité naturelle est l'imprécision avec laquelle les habitudes d'écriture d'un scripteur sont exécutées à différentes occasions. Dans les règles d'identification d'écriture qu'énonce Hilton en 2001, la règle n° 5 concerne la variabilité intra-individuelle. Elle définit son étendue comme une qualité individuelle. Il définit quatre corollaires : 1/ le degré de variation tend à augmenter avec la vitesse et le manque d'attention, 2/ la variation d'écriture est influencée par les conditions de rédaction telle que la position (corps / support), 3/ le but dans lequel est réalisé le document peut avoir un impact sur la variation, 4/ l'étendue de la variation tend à être faible lorsque les spécimen d'écriture sont réalisés à intervalles rapprochés.

Les anglo-saxons (Huber & Headrick, 1999) font la distinction entre « consistency » et « persistency ». Les deux termes désignent la régularité (ou constance) d'une écriture, la nuance se situant dans la modification ou pas de la forme de l'allographe. Lorsque le scripteur adopte une même forme d'allographe, mais que cette dernière varie selon les occasions, il s'agit de « consistency ». En revanche, lorsque dans des circonstances différentes, les formes employées sont distinctes, l'auteur parle de « persistency ». Il existe par exemple de nombreux scripteurs qui utilisent deux façons différentes d'effectuer la barre horizontale du « t », selon qu'il se trouve en position initiale, médiane ou terminale. Wing *et al* (1983) se sont aperçus que la modification d'allographe se produisait plus souvent en début de mot qu'en milieu ou en fin, et de manière plus générale qu'elle dépendait des lettres entourant l'allographe (Ellis, 1979 ; Van der Plaats & Van Galen, 1991). Les variations profondes

auxquelles cette étude s'intéresse sont celles liées à la sélection de l'allographe, à ne pas confondre avec les variations subtiles qui se produisent lors de l'exécution d'un même allographe, auxquelles se réfèrent normalement le terme de « variation naturelle ». La variabilité (ou variation naturelle) représente donc le degré avec lequel le scripteur s'éloigne de cette constance. Il s'agit d'un phénomène observé dans toute tâche motrice, que la pratique et l'entraînement peuvent atténuer, mais que le choix d'utiliser des allographes différents d'une même lettre peut renforcer. La variabilité intra-individuelle est inhérente à toute activité motrice: on ne reproduit jamais exactement le même geste au mm et à la ms près. Cela est dû au fait que nous ne sommes pas des machines avec des éléments mécaniques tels que des moteurs ou des ressorts qui obéissent strictement aux règles de la physique. Nos moteurs sont des muscles composés d'un grand nombre de fibres aux caractéristiques biochimiques variables, qui peuvent avoir une raideur variable et qui sont fatigables. Ces muscles sont eux-mêmes commandés par un cerveau lui-même soumis à de nombreuses sources de variation. La variabilité motrice que l'on mesure en sortie peut donc être due à deux origines distinctes (en théorie): une variabilité centrale (cérébrale) et une variabilité périphérique (musculaire). Osborn (1929) précise que les fluctuations qui se produisent dans une écriture **constituent par essence des habitudes et définissent en cela l'étendue de l'intra-variabilité scripturale d'un individu**. Ces variations dépendent de l'individu et des circonstances. Il est évident que les documents de comparaison ne reflètent pas toujours de manière exhaustive l'ensemble de ces variations et ne reproduisent pas forcément les circonstances qui en sont à l'origine. L'examen d'écriture doit tenir compte de ces disparités apparentes entre les documents de comparaison et le document de question, et s'appuyer sur ce degré de variation pour déterminer l'auteur d'un document.

Les travaux effectués sur la variabilité de la forme de l'écriture (intra et inter-individuelles) s'attachent à des éléments précis de l'écriture tels que les proportions au sein du bigramme « el » (hauteur relative du « l » par rapport au « e ») ou de la lettre « d » (hauteur relative de la hampe par rapport au cercle) (Wing & Nimmo-Smith, 1987). D'autres auteurs ont fait le choix d'aborder la variabilité de certaines lettres (d, f, h, k, p, t ; Eldridge, 1984) ou parties de lettres (cercles des lettres a, d, o, q ; Marquis, 2006, 2007). Kao en 1983, s'attache à la variabilité (intra) de pression. Il constate que dans les caractères chinois constitués de traits, la pression varie plus que dans les caractères anglais davantage constitués de mouvements continus et circulaires. Ce résultat peut être mis en relation avec les travaux ultérieurs de Ueda & Matsuo (2007) qui atteignent une valeur seuil de variabilité à partir de 60 répétitions des

caractères japonais (essentiellement constitués de traits). On peut ainsi s'attendre à ce que ce chiffre soit inférieur pour un mot écrit à l'aide de l'alphabet latin.

Kapoor et al. (1985) abordent le sujet sous un autre angle de vue, à savoir l'évolution de la variabilité (intra) à travers le temps. Leur étude menée sur 50 sujets âgés de 30 à 55 ans, et sur une période de dix ans, a montré qu'à partir de 45 ans, l'écriture était « fixée », c'est-à-dire que le patron de formation de chaque lettre demeurait inchangé. La tendance à la simplification et à l'apparition de nouvelles caractéristiques était moins marquée chez ces sujets.

Longstaff & Heath (1997) quant à eux, ont travaillé sur le lien entre variabilité spatiale et variabilité temporelle (intra et inter). Ils évaluent la lisibilité de l'écriture (paramètre spatial), la vitesse et l'accélération du mouvement (paramètres dynamiques). Leur constat est le suivant : la variabilité spatiale est en partie le résultat d'une variabilité dynamique. L'observation de l'aspect dynamique de l'écriture fournit une information complémentaire de celle qui peut être extraite de l'observation de la trace statique. Dans notre travail, nous travaillons 'on line' (en ligne) c'est-à-dire que nous enregistrons l'écriture au moment de sa réalisation, nous disposons donc d'informations de type spatial et dynamique.

#### **4.2.3. Influence de l'instrument scripturant**

En 1950, Mathyer constate que certains détails d'écriture tels que les arrêts, les retouches ou les reprises sont moins visibles, voire absents, lorsque la plume est remplacée par un stylo à bille. Quelques années plus tard, Hilton (1957) décrit le tracé du stylo à bille comme un tracé dépourvu de nuances. Il note une homogénéité de l'intensité de l'encre, même si des variations au niveau de la pression sont toutefois présentes.

En revanche, Black (1966), dans son travail sur les stylos à pointe fibre, observe des variations de l'intensité de l'encre ainsi que des traits d'attaque et de terminaison moins effilés qu'avec d'autres types d'instruments.

Ce n'est qu'en 1967 que Mathyer élargit son étude à d'autres instruments scripturants. Il ne remarque aucune modification notable des caractéristiques d'écriture (disposition, modes de formation, vitesse apparente, régularité, pression) si ce n'est que plus la pointe est large,

plus le scripteur utilise d'espace. Par ailleurs, la pointe fibre a tendance à faire augmenter le nombre de césures et le crayon à le faire diminuer. Selon l'auteur, l'influence de l'instrument est rarement très importante, souvent même inexistante, et elle dépend surtout de la personne qui écrit ou qui signe. En ce sens, il est complètement en accord avec ce qu'écrivait Osborn en 1910, à savoir qu'il est parfaitement possible de comparer des textes ou des signatures tracés au crayon, avec des textes ou des signatures à l'encre, au stylo à bille ou encore au stylo à pointe fibre, ou vice-versa. Ce n'était en revanche pas l'avis d'Edmond Locard dans son *Traité de Criminalistique* (1936) lorsqu'il qualifiait d'extrêmement périlleux le fait de mettre en parallèle les constatations tirées d'une pièce incriminée tracée au crayon avec celles tirées d'une pièce de comparaison écrite à la plume.

En 1984, Hilton présente deux paramètres comme pouvant être à l'origine de la disparition de certains détails d'écriture : l'épaisseur de la pointe et la réaction de l'encre sur le papier. Il attribue ce phénomène à la nature même de l'instrument, qui **permet ou non une reproduction des détails, et non à des modifications du mode de formation des lettres de la part du scripteur.**

Enfin, le travail de Masson (1985) est dans la lignée de celui de Mathyer (1969), si ce n'est qu'il apporte des éléments concernant l'écriture avec un marqueur. Malgré la perte de certaines informations avec une pointe large, l'auteure note une grande constance des habitudes d'écriture (inclinaison, traits d'attaque et de terminaison, la plupart des modes de formation, longueur et positionnement des barres de « t », hauteur relative des lettres, ponctuation, forme et taille relative des points de « i », espacement interlettres et intermots) (figure 10a). Elle souligne quand même la modification de certains modes de formation (figures 10b&c) et un plus grand respect de la ligne de base imprimée. En 1992, elle approfondit son étude avec les stylos à pointe fibre et observe une stabilité de la morphologie des signatures. Elle ne constate que des modifications très superficielles des détails d'écriture, comme l'avait déjà observé Osborn en 1929. Selon lui, un changement d'instrument peut transformer et rendre une écriture différente en apparence, mais un examen rapide permet de montrer que le changement n'est que superficiel.





Figure 10a : Conservation du mode de formation des lettres quel que soit l'instrument scripturant utilisé (stylo à bille, stylo à pointe fibre et marqueur) (extrait de Masson, 1985).



Figure 10b : L'épaisseur du trait peut parfois masquer le mode de formation d'une lettre (« Parker » 3<sup>ème</sup> ligne) (extrait de Masson, 1985).

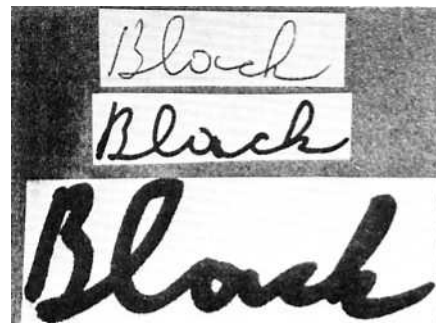


Figure 10c : Dans le cas d'un mode de formation particulier (« a »), l'examen du tracé au marqueur est insuffisant (extrait de Masson, 1985).

La littérature présente donc de nombreux arguments en faveur d'une constance de l'écriture, quel que soit l'instrument scripturant utilisé. Il faut retenir que lorsque des différences sont observées, elles sont à la fois dues à l'intra-variabilité naturelle qui caractérise chacun d'entre nous, et au fait que certains détails soient moins apparents selon la nature de la pointe (épaisseur et souplesse).

#### 4.2.4. Influence du support

Il existe quelques travaux faisant intervenir des supports non conventionnels. Dans tous les cas, c'est davantage la nature du support qui est présentée comme atypique, que sa position.

Les travaux de Totty (1981) et Taylor (1991) présentent des comparaisons d'écritures dans lesquelles les mentions de question ont été apposées sur un corps humain (figures 11 & 12a). Malgré l'originalité du support, l'étude comparative a été possible (figure 12b) et a contribué à l'élucidation de deux affaires criminelles.

Dans le premier cas, l'auteur montre qu'en dépit d'un support non conventionnel, les caractéristiques de l'écriture de question demeurent suffisamment intactes pour conduire à une élimination (1<sup>er</sup> suspect) puis à une identification (2<sup>ème</sup> suspect).

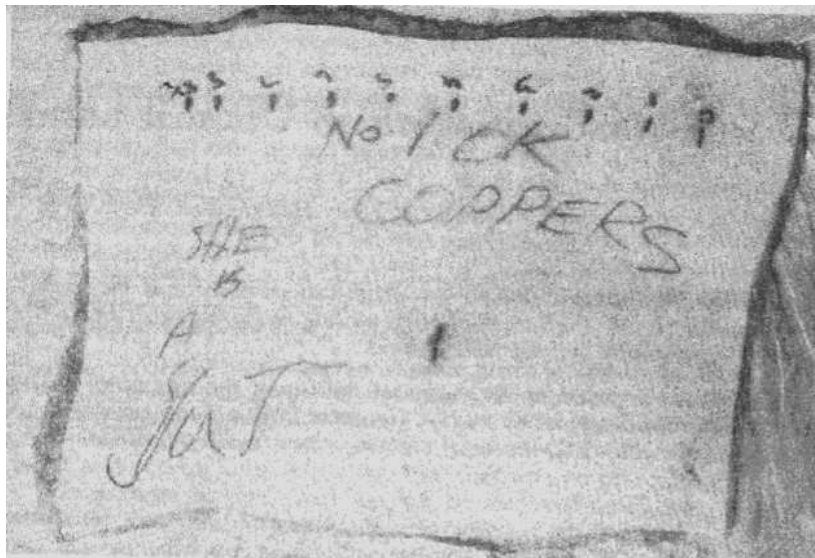


Figure 11 : Ecriture retrouvée sur le ventre de la victime (extrait de Totty, 1981).

Dans le deuxième cas, l'auteur souligne l'aspect naturel du tracé même si la formation de certaines lettres est rendue difficile.

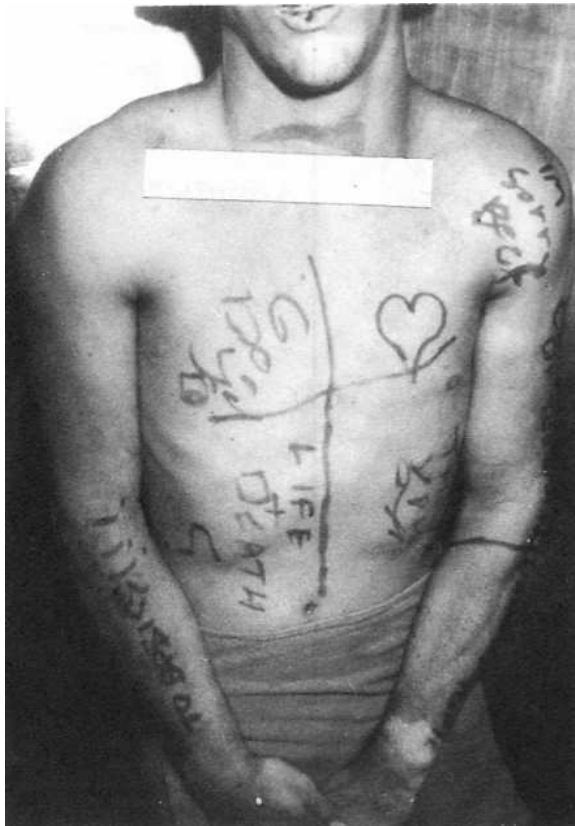


Figure 12a : Inscriptions présentes sur le corps de la victime (extrait de Taylor, 1991).

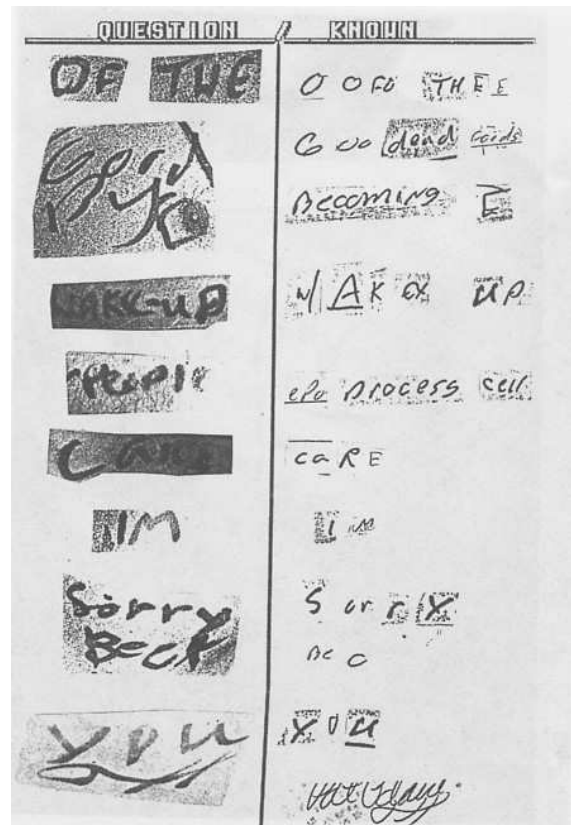


Figure 12b : Comparaison des spécimens de question avec des spécimens spontanés appartenant à la victime (extrait de Taylor, 1991)

Un autre cas d'inscription apposée sur un support non classique est présenté par Dreger en 1997. L'étude consiste à déterminer l'authenticité d'un graffiti retrouvé sur un rocher de Fort St. James (Canada). Même s'il suppose que les conditions d'écriture, et notamment le support, peuvent avoir une influence sur les habitudes d'écriture, l'auteur pense que certaines similitudes sont suffisamment significatives pour pouvoir associer le graffiti à son auteur.

Enfin, dans leur étude présentée au 3<sup>ème</sup> Congrès de l'Association des Experts Forensiques en Ecriture (GFS, 1997), Junker & Köller étudient l'écriture lorsqu'elle est réalisée sur une table et sur un mur. Ils concluent que la comparaison entre un spécimen réalisé sur un mur et un spécimen réalisé dans une condition habituelle d'écriture (devant une table) reste valable, à condition de disposer d'un matériel de comparaison adéquat.

Les données concernant l'influence que peut avoir la position du support sur l'écriture sont donc d'ordre général. Ces trois articles ne fournissent pas suffisamment de détails sur les éléments discriminants qui ont permis d'établir les conclusions.

#### 4.2.5. Influence de la position du corps

La bibliographie forensique à ce sujet demeure limitée. Hormis quelques généralités, nous n'avons trouvé aucune étude mettant en évidence l'influence que peut avoir la position du corps sur l'écriture.

Selon Huber & Headrick (1999), les effets d'une posture corporelle inadaptée, ou en tout cas inhabituelle, sont très variables. Ils relatent le cas décrit par Grant (1974) où une écriture a été déformée du fait de circonstances atypiques. Le scripteur a rédigé un document sur un comptoir encombré, tout en tenant des outils lourds dans l'autre main. Les spécimens de comparaison ont été obtenus en reproduisant ces conditions et la correspondance entre les écrits s'est révélée être particulièrement frappante.

Found et Rogers (1999), dans leur énumération des dissemblances que l'on peut trouver au sein de la signature d'un même individu, montrent qu'une posture d'écriture non classique, à savoir debout avec une feuille de papier dans la main, perturbe la qualité du trait (pression, fluidité, vitesse, niveau graphique) (figure 13).

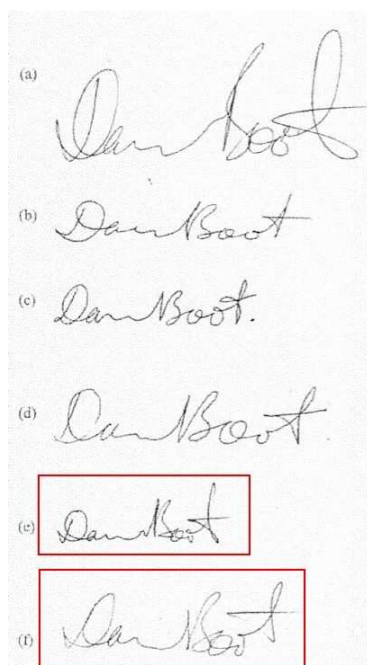


Figure 13 : (e) est la signature « normale » et (f) la signature rédigée debout avec une feuille de papier dans la main (les autres spécimens ont été réalisés dans des conditions ne faisant pas intervenir la posture) (extrait de Found & Rogers, 1999).

Antohie (2003), dans son travail sur le déguisement d'écriture, évoque le fait que des facteurs naturels tels qu'une posture inconfortable, peuvent supprimer l'aspect automatique de l'écriture (notion qui sera plus largement développée par la suite) et par conséquent entraîner des modifications d'un point de vue morphologique.

Enfin, Equey et al. (2008) testent l'impact que peuvent avoir trois conditions posturales différentes de la posture classique (assis devant une table) sur les dimensions de signatures. Leurs travaux montrent qu'il n'y a pas de tendance générale. Les scripteurs ne réagissent pas tous pareil : certains augmentent les dimensions de leur signature, d'autres les réduisent, d'autres enfin réagissent différemment selon les conditions.

L'ensemble des paramètres précédemment cités (instrument, position du support, position du corps) peuvent influencer la taille de l'écriture dans la mesure où elle est réalisée spontanément, c'est-à-dire sans consigne de rédaction. En effet, il est possible que plus l'espace disponible sur le support soit important, plus les dimensions adoptées par le scripteur soient grandes. Mais ce changement de taille affecte-t-il la forme de l'écriture ? La notion d'invariance spatiale en fonction de la taille de l'écriture a été abordé par Van Galen & Teulings (1983). Les auteurs argumentent en faveur d'une constance de la forme malgré les variations de taille. Rogers & Found en 1996 indiquent clairement que bien que certains paramètres spatiaux montrent une remarquable invariance, d'autres paramètres ne varient pas de manière proportionnelle. Marquis et al. (2007), dans leur étude sur l'influence de la taille sur la forme des lettres à boucles, sont en désaccord avec l'hypothèse d'invariance spatiale. Ils conseillent de travailler avec du matériel de comparaison de même taille.

L'ensemble de ces éléments demeure donc peu informatif quant aux modifications précises que peut entraîner une posture non classique sur l'écriture.

### **4.3. Démarche globale**

L'influence de l'instrument scripturant sur l'écriture a suffisamment été étudiée, et les données à ce sujet ont suffisamment été étoffées pour que l'on considère l'effet de ce paramètre comme négligeable d'un point de vue graphistique. Cela signifie que la trace reste similaire aussi bien au niveau graphonomique (étude de l'ensemble des phénomènes graphiques par la méthode générale des concordances et des discordances) qu'au niveau

graphométrique (mesure des dimensions de l'écriture et interprétation statistique au moyen de méthodes d'analyse multi-variée). Seule la bombe aérosol reste un outil à tester.

En revanche, l'influence que peuvent avoir la position du support ou la position du corps sur l'écriture demeure encore un domaine dans lequel des tests supplémentaires sont nécessaires.

Face à ce constat, il peut paraître intéressant de comprendre ce qu'il se passe en amont de la trace graphique. Nous cherchons alors à élucider les mécanismes responsables de la conservation (ou de l'absence de conservation) des caractéristiques individuelles de l'écriture. Pour ce faire, notre démarche est la suivante : nous devons saisir les phénomènes physiologiques (neurologiques, cognitifs et moteurs) à l'origine de l'acte d'écriture, ainsi que le degré d'automatisme que cette tâche implique. Forts de ces informations, nous nous donnons tous les moyens d'envisager la trace sous un angle nouveau, complémentaire de celui adopté par le domaine forensique, et plus précisément d'évaluer la variabilité intra-individuelle.

En résumé, les sciences forensiques peuvent-elles tirer profit des méthodologies et techniques développées par les neurosciences pour étudier la production écrite ?

## 5. Lien entre sciences forensiques et connaissances neuroscientifiques

Peu d'auteurs envisagent l'écriture à la fois sous un angle forensique et sous un angle neuroscientifique.

Le premier est Dawson (1985), expert en documents au Centre de Science Forensique de Toronto, Canada, dans son étude faite sur les gauchers. Il se pose la question suivante : quelles sont les écritures main gauche, modifiées à un tel point qu'elles ne peuvent être rapprochées des écritures main droite correspondantes ? Il effectue une étude détaillée des différences persistantes (modification de l'inclinaison, ruptures des connexions entre le corps des lettres et les hampes, disparition des retraçages, direction aléatoire des barres de « t »...) et suggère que ces dernières sont d'une part dues à un manque de dextérité de la main non dominante, et d'autre part au fait que des processus neurophysiologiques distincts soient impliqués dans ces deux actions. En effet, pour la majorité des droitiers, le centre du langage se situe dans l'hémisphère gauche. Les informations nécessaires à la formation des lettres sont ensuite acheminées d'un hémisphère à l'autre par le corps calleux. Et c'est de l'hémisphère droit que proviennent les signaux moteurs (main, bras, poignet) à l'origine de l'écriture. Lorsqu'un droitier écrit de la main gauche, la séquence spatio-temporelle des contractions musculaires propre à la main droite doit être modifiée afin de la rendre adéquate pour la main gauche. Ceci rend le mécanisme plus complexe, et pourrait selon l'auteur, expliquer le manque de fluidité que manifestent ces scripteurs (en plus du manque de dextérité dû à l'utilisation de leur main non habituelle). De ces résultats, découle l'idée qu'**une meilleure connaissance du rôle du cerveau dans l'écriture est importante pour l'expert en écriture**, et qu'elle ne peut qu'améliorer sa capacité à expliquer et interpréter les différences. Selon Dawson, expliquer correctement les variations retrouvées dans l'écriture avec la main non dominante, et dans l'écriture déguisée en général, nécessite de connaître ce qui se passe dans notre cerveau au moment où nous écrivons.

Teulings & Schomaker (1993), de l'Institut de la Cognition et de l'Information de Nimègue, Pays-Bas, affirment quant à eux qu'une recherche des caractéristiques invariantes de l'écriture peut être d'une grande utilité pratique pour les experts en écriture. Leurs collègues Thomassen & Van Galen (1997) pensent que la mise en évidence de

caractéristiques temporelles à partir d'une trace statique pourrait aider l'expert dans son travail, en le renseignant sur l'identité du scripteur et sur les circonstances temporelles entourant la rédaction.

Found & Rogers (1999), du Laboratoire d'Expertise et de Profilage Forensique de l'Université de La Trobe, Australie, dans leur description des points rendant ou non une comparaison d'écriture possible, soulignent la nécessité de comparer les mêmes allographes d'une même lettre (cursif vs cursif, script vs script, majuscule vs majuscule), car ils sont le résultat d'une même mémoire motrice. Ils résument dans un diagramme les différentes étapes de la production d'écriture ainsi que les variables associées qui peuvent influencer la qualité du trait (pression, points de contact de l'instrument avec le support, connexions entre les traits, régularité) (Found *et al*, 1997) (figure 14).

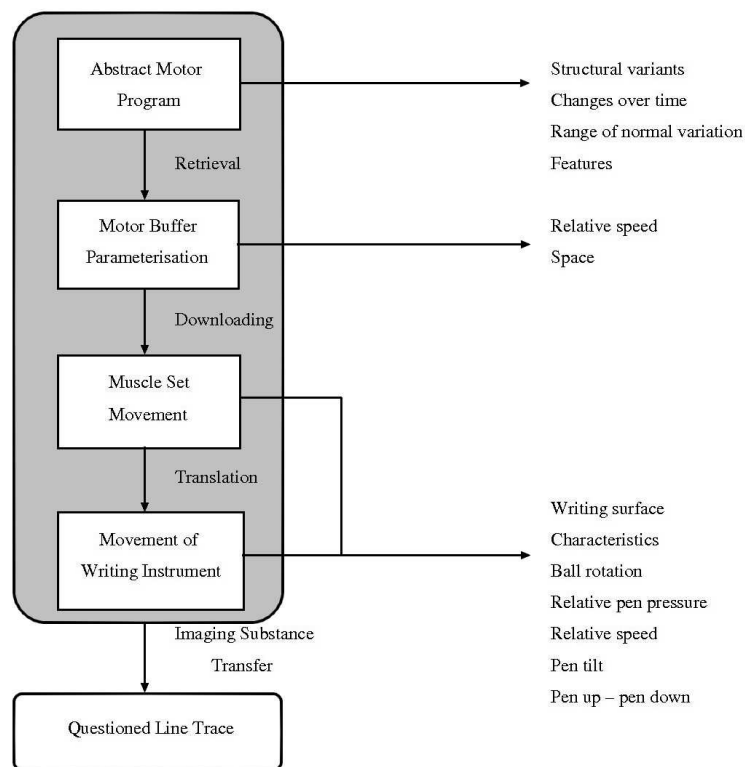


Figure 14 : Vue d'ensemble des principales étapes impliquées dans la production d'écriture, et variables correspondantes (reproduit de Found *et al*, 1997)

Enfin, Ostrum & Tanaka (2006), de la Division Sciences Forensiques de l'Agence des Services Frontaliers du Canada, vérifient que les caractéristiques d'ordre cinématique extraites par les experts en écriture (impression de vitesse et de pression) soient confirmées



par les données numériques enregistrées par une tablette graphique (technique largement employée par la psychologie expérimentale).

Hormis ces quelques généralités évoquées de part et d'autre, aucune des deux disciplines n'a, à notre connaissance, entrepris de travaux en commun. Un des objectifs de ce travail de thèse est notamment de **faire le pont entre ces deux sciences dans le domaine de l'analyse de l'écriture**. Le choix des neurosciences comme approche pouvant compléter l'approche forensique s'est alors imposé. En effet, cette discipline décrit des concepts théoriques envisageant l'écriture en tant que mouvement invariant (stable), décrit le mouvement d'écriture en intégrant les notions de variabilité (intra et inter), mais elle utilise également des méthodes expérimentales permettant d'enregistrer l'écriture au moment où elle est réalisée (tablette graphique).

## 6. Aspect neuroscientifique

### 6.1. Notions générales

#### 6.1.1. Les structures nerveuses intervenant dans l'acte moteur

L'influx nerveux à l'origine d'un mouvement peut provenir soit de la moelle épinière, et à ce moment-là on parle de mouvement réflexe, soit de structures sous-corticales, et on parle de mouvement automatique, ou enfin du cortex moteur, et il s'agit alors d'un mouvement volontaire (figure 15) (Sève, 2009).

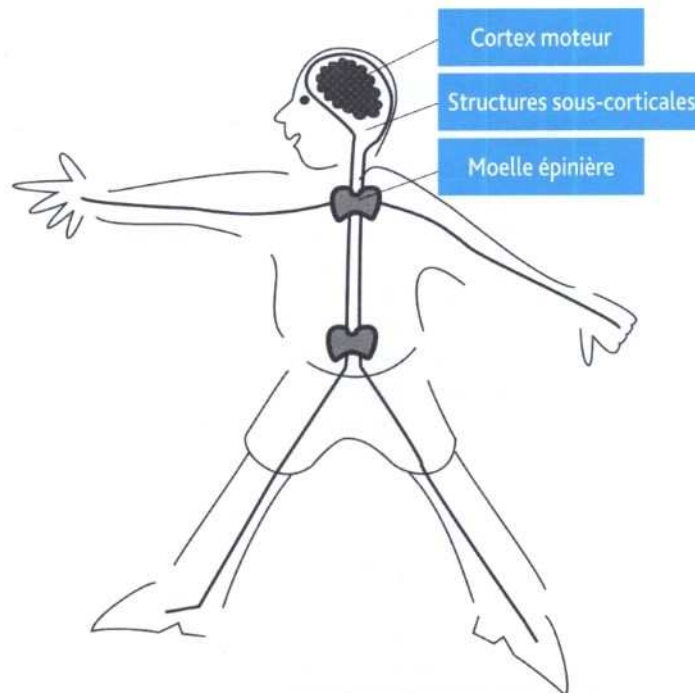


Figure 15 : Les structures nerveuses intervenant dans l'acte moteur (extrait de Sève, 2009)

L'ensemble du processus gérant l'exécution du mouvement étant sensible à des mécanismes de contrôle par rétroaction, l'organisation centrale (innée ou acquise) à l'origine du mouvement peut se généraliser en fonction des capacités de flexibilité et de plasticité du système (Paillard, 1979).

Dans certains mouvements tels que l'écriture, le rôle du cortex moteur peut d'abord prédominer pour ensuite perdre de son importance au profit des centres nerveux sous-corticaux. Le mouvement acquiert alors une part d'automatisme (Goussard, dernière consultation le 10/12/09).

### **6.1.2. Les trois types de mouvements**

De nombreux mouvements sont accomplis « sans y penser », de façon réflexe ou automatique. Mais notre activité se traduit également à travers des mouvements volontaires, c'est-à-dire des mouvements précédés par l'intention de les exécuter.

#### **6.1.2.1. Le mouvement réflexe**

Le mouvement réflexe ne nécessite pas de période d'apprentissage. Génétiquement précâblé, il répond à des stimuli simples. C'est par exemple le cas lors du retrait brutal de la main suite au contact avec un objet brûlant ou glacé (Sève, 2009).

#### **6.1.2.2. Le mouvement automatique**

Le mouvement automatique est permis grâce à l'établissement de programmes moteurs<sup>1</sup> construits et stabilisés par l'apprentissage (Sève, 2009). Ce sont donc des séquences comportementales complètes qui sont gérées par certains centres nerveux. Le maintien de la station debout, à laquelle vient se greffer la locomotion illustre parfaitement ce phénomène chez l'être humain (Collet, 2002).

#### **6.1.2.3. Le mouvement volontaire**

Le mouvement volontaire est le fait d'un individu, et non pas d'une espèce. Il se construit avec l'apprentissage, ce qui peut lui donner une certaine dimension automatique, et faire qu'il ne sollicite quasiment plus aucune ressource attentionnelle (Collet, 2002).

---

<sup>1</sup> Notion plus largement détaillée par la suite

La commande de tous nos mouvements volontaires provient de notre cerveau. Une des régions les plus impliquées dans la programmation de ces mouvements est le *cortex moteur* (figure 16).

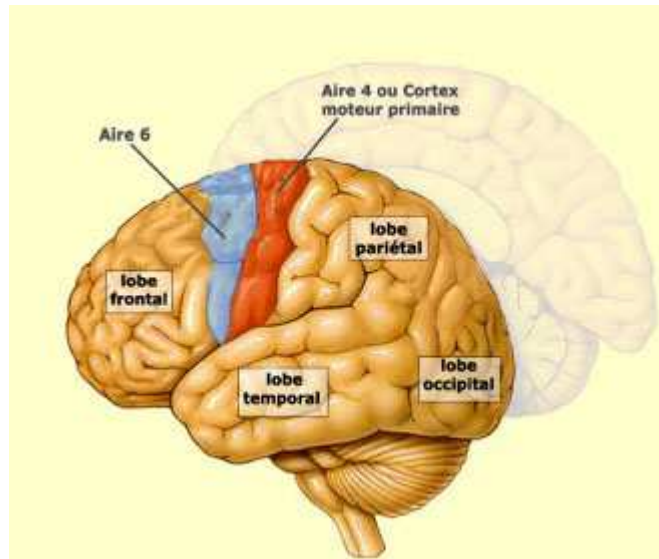


Figure 16 : Face externe de l'hémisphère cérébral gauche (extrait de <http://www.lecerveau.mcgill.ca>)

Lors de la réalisation d'un mouvement, le cortex moteur reçoit des informations de la part des différents lobes du cerveau (*pariétal* pour la situation du corps dans l'espace, *frontal* pour les objectifs à atteindre et le choix d'une stratégie appropriée, *temporal* pour les souvenirs d'anciennes stratégies, etc.).

Il existe, au sein du *cortex moteur primaire* (une des deux aires composant le cortex moteur), une cartographie des différentes zones cérébrales contrôlant le mouvement de chaque partie du corps. L'espace occupé par chaque composante de cette « carte motrice » est directement proportionnel au degré de précision caractérisant le mouvement en question (les parties qui ont le plus de finesse dans le mouvement sont représentées en plus gros sur le dessin). Et c'est grâce à leur propriété de plasticité que les neurones sont en mesure de modifier l'efficacité de leurs connexions synaptiques, permettant ainsi à des zones correspondant à des mouvements acquis de s'agrandir avec l'apprentissage. Cette *organisation somatotopique* est représentée schématiquement par l'Homunculus de Penfield (figure 17).

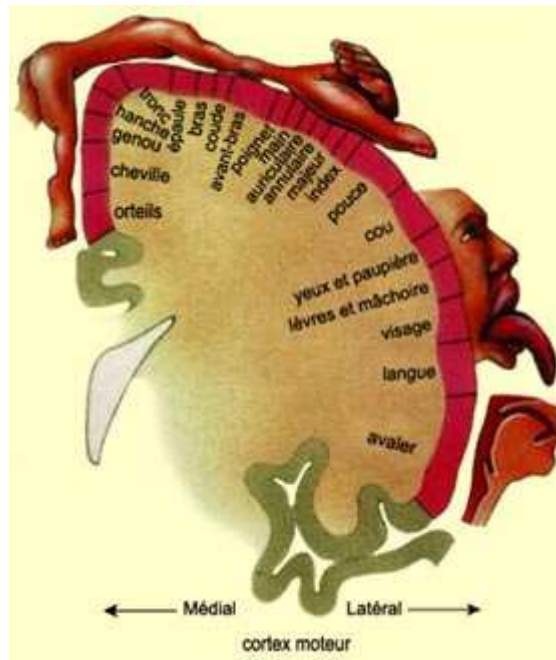


Figure 17 : Homunculus de Penfield (coupe verticale de l'hémisphère cérébral)  
(extrait de <http://www.lecerveau.mcgill.ca>)

"Les surfaces allouées à la main et au visage ont une taille disproportionnée par rapport au reste du corps. Ceci n'est pas étonnant puisque c'est justement la dextérité et la rapidité de mouvement des mains et de la bouche qui confèrent à l'homme deux de ses facultés les plus spécifiques : se servir d'outils (notamment pour écrire) et parler."  
(<http://www.lecerveau.mcgill.ca>).

Le mouvement volontaire se décompose en trois temps : un premier niveau s'occupe de définir les objectifs du mouvement et les comportements à mettre en œuvre pour atteindre ces objectifs (cortex frontal, pariétal postérieur et ganglions de la base) (figure 18), un second niveau spécifie la séquence de contraction des différents muscles (aire motrice supplémentaire, cortex prémoteur et cervelet), et un troisième niveau permet l'activation de la séquence de contraction musculaire (cortex moteur primaire, tronc cérébral et moelle épinière) (figures 19 a&b).

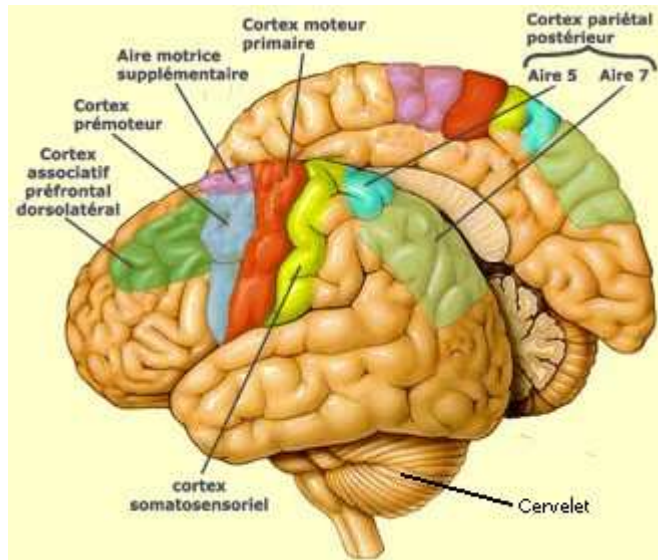


Figure 18 : Face externe de l'hémisphère cérébral gauche et face interne de l'hémisphère cérébral droit (extrait de <http://www.lecerveau.mcgill.ca>)

Le mouvement volontaire peut être accompagné d'*activités motrices automatiques* qui participent au mouvement. Le thalamus et les ganglions de la base sont les structures externes au cortex moteur et intervenant dans ce processus. Cette motricité involontaire est par exemple à l'origine des mouvements de nos mains lorsque nous parlons.

L'exécution de chaque mouvement s'accompagne d'une rétroaction sensorielle conférant au système moteur un *aspect sensorimoteur*. Des paramètres tels que la durée ou l'amplitude de contraction sont des éléments qui sont déterminés en fonction des informations sensorielles relatives aux mouvements précédents. Et c'est grâce à cette « mémoire sensorielle » que le maintien postural ou le choix du degré de tension des muscles avant et après chaque mouvement volontaire sont réalisés (figures 19a&b) (<http://www.lecerveau.mcgill.ca> / <http://www.anatomie-humaine.com>).

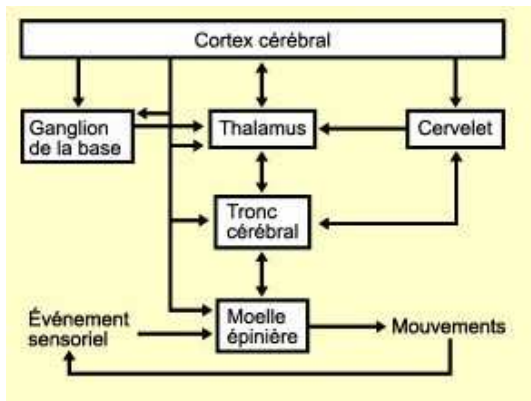


Figure 19a : Séquence d'activation des aires motrices (extrait de <http://lecerveau.mcgill.ca>)

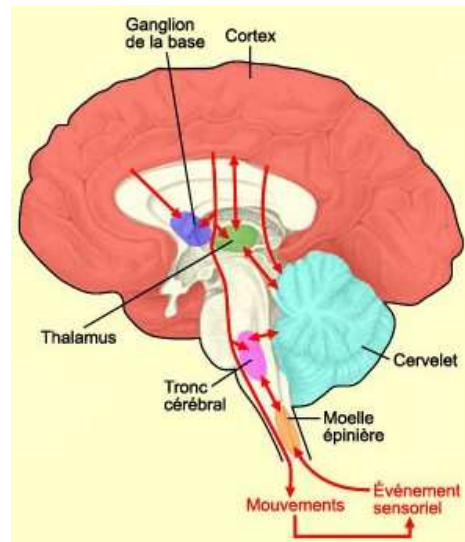


Figure 19b : Séquence d'activation des aires motrices (coupe verticale de l'hémisphère cérébral) (extrait de <http://www.lecerveau.mcgill.ca>)

Afin d'être le plus exhaustif possible, il est également nécessaire de préciser que les aires oculo-motrice (responsables des mouvements associés de la tête et des yeux), les aires 21 et 22 (coordination du mouvement volontaire) et les aires corticales associatives (élaboration du mouvement, volontaire ou pas) interviennent dans le mouvement. Concernant le mouvement d'écriture par exemple, les aires corticales associatives sont le siège de ce que l'on désigne par « polygone du langage », comprenant d'une part le centre de l'écriture et du langage (centres moteurs), et d'autre part les centres de la compréhension des mots parlés, écrits ou imprimés (centres de reconnaissance). Le centre de l'écriture est placé au voisinage des territoires moteurs qui correspondent au membre supérieur et à la main (figure 20) (<http://www.anatomie-humaine.com>).

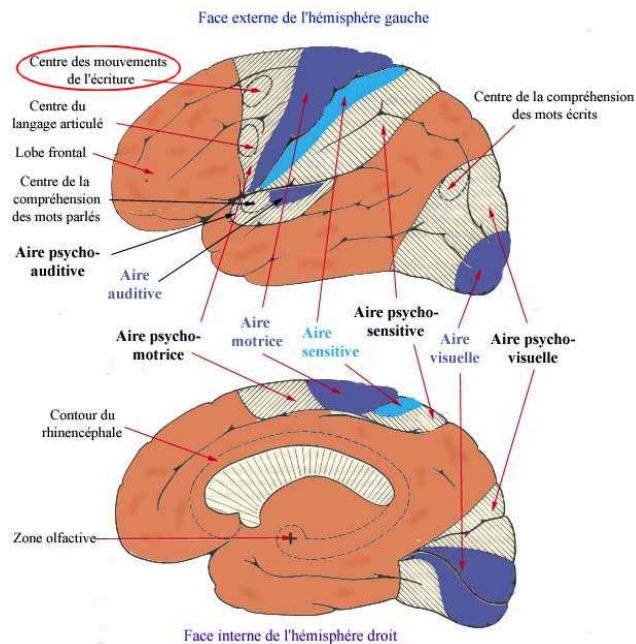


Figure 20 : Aires corticales du polygone du langage (extrait de <http://lecerveau.mcgill.ca>)

#### 6.1.2.4. Bilan

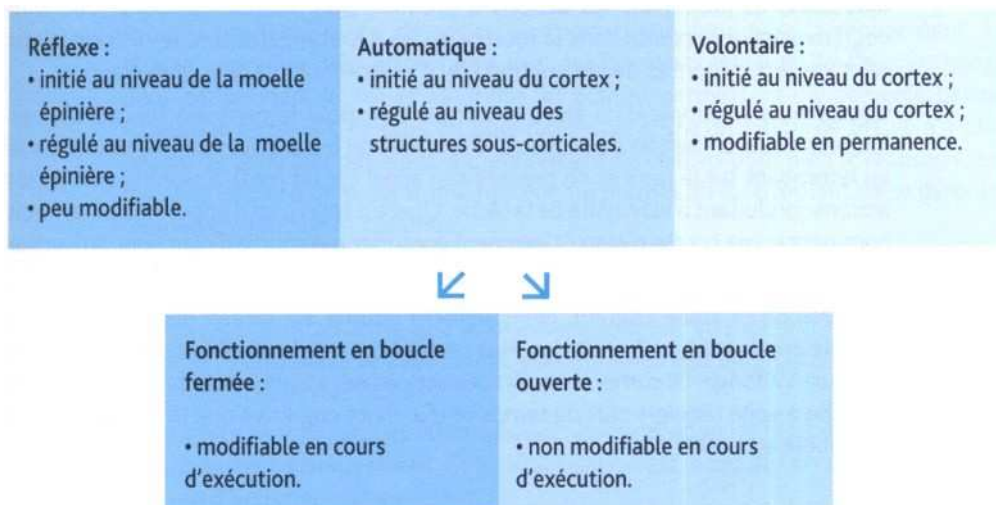


Figure 21 : Les trois types de mouvements (extrait de Sève, 2009). La notion de boucle sera plus largement définie par la suite.

### 6.2. Modèles décrivant l'écriture

Il existe trois types de modélisation du processus d'écriture. Les premiers, dits **neurocognitifs** ou macroscopiques, ont une structure hiérarchisée de type « top-bottom », c'est-à-dire du cortex vers la périphérie. C'est le modèle modulaire de Van Galen (1991) qui



fait actuellement référence en sciences cognitives. La psychologie cognitive s'appuie sur ce modèle.

Les seconds, dits **computationnels** ou microscopiques, se focalisent dans un premier temps sur les aspects périphériques des mouvements d'écriture qu'ils intègrent ensuite aux aspects centraux. Ils sont de type « bottom-up ».

Ces deux approches traditionnelles du contrôle moteur partagent l'hypothèse commune de l'existence d'un *programme moteur*.

Les troisièmes, dits **dynamiques**, consistent à étudier non pas le comportement de chaque composante du système, mais à considérer l'ensemble des éléments comme un tout. Il s'agit d'identifier les paramètres qui permettent au système de conserver une *structure spatiotemporelle stable*. Selon ce modèle, le processus graphomoteur ne serait pas dicté par des commandes internes telles celles émanant d'un programme moteur, mais serait plutôt le résultat d'une *auto-organisation* cohérente de l'ensemble des composantes du système.

Avant de faire un état de l'art de l'ensemble de ces modèles, il est nécessaire de définir certaines notions.

### **6.2.1. Evolution du concept de programme moteur**

La théorie des programmes moteurs nous aide à mieux comprendre comment sont stockés et exécutés les mouvements. Cependant, lorsque nous regardons par exemple les sportifs, nous sommes surpris par la diversité des comportements qu'ils produisent (Sève, 1998).

En 1890, James énonce la notion suivante « Pour faire une action, une personne doit d'abord se créer une image claire de cette action ». Lashley en 1917, est le premier à parler de programme moteur, qu'il définit alors comme « l'intention à agir qui détermine la séquence des événements à produire ». Barlett en 1932 utilise le terme de « schéma » pour décrire la représentation interne des mouvements. Miller, Galanter et Pribram (1960) introduisent la notion de « plan ». Ce plan est essentiellement similaire à la notion de programme informatique. Henry et Rogers (1960) mettent en place un modèle théorique stipulant que le patron nerveux d'un geste spécifique et bien coordonné est stocké dans un programme qui

dirige les détails neuromoteurs de son exécution. Keele (1968) définit le programme moteur comme un ensemble de commandes musculaires structuré avant le début d'une séquence de mouvements et qui permet à la séquence entière de s'exécuter sans influence de feedback périphérique. Grillner et Shik (1973), Arshavsky et al. (1972) mettent en évidence des générateurs centraux de patrons moteurs situés au niveau de la moelle épinière et activés par une commande centrale. Ces générateurs sont responsables de la répétition de séquences entières d'activation musculaires à répétition sans besoin d'intervention des centres cérébraux supérieurs. Schmidt (1975) définit le concept de *programme moteur généralisé* (PMG), c'est-à-dire que le programme ne contrôle pas seulement un geste spécifique mais plutôt une classe d'actions, c'est-à-dire un ensemble de mouvements partageant un patron commun de mouvement (par exemple, les lancers, les courses, l'écriture etc.). Selon ce schéma, seuls les traits généraux du geste seraient retenus. Une infinité de mouvements pourrait alors en découler.

Initialement, on envisageait que toutes les informations nécessaires à l'exécution de chaque mouvement et à chacune de ses variantes étaient stockées en mémoire (muscles devant se contracter, durée et ordre de chaque contraction etc.). La notion de programme moteur déterminant tous les aspects d'une réponse spécifique a finalement évolué vers celle de *plan moteur* plus global (Schmidt, 1975), déterminant les **aspects communs d'une classe d'actions** (*invariants*). Mais c'est le terme de « programme moteur » qui reste cependant le plus communément employé. Au sein du programme moteur, une représentation abstraite de la forme générale du mouvement serait mémorisée, ainsi que les réglages permettant aux structures de surfaces (*paramètres*) d'être ajustées en fonction des exigences de l'environnement (force, durée, muscles sollicités etc.) (La Rue, 2006). Selon Viviani (1994), ce sont les rapports topologiques et séquentiels entre les composantes du geste (et en particulier le geste d'écriture) qui seraient spécifiés au sein du programme moteur. La séquence des commandes spatio-temporelles serait préétablie, alors que les déterminants métriques et temporels, ainsi que les groupes musculaires impliqués dans le geste ne le seraient pas. Des processus indépendants fixeraient ces paramètres.

Le programme moteur permettrait la préparation d'un mouvement à l'avance, son stockage en mémoire et son exécution sans interruption. Les réajustements que peut subir le mouvement au cours de son exécution permettent au programme moteur de se construire et de se stabiliser. On parle alors de système en *boucle fermée* (par opposition à un système

fonctionnant en *boucle ouverte* qui n'autorise pas ces réglages). Beaucoup de gestes sont en fait composés des deux phases. A l'origine, les programmes moteurs ne contrôlent que de courts enchaînements d'actions. Ce n'est qu'avec la pratique qu'ils gagnent en stabilité, en précision et en coordination. La répétition du mouvement favorise leur stockage dans la mémoire à long terme, ce qui présente l'avantage de ne les rappeler qu'en fonction des besoins de la situation, et de **diminuer le coût attentionnel mis en jeu** (Sève, 2009).

Dans le cas de l'écriture, les invariants seraient avant tout d'ordre spatial, par spécification de la forme des lettres (taille relative, orientation, courbure). L'ordre dans lequel les *unités d'action* doivent être exécutées serait également établi.

#### Qu'est-ce qu'une unité d'action ?

Quel que soit le modèle envisagé, la notion de programme moteur implique l'existence d'une unité de base, c'est-à-dire dans le cas de l'écriture, une unité de segmentation de la trace (trait, lettre ou groupe de lettres). L'une des propriétés des programmes moteurs est de pouvoir être agencés de façon ordonnée pour pouvoir produire des mouvements complexes composés de plusieurs programmes moteurs. Le raisonnement est le suivant : si l'unité de base est par exemple l'allographe (type de lettre : majuscule ou minuscule, script ou cursif), alors ce dernier doit conserver ses caractéristiques (structure invariante) quel que soit le contexte dans lequel il est produit (Sallagoity, 2004). A l'heure actuelle, la question de la définition de l'unité de base du programme moteur à l'origine de l'écriture n'est pas tranchée. La plupart des travaux ont montré qu'elle n'était pas fixe. Elle varie notamment en fonction de la vitesse (Wing *et al*, 1983 ; Van der Plaats & Van Galen, 1991), de la position dans le mot (Thomassen & Schomaker 1986), de la pratique (Hulstijn & Van Galen, 1988), de la familiarité (Portier *et al*, 1990), et de la complexité de la tâche (Van der Plaats & Van Galen, 1990).

Dans le modèle de l'écriture de Van Galen & Teulings (1983), qui fait encore référence actuellement, le traitement de l'information nécessaire au déclenchement du mouvement d'écriture se décline en trois étapes : sélection d'une réponse adaptée (*rappel du programme moteur* stocké en mémoire) par détermination de la forme, planification concrète du mouvement (phase de *paramétrage*) par détermination de la taille, et exécution du mouvement proprement dit (phase d'*initiation motrice*) par sélection des groupes musculaires impliqués dans la réalisation motrice (Albaret & Santamaria, 1996).

## 6.2.2. Approche neurocognitive

### 6.2.2.1. La psychologie cognitive

Pour la psychologie cognitive, la production écrite est une activité cognitive complexe faisant intervenir plusieurs opérations simultanément. Le contrôle et le traitement de l'information au cours de la réalisation de cette action mobilise diverses ressources mentales (*ressources attentionnelles*), gérées par ce que l'on appelle la *mémoire de travail*. Afin d'éviter toute surcharge mentale, ce système de gestion met en place, via l'apprentissage, l'automatisation de certains traitements, permettant ainsi la prise en charge de situations nouvelles. En effet, le traitement, lorsqu'il est automatisé, présente l'avantage de pouvoir être réalisé de façon involontaire, rapide et irrépressible, sans recours à un contrôle conscient et donc à une attention soutenue (Piolat, 2004). Selon Alamargot et al. (sous presse), ce que les auteurs désignent par « trace linguistique linéaire respectant une visée communicative », l'ensemble des domaines de connaissances mis en jeu sont traités et exploités par un ensemble de processus plus ou moins automatisés qui dépendent du niveau d'expertise du rédacteur.

Une illustration de cette part d'automatisation dans le processus d'écriture est décrite dans les expériences de Saudek (1926). L'auteur montre que le style graphique de sujets devenus aveugles n'évolue plus à compter du moment où survient la cécité. Klages en 1949 déjà, avance l'hypothèse que pour toute action, se forme inconsciemment une image anticipée de son résultat. Et c'est cette représentation abstraite qui conditionnerait les mouvements à mettre en œuvre pour la réalisation de cette action. Dans les expériences de Saudek, les sujets ont conservé l'intégrité des automatismes acquis avant l'accident. Il leur manque simplement le contrôle nécessaire pour en créer de nouveaux.

Par hypothèse, la maîtrise de la rédaction de texte correspondrait ainsi à la gestion coordonnée de traitements peu coûteux (mouvements automatisés) et de traitements très demandeurs en ressources (mouvements délibérés).

Pour Piolat (2004), dès ses premiers apprentissages, "le jeune rédacteur doit **automatiser en priorité certains traitements comme l'exécution de lettres** afin de pouvoir consacrer plus de ressources à des traitements non automatisables". Lorsque l'auteure parle de l'exécution des lettres, c'est en fait à un des trois niveaux de traitements impliqués dans la

production écrite qu'elle fait référence : un premier niveau permet au rédacteur de construire un ensemble de représentations pré-verbales regroupant les idées qu'il veut communiquer (*niveau sémantique*), un second niveau traite ce message afin de le mettre en langue (*niveau linguistique*) et un dernier niveau transcrit ces représentations verbales (*niveau graphomoteur*).

Dans une expérience menée en 1988, destinée à montrer le faible coût de l'activité graphique, Paillard « désautomatise » cette action par une expérience de double tâche<sup>2</sup> en demandant aux sujets de recopier un texte uniquement en lettres majuscules, formatage graphique peu disponible et dont la programmation doit être délibérée. Les résultats prouvent que la « demande attentionnelle » requise pour cette opération sensori-motrice est clairement accrue. De la même façon, Olive et Piolat (2002) illustrent cette différence en besoins cognitifs en mesurant les temps de réaction de trois types d'activités (graphiques et non graphiques), en partant du principe que plus le temps moyen de réaction est long, plus le rédacteur sollicite des traitements coûteux sur le plan attentionnel (Piolat, 2003). Le constat est le suivant : copier un texte nécessite une charge attentionnelle inférieure à celle nécessaire pour réfléchir à un événement quelconque (sans écrire), elle-même inférieure à celle nécessitée par la tâche de composition d'un texte (figure 22). La première activité est un processus de bas niveau dans la hiérarchie des processus cognitifs, c'est-à-dire qu'elle requiert très peu d'attention. La deuxième activité correspond à un processus plus élaboré dont la demande cognitive est supérieure. Et la troisième activité fait à la fois intervenir des processus de bas et de haut niveaux. En d'autres termes, **la tâche de réalisation du tracé graphique, prise isolément, requiert un coût cognitif limité, comparé au processus d'écriture pris dans son ensemble (niveaux sémantique + linguistique + graphomoteur).**

---

<sup>2</sup> une tâche secondaire est ajoutée à une tâche principale afin de mesurer la « demande attentionnelle » requise par l'opération sensori-motrice ou cognitive principale (Paillard, 1988 citant la théorie du « canal unique » formulée par Welford, 1967).

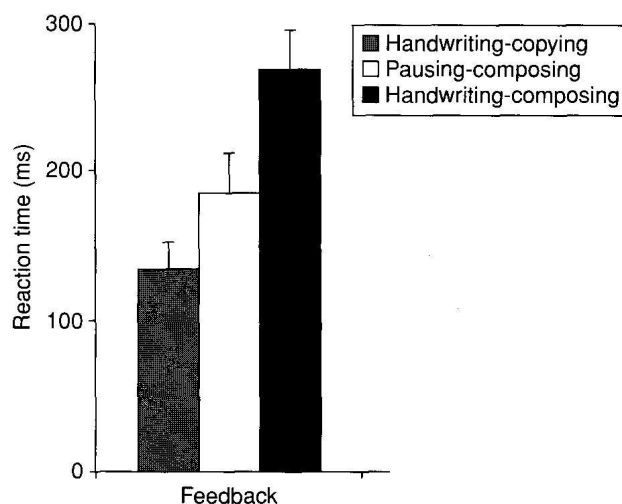


Figure 22: Temps de réaction mesurés dans trois conditions de rédaction (copie, pause, composition) (extrait de Olive & Piolat, 2002).

Alamargot *et al.* (sous presse), dans leur description des relations entre systèmes mémoriels et production écrite, rappellent comment la *mémoire à long terme* et la *mémoire de travail* s'articulent. Alors que la première stocke les connaissances mobilisées, la seconde les traite. Pour cela, quatre processus rédactionnels sont mis en oeuvre : planification / formulation / révision / exécution. Tout d'abord, les éléments permettant l'organisation et la cohérence du texte sont récupérés (Hayes & Nash, 1996, Alegria & Mousty, 1994). Puis le message linguistique est élaboré (traitements orthographiques, lexicaux, grammaticaux, et cohésion), laissant le processus de révision agir tout au long de la rédaction afin de corriger les éventuelles erreurs (Allal *et al.*, 2003). Enfin, la trace physique est réalisée (Zesiger, 1995, Graham & Weintraub, 1996). Ce dernier processus s'accompagne de deux traitements complémentaires visant d'une part à activer le programme moteur adapté (rappel dans la mémoire à long terme, paramétrage par adaptation au support par exemple, et exécution) (Van Galen & Teulings, 1983) et d'autre part à analyser les feedbacks visuels et tactilo-kinesthésiques émanant de l'écriture (sensations relatives au toucher d'une part, et à la position et au déplacement des différentes parties du corps d'autre part) (Smyth & Silvers, 1987). Les quatre processus rédactionnels ne sont pas caractérisés par le même degré d'automatisation. Alors que les trois premiers nécessitent une part importante de traitements contrôlés et conscients, **le processus d'exécution est le plus propice à l'automatisation** (Alamargot *et al.*, 2005 citant Bourdin & Fayol, 1994). Ce niveau, aussi appelé niveau graphomoteur, permet le positionnement de l'écriture à des échelles différentes : la trace sur le support, les mots sur la ligne, la lettre dans le mot etc.

De la même façon, Kellogg (1996), propose un modèle de production de textes dans lequel six processus rédactionnels sont mis en œuvre (planification, traduction linguistique, programmation graphomotrice, exécution graphomotrice, (re)lecture et édition) et **parmi lesquels le processus d'exécution serait automatisé.**

Tucha et al. en 2006, rappellent que les traitements sollicités au cours de l'action d'écriture ne sont pas intrinsèquement automatiques ou contrôlés. Ils sont l'un ou l'autre, selon les conditions. Les auteurs font la distinction entre la séquence génération de texte / mémorisation temporaire / contrôle de la production qui requiert une attention, et l'exécution du mouvement d'écriture à proprement parler, qui est automatique. Leur étude est la première à montrer l'indépendance du mouvement d'exécution par rapport à l'apport de charge attentionnelle. Pour ce faire, ils testent dans un premier temps des paramètres cinématiques reconnus comme étant sensibles (et donc représentatifs) aux altérations du mouvement d'écriture : le changement de direction et la vitesse maximum. Et dans un second temps, ils mesurent la vigilance (par privation de sommeil). Dans les deux approches, ces paramètres sont comparés aux paramètres représentatifs de l'attention (cinq tâches) et les résultats montrent une **indépendance de l'exécution du mouvement d'écriture et des fonctions attentionnelles.** Ces résultats sont confirmés par Miyahara et al. en 2008, qui montrent que les deux paramètres ne covarient pas. Selon eux, la posture et le bras ne sont pas contrôlés indépendamment l'un de l'autre, mais collectivement, afin de réduire le nombre de degrés de liberté.

Hamstra-Bletz & Blot (1990) constatent que l'automatisation de l'acte graphomoteur se fait de manière progressive et se traduit par l'augmentation de la vitesse d'écriture entre sept et onze ans. Partant du principe que l'accélération de l'écriture s'explique d'abord par la maturation du système nerveux, le contrôle parfait de la motricité fine qu'implique l'écriture manuscrite ne peut généralement pas être atteint avant l'âge de six/sept ans (Auzias & Ajuriaguerra, 1986). Ce phénomène de maturation, lui-même associé à la répétition de l'exercice de l'écriture durant l'apprentissage scolaire permet l'élaboration et le stockage en mémoire à long terme des programmes moteurs (Lambert & Espéret, 2002).

Tous ces travaux vont donc dans le sens d'une automatisation de l'acte graphomoteur, niveau qui nous intéresse plus particulièrement puisque c'est celui qui est relatif à la

formation du tracé. Trois catégories de modèles existent pour expliquer la réalisation de cet acte.

#### 6.2.2.2. Modèles neurocognitifs

Pour le mouvement d'écriture, "le cerveau gouverne la main, décide de sa position, mais il le fait en tenant le plus grand compte du résultat, de l'image qu'il tient à produire, laquelle ne se borne pas au sens du texte" (Auriol, 2001). Ainsi, l'écriture repose sur l'interrelation des systèmes linguistique et moteur, ce dernier permettant d'en exécuter les gestes précis, et conférant à l'écriture la qualité de mouvement volontaire.

L'objectif de l'approche neurocognitive est de tenter de décrire et d'expliquer l'ensemble des processus qui se déroulent entre le moment où naît l'intention d'écrire et le moment où l'action a lieu. Selon Goussard (dernière consultation le 10/12/09), dans tout mouvement volontaire, **l'intention est suivie d'une succession de mouvements automatiques et involontaires**. Et ce qui sépare les deux types de mouvements n'est donc pas une différence de nature, mais davantage une différence de degré de mobilisation des ressources attentionnelles (Collet, 2002). Ainsi, dans le cas précis de l'écriture, le scripteur « veut » écrire un mot, mais il ne « veut » ni prendre un stylo, ni effectuer les mouvements de poignet/main/doigts à l'origine du tracé.

Les approches neurocognitives de l'écriture reposent sur le principe d'*invariance de l'écriture*. Ce concept regroupe trois notions : une invariance spatiale, une invariance temporelle (isochronie) et une équivalence motrice. La première, que nous avons déjà abordée, énonce l'existence d'une configuration générale du geste, qui serait mémorisée et dont on aurait à préciser les paramètres au moment de l'exécution (figure 23). La seconde fait référence à une stabilité de la durée d'écriture quelle que soit la taille du tracé, par ajustement de la vitesse (Viviani & Terzuolo, 1980). En fait, les augmentations de taille s'accompagnent d'augmentations de durée moins importantes en proportion (Wright, 1993). Selon la troisième, et c'est celle qui nous intéresse dans le cadre de notre travail, la forme du geste [et donc du tracé] est préservée indépendamment des effecteurs mis en jeu. Alors que l'isochronie a largement été étudiée et remise en cause, peu de travaux ont été consacrés à ce que l'on désigne par *l'équivalence motrice*.



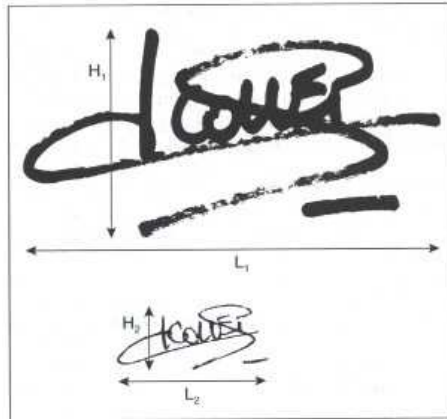


Figure 23: Exemple d'invariant spatial. Le rapport hauteur sur longueur d'une signature reste globalement constant, quelle que soit la programmation exigée, grande ou petite amplitude. Ici,  $H_1/L_1$  équivaut à  $H_2/L_2$ . Selon l'auteur, ce principe est généralisable au contexte, que l'on signe sur un tableau (plan vertical) ou sur une feuille (plan horizontal) (extrait de Collet, 2002)

Le principe de l'équivalence motrice peut être introduit comme suit (Viviani, 1998) :

"Tous les mouvements d'écriture partagent des propriétés structurelles communes, qui trahissent le fait que tous sont produits par le système moteur humain. La plupart de ces propriétés se manifeste sous la forme de principes d'invariance, stipulant qu'un certain aspect du mouvement reste constant quand d'autres changent". De fait, lorsqu'on écrit au tableau, les lettres sont bien plus grandes que d'habitude : le tracé mobilise le bras et l'avant-bras, les muscles actifs diffèrent totalement de ceux utilisés en temps normal, les propriétés biomécaniques sont tout autres, et les aires corticales qui contrôlent le geste ne sont pas non plus les mêmes. Et pourtant, la forme générale du geste est respectée, au point d'être reconnaissable, sans équivoque, comme notre écriture. Comme l'a montré le physiologiste russe Nicolai Bernstein (1967) – un des précurseurs de la théorie moderne du contrôle moteur – cette invariance étonnante de la forme est en effet maintenue même lorsqu'on écrit avec des segments corporels inhabituels, tels que le coude ou le pied (figure 24).

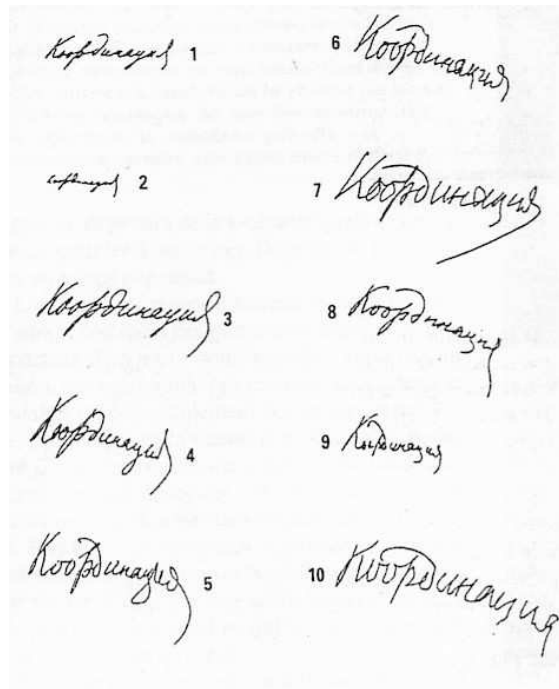


Figure 24 : La forme générale d'un mot reste inchangée, au travers de différentes manières d'écrire. Ici, le mot « coordination » (en russe) a été écrit par Nicolai Bernstein en tenant le stylo par les doigts de la main droite (1 : taille normale ; 2 : petite taille), en bloquant les doigts (3), en attachant 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) (extrait de Bernstein, 1967).

Ainsi, la forme du geste est préservée indépendamment des groupes musculaires impliqués. D'où vient un tel degré de spécificité ? Il ne résulte pas d'un apprentissage sélectif portant sur les articulations mises en jeu.

Connu sous le nom d'équivalence motrice (Lashley, 1930), ce phénomène a des implications importantes vis-à-vis de la structure du système de contrôle moteur, en ce sens où il nous amène à penser qu'il existe une instance autonome de représentation de la tâche graphomotrice de type programme moteur. En effet, il nous prouve qu'avant même d'être formulée comme une suite de commandes spécifiques aux muscles, l'intention d'écrire donne lieu à une **représentation abstraite de la forme désirée**, dans ses rapports topologiques et métriques.

L'objectif est à présent de décrire l'approche adoptée par la littérature neuroscientifique pour traiter de ce sujet.

### 6.2.2.2.1. Démonstration de l'hypothèse d'équivalence motrice

En 1898, Preyer affirme que d'un point de vue neurophysiologique, l'écriture dépend avant tout du cerveau. Si elle dépend aussi de l'organe utilisé pour la produire, c'est seulement en cas de handicap. Il fait l'expérience suivante : il se fixe un crayon à la tête, à la bouche, au coude, au genou, aux orteils, et observe le tracé obtenu. Après quelques exercices, l'écriture reproduit chaque fois la forme fondamentale de son écriture habituelle.

Deux études sont par la suite à l'origine de la notion d'indépendance de l'effecteur. Merton, en 1972, compare une écriture effectuée à l'aide des doigts et du poignet à une écriture effectuée à l'aide du coude et de l'épaule (figure 25). De la même façon, Raibert (1977) compare des échantillons d'écritures réalisés avec la main dominante, le bras dominant (poignet immobilisé), la main non dominante, la tête (stylo coincé entre les dents) et la jambe (stylo fixé au pied). Dans l'ensemble de ces expériences, de fortes similitudes au niveau de la forme sont observées.

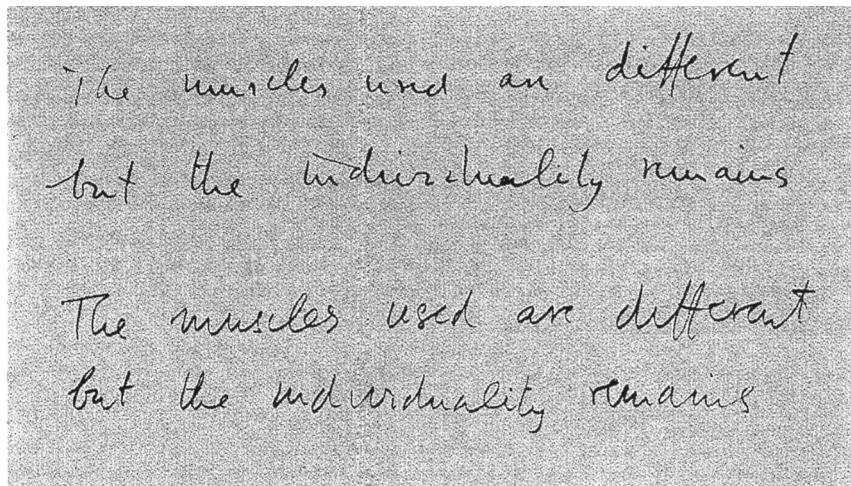


Figure 25 : Deux versions d'une même phrase. Elle est écrite sur un mur avec un feutre (en haut) et sur une feuille de papier avec un stylo à plume (en bas). La taille est dix fois plus importante sur le mur. Malgré l'utilisation d'articulations et de muscles différents, l'individualité est conservée (extrait de Merton, 1972).

Van Galen, en 1980 définit la notion de *patron moteur graphique* : les paramètres définis en amont de l'action d'écriture sont le choix du *graphème* (lettre), et celui de l'*allographe* (type de lettre). Le patron moteur graphique décline la séquence de traits nécessaire pour constituer chaque allographe. Il spécifie la direction, la taille relative, la position et l'ordre des traits, mais en aucun cas il ne définit la taille absolue de chaque lettre, la vitesse d'exécution ou la suite de commandes neuromusculaires propre à chaque groupe de

muscles. En effet, écrire sur une feuille de papier nécessite des muscles différents de ceux sollicités pour écrire sur un tableau, ou pour ‘sprinter’ sur un mur. De la même façon, pour Ellis (1988), la forme de la lettre est prédéfinie en amont de la commande neuromusculaire activée pour la réaliser.

Les travaux de ces auteurs vont dans le sens d’une détermination de la forme de la lettre antérieure, dans la chronologie des événements, à l’activation musculaire nécessaire à la réalisation de cette dernière. Cela suppose donc une invariance de la forme quel que soit l’effecteur impliqué.

Dans son expérience d’écriture avec trois effecteurs différents (main dominante sur papier, bras dominant sur tableau et main non dominante sur papier), Wright (1990) souligne une certaine constance de la forme générale de l’écriture et parle d’action « *effecteur indépendante* ». Il apporte cependant une nuance au travail de Merton (1972), en notant une plus grande fidélité de la trajectoire lorsqu’elle est effectuée avec le bras dominant par rapport à celle effectuée avec la main non dominante (les deux étant comparés à la trajectoire effectuée avec la main dominante) (figure 26).

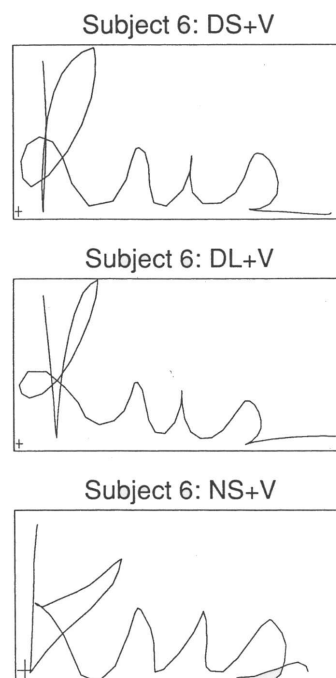


Figure 26 : Performances moyennes d’un sujet écrivant avec trois effecteurs différents (DS : main dominante sur papier ; DL : bras dominant sur tableau ; NS : main non dominante sur papier ; +V : expériences réalisées avec feedback visuel) (extrait de Wright, 1990).

L'auteur envisage un programme moteur généralisé effecteur-indépendant, au sein duquel il existerait plusieurs niveaux de représentations spatiales des formes, et une hiérarchie dans les spécificités motrices. Le niveau de représentation commun aux écritures « main dominante / main non dominante » serait plus abstrait et supérieur à celui partagé par les écritures « main dominante / bras dominant ». Cela signifie que davantage de différences peuvent survenir lorsque l'on passe d'une écriture classique (avec la main dominante) à une écriture avec la main non dominante, que lorsque l'on passe d'une écriture classique à une écriture sur un tableau (avec le bras dominant). Autrement dit, en partant du principe que plus le niveau commun de spécification est élevé, plus deux actions motrices ont de chances de présenter des différences, on comprend pourquoi selon l'auteur, les écritures main dominante / main non dominante sont plus éloignées que les écritures main dominante / bras dominant.

En 1991, Wellingham-Jones décrit le cas d'une patiente devenue tétraplégique à vingt-six ans et qui a appris à écrire avec la bouche. La ressemblance entre son écriture « post-paralysie » et son écriture « pré-paralysie » est nette. Les particularités de son écriture originale (espace inter-mots, proportion et forme des lettres, inclinaison) sont toujours présentes et la taille devient de moins en moins importante au fur et à mesure des entraînements (figure 27).

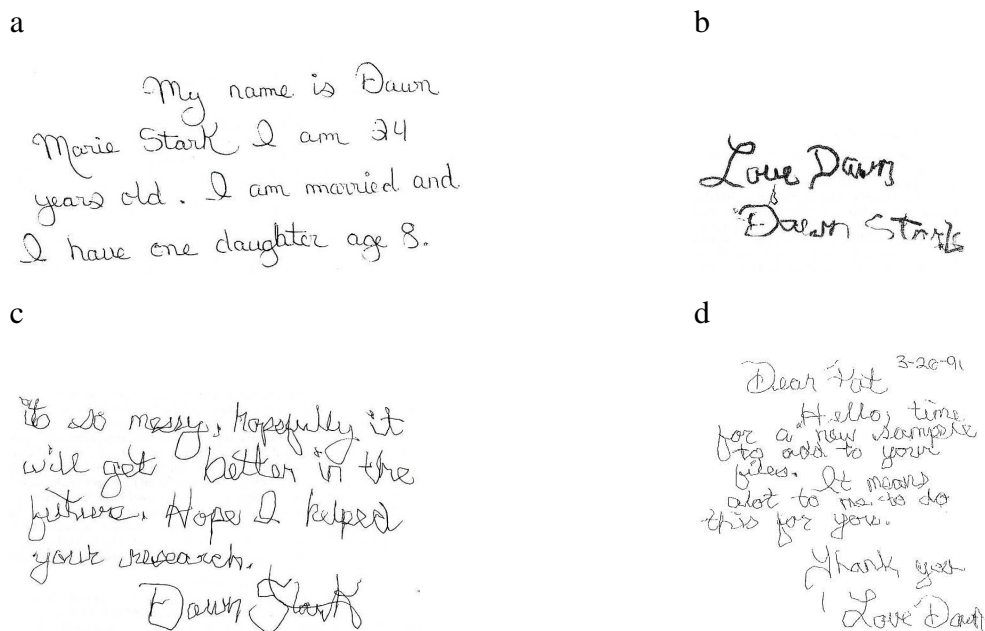


Figure 27 : Ecriture d'une femme tétraplégique (a : avant la paralysie, b : 7 mois après l'opération, utilisation de la bouche pour tenir le stylo, c : 10 mois après l'opération, d : 1 an et demi après l'opération (extrait de Wellingham-Jones, 1991).

C'est aussi en 1991 que Van Galen précise la notion de *programme moteur graphique* en déclinant les trois étapes suivantes. Dans un premier temps, le programme moteur, de nature spatiale, spécifie, comme nous l'avons vu antérieurement, la forme de l'allographe, à savoir le nombre, la forme, la direction, la position, l'ordre et la taille relative des traits. On parle alors de patron moteur graphique (cf. supra). Pour cela, il utilise le *stock allographique* (Allographic Store) qui définit le style de l'écriture (écriture cursive ou scripte, lettres minuscules ou majuscules). Il s'agit d'un stockage à long terme. Parallèlement à ce stock allographique, il existe un *tampon graphémique* (Graphemic Buffer) qui maintient la représentation graphémique du mot (succession des lettres le composant [notion plus largement détaillée dans le paragraphe 6.2.4.2.2]) pendant le temps nécessaire à l'exécution de la réponse motrice. Le mot «buffer» vient du vocabulaire des sciences adopté par l'informatique et correspond à un régulateur qui stocke les données dans une mémoire à court terme. Dans un second temps, le programme moteur utilise ces deux sources de stockage pour prévoir la position des points de départ, la taille absolue, la vitesse et la force nécessaire au mouvement. Ce n'est que dans un troisième temps, au cours de la phase d'initiation motrice, que les unités motrices et les muscles nécessaires à l'action désirée sont recrutés (figure 28).

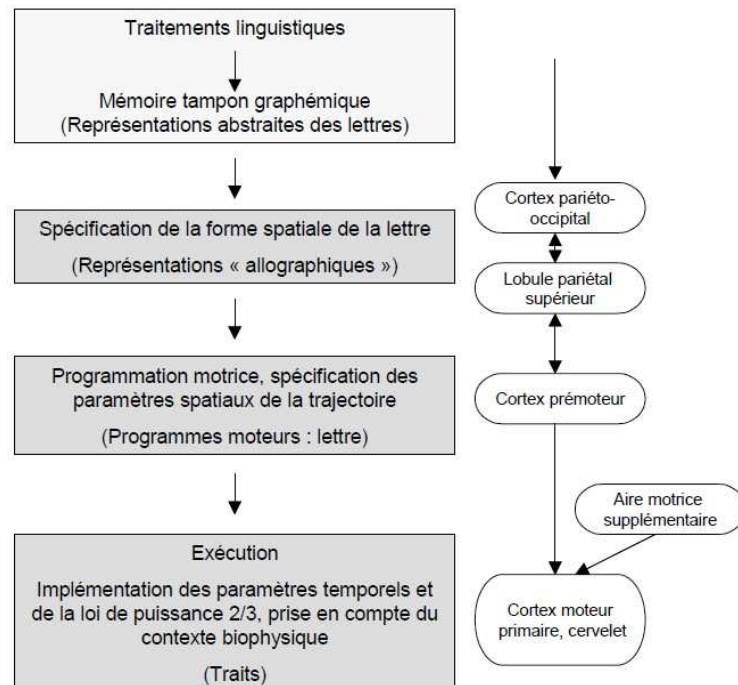


Figure 28 : Niveaux de traitement postulés dans la production de mouvements d'écriture, en aval des traitements linguistiques (extrait de Longcamp, 2003). A gauche, les boîtes grisées figurent les différents niveaux avec, entre parenthèses, la nature de l'unité prise en compte. A droite sont représentées les structures cérébrales impliquées pour chacun des niveaux. D'après Anderson et al. (1993), Ellis (1988), Roeltgen (1985) et Van Galen (1991).

Dans ce modèle, la structure est hiérarchisée de manière modulaire, c'est-à-dire que chaque sous-système traite l'information indépendamment des autres et donne ses résultats à la partie immédiatement inférieure qui la traite à son tour (Benoît & Soppelsa, 1996) (figure 29).

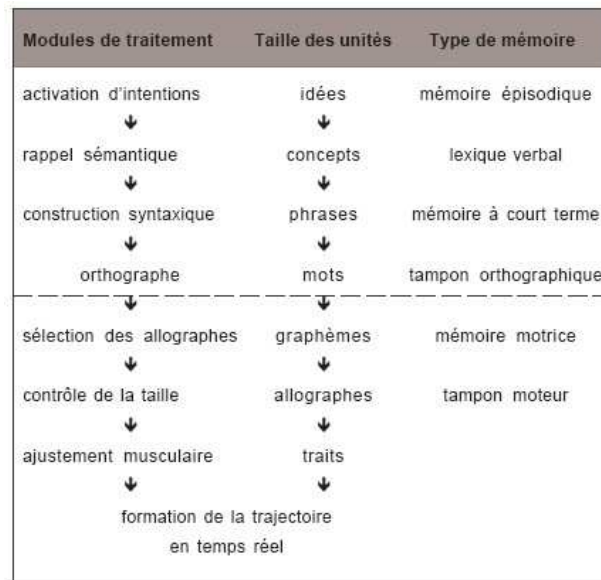


Figure 29 : Modèle modulaire de l'écriture selon Van Galen (1991) (extrait de Benoît & Soppelsa, 1996).

Cette séquence d'actions motrices est réalisée avec un contrôle conscient minimum. En utilisant cette mémoire motrice dynamique développée, le système cognitif peut réaliser des mouvements précis avec un feedback sensoriel minimum (Longstaff & Heath, 1997).

Ainsi, l'acte graphomoteur, qui n'est autre que la transcription du langage oral en langage écrit, fait intervenir des processus de nature différente, aussi bien phonologiques, que sémantiques ou moteurs. Cette théorie confirme ce que Van Galen avait déjà laissé sous-entendre en 1980, à savoir que **les paramètres codant pour le mouvement sont définis indépendamment de l'extrémité motrice qui exécute le mouvement.**

Castiello et Stelmach (1993), même s'ils envisagent une représentation abstraite unique de l'écriture, émettent l'hypothèse de deux programmes moteurs distincts pour les deux mains. En effet, ils relèvent des différences de longueur à l'échelle du trait. En supposant que le trait soit l'unité de base du programme moteur contrôlant l'écriture, il en découle que deux programmes moteurs différents sont à l'origine des écritures avec chaque main. Parallèlement à cela, ils travaillent avec un sujet ayant appris à écrire avec un bras artificiel (bras non

dominant). Les résultats montrent qu'avec une pratique suffisante, le sujet est capable de produire des patrons d'écriture invariants (figure 30). Selon les auteurs, **seule la pratique permet d'atteindre un état d'indépendance vis-à-vis de l'effecteur.**

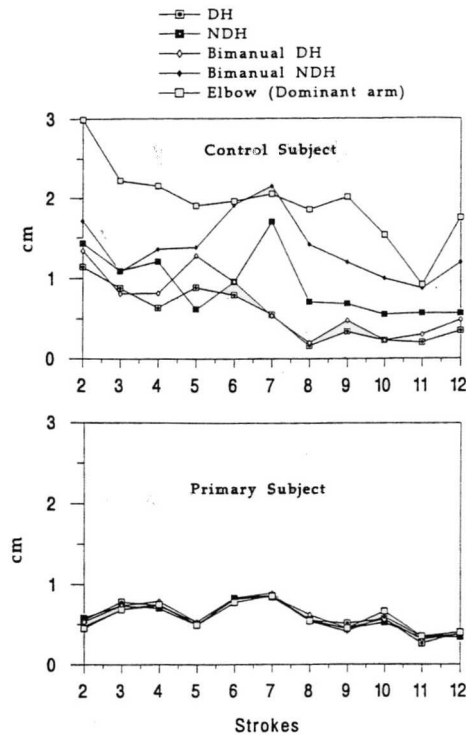


Figure 30 : Longueur des 12 traits initiaux composant un même mot, dans différentes conditions expérimentales (DH : main dominante ; NDH : main non dominante ; elbow : coude (bras dominant)). En haut, le sujet contrôlé (non entraîné) ; en bas, le sujet ayant un bras artificiel (extrait de Castiello & Stelmach, 1993).

De la même façon, Meulenbroek *et al.* (1996), font des tests sur des sujets en position assise, écrivant sur un support horizontal ou incliné (figures 31A&B). Des articulations différentes sont donc mises en jeu (épaule, coude et poignet pour la position A ; hanche, épaule et coude pour la position B). Ils observent que, malgré des profils de vitesses angulaires enregistrés au niveau des articulations totalement différents (figures 31C&D), les profils de vitesses horizontale, verticale et tangentielle sont similaires (figures 31E&F). Ces résultats prouvent que **des traces graphiques similaires peuvent être produites par des effecteurs différents.**



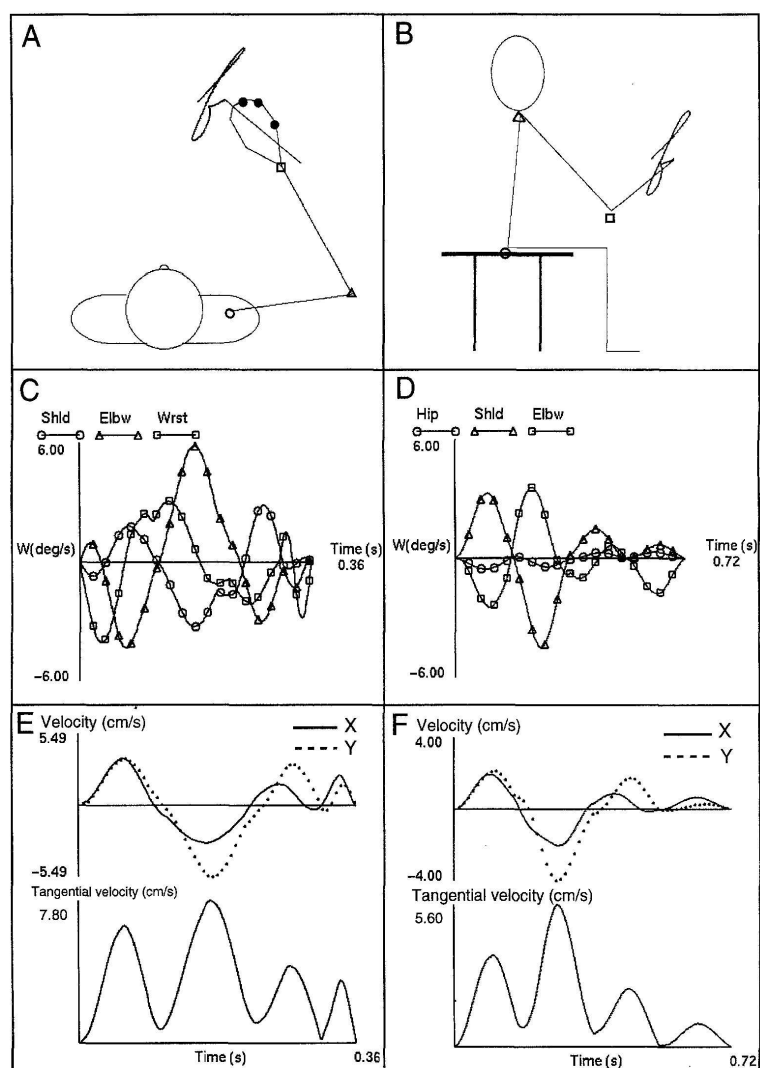


Figure 31 : Production d'une même lettre avec différents effecteurs. **A** Support horizontal **B** Support incliné **C** Vitesses angulaires de l'épaule (shoulder), du coude (elbow) et du poignet (wrist) sur support horizontal **D** Vitesses angulaires de la hanche (hip), de l'épaule et du coude sur support incliné **E** Profils de vitesse horizontale (trait plein) et verticale (pointillés) (en haut) et profil de vitesse tangentielle (en bas) de la pointe du stylo sur support horizontal **F** Profils de vitesse correspondants sur support incliné (extrait de Meulenbroek *et al.*, 1996).

Ces résultats sont confirmés par la manière dont se manifeste l'agraphie motrice pure (incapacité totale à écrire à la suite d'une lésion cérébrale, même en copie) chez la plupart des patients. Les troubles ne sont généralement pas spécifiques à une main donnée, et lorsque c'est le cas (agraphie unilatérale -ie- ne touchant qu'une main), cela s'explique par la présence de lésions calleuses. Le transfert des engrammes moteurs (traces laissées dans le cerveau par un événement passé) d'un hémisphère cérébral vers l'autre est alors rendu impossible (Longcamp, 2003 citant Roeltgen, 1985). Là encore, les résultats indiquent une indépendance des représentations motrices mises en jeu vis-à-vis de l'effecteur.

Parallèlement à cela, nous pouvons citer des travaux menés dans le cadre d'un autre type d'action motrice : le pointage d'un objet. Ces derniers expliquent que la configuration du corps humain au cours d'un mouvement (ou posture) est décrite par un certain nombre de variables appelées *degrés de liberté*. Ce nombre est la plupart du temps supérieur à celui décrivant la position et l'orientation de la cible dans l'espace (ex : un objet à attraper). Cet excès caractérise le degré de redondance présent au sein de notre corps, lequel conduit à une certaine flexibilité dans nos activités motrices quotidiennes (Bernstein, 1967). L'analyse expérimentale de cette flexibilité est basée sur l'étude des mouvements impliquant différents segments corporels, qui peuvent être combinés de différentes façons pour accomplir le même but moteur. Par exemple, le bras peut produire un mouvement de pointage en direction d'une cible avec ou sans l'intervention du tronc. Il a été montré que la forme et le profil de vitesse de la trajectoire de la main durant le pointage restaient invariants, que le tronc intervienne ou pas (Ma & Feldman, 1995 ; Pigeon & Feldman, 1998). L'influence du tronc sur la position de la main est neutralisée par des rotations compensatoires des articulations du coude et de l'épaule (Pigeon *et al*, 2000). Dans le cadre de notre travail, cette expérience a une valeur informative, puisqu'elle illustre le fait que la main puisse être le siège d'un mouvement invariant.

Alors que de nombreux autres auteurs parlent également d'équivalence motrice pour décrire le mouvement d'écriture (Rosenbaum, 1991 ; Rothwell, 1995 ; Rijntjes, 1999 ; Wing, 2000), certaines études montrent que l'équivalence motrice n'est pas retrouvée lors de variations de la vitesse de mouvement. Des **modifications dans la forme de la trajectoire sous l'effet d'une contrainte de vitesse** sont mises en évidence à plusieurs reprises (Wann & Nimmo-Smith, 1990 ; Wright, 1993 ; Rogers & Found, 1996). Ces auteurs observent à la fois une modification de la courbure de la trajectoire qui devient significativement de moins en moins courbe, et une modification du rapport relatif entre les composantes verticales et horizontales. Wright (1993) souligne cependant le fait que, d'un point de vue statistique, ces **modifications sont négligeables** (« statistiquement non décelables »). Pour cela, il utilise l'Analyse Procrustéenne Généralisée, méthode d'analyse mathématique qui permet de comparer des profils de données obtenus par différents groupes, et d'évaluer la performance de l'un d'entre eux par rapport aux autres. Il ressort de cette étude que les variations de vitesse ne modifient guère la trajectoire du mouvement.

Pour finir, on peut s'intéresser aux zones cérébrales activées au moment de l'action d'écriture. Grâce à la technique de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), il est possible d'observer avec précision ce qui se passe dans le cerveau de sujets lorsqu'ils écrivent. Lorsqu'une zone du cerveau est activée, la circulation sanguine y est augmentée, et on peut alors mettre en évidence les zones sollicitées par l'action d'écriture. Ainsi, les travaux de Rijntjes (1999) montrent que l'exécution d'un mouvement normalement effectué par la main, en l'occurrence l'écriture, implique les « aires de la main » lorsqu'il est réalisé par un autre membre (orteil). De la même façon, Wing, en 2000, précise les résultats de Rijntjes et attire notre attention sur le rôle du cortex pariétal postérieur dans le phénomène d'équivalence motrice. Selon l'auteur, les paramètres codant pour un mouvement acquis (comme l'écriture) sont stockés dans des aires cérébrales correspondant au membre effectuant le mouvement habituellement. Cela signifie que, **quel que soit l'effecteur activé, ce sont toujours les mêmes aires cérébrales qui sont sollicitées pour le mouvement d'écriture**, ce qui va dans le sens de l'hypothèse d'équivalence motrice.

Dans la plupart de ces études, l'idée d'une certaine conservation du mode de formation des lettres est admise et reprise en tant que fait établi. Lorsqu'elle est testée, comme dans l'article de Wright (1990), l'unique technique d'analyse utilisée est l'outil informatique, par le biais de la comparaison de trajectoires. L'absence de mesure quantitative objective dans la littérature est notamment soulignée par Wann et Nimmo-Smith (1990) et Zesiger (1995). Quant à Wright (1993), il déplore le fait que très peu d'outils d'étude soient destinés à l'étude de l'aspect formel de l'écriture.

L'ensemble de ces travaux tend à montrer la constance de l'écriture, quel que soit l'effecteur à l'origine de sa réalisation.

L'angle de vue que nous choisirons d'adopter dans notre protocole expérimental sera davantage axé sur une analyse des changements que peuvent engendrer des conditions non conventionnelles impliquant un même effecteur (la main), mais sollicitant des zones corporelles (et donc des muscles, articulations...) différentes. L'étude sera envisagée d'un point de vue spatial, c'est-à-dire que nous nous attacherons aux coordonnées x et y de la trace.

#### 6.2.2.2. Représentation de l'écriture au niveau cérébral

L'ensemble des travaux à ce sujet convergent vers une hypothèse commune : l'écriture serait représentée de manière spatiale au sein de notre cerveau.

C'est Ellis, en 1979, qui définit le premier un modèle cognitif de l'aspect graphomoteur de l'écriture. Dans sa description, le premier niveau dans le processus d'écriture est le *niveau graphémique*. Lorsque nous écrivons un mot, nous devons connaître l'identité et l'ordre des lettres le composant. Le graphème est la représentation abstraite d'une lettre. L'alphabet français comporte vingt-six graphèmes. Le niveau suivant est la transcription du graphème abstrait en des mouvements physiques d'écriture. Il est appelé *niveau allographique*. Le choix de la majuscule ou de la minuscule, ou du type script ou cursif sont définis à ce niveau. Plusieurs allographes correspondent donc à un même graphème. Activer une unité allographique consiste en fait à activer la représentation d'une forme spécifique de lettre, pouvant être comparée à un code spatial. Le dernier niveau dans le processus d'écriture défini par Ellis est le *niveau graphique*, qui représente la réalisation concrète de la forme choisie sur le support. La représentation graphique (ou graphe) peut présenter des variations mineures selon les circonstances dans lesquelles elle a été apposée.

En 1989, Patterson & Wing se posent la question suivante : existe-t-il des troubles de l'écriture dans lesquels les minuscules et les majuscules sont différemment affectées ? Ils décrivent un cas de lésion pariétale pouvant entraîner une anomalie uniquement au niveau de la transcription des lettres minuscules. Le sujet présente des temps de préparation et d'exécution des lettres minuscules plus importants que ceux des lettres majuscules (figures 32a&b). Et lorsque l'on demande au sujet de recopier une lettre (majuscule ou minuscule), ou qu'on la lui présente rapidement (temps suffisamment court pour ne pas lui donner la possibilité de recopier), il est capable de la produire correctement. Cela signifie que ses patrons moteurs sont relativement intacts. Les auteurs proposent une altération des codes physiques propres aux minuscules, eux-mêmes indépendants des codes physiques propres aux majuscules. Ce que les auteurs appellent « code physique » d'une lettre, c'est en fait sa représentation physique concrète sur une feuille de papier, c'est-à-dire sa représentation spatiale.

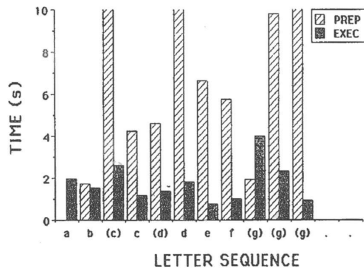


Figure 32a : Temps de préparation et d'exécution des lettres minuscules. En abscisses, les lettres entre parenthèses sont celles qui n'ont pas été correctement achevées (Extrait de Patterson & Wing, 1989).

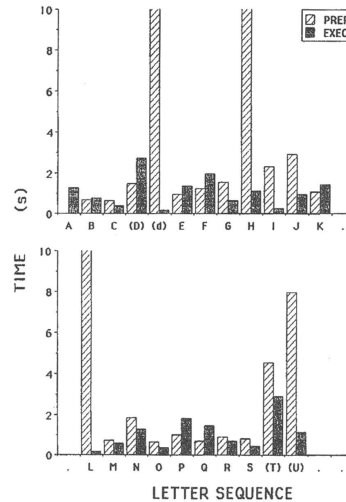


Figure 32b : Temps de préparation et d'exécution des lettres majuscules (Extrait de Patterson & Wing, 1989)

A travers cette étude, Patterson & Wing apportent à la fois la preuve de l'existence de répertoires spatiaux codant pour les lettres, mais aussi la preuve de leur indépendance (un pour les majuscules et un pour les minuscules).

Teulings & Schomaker (1993) mettent en place des expériences où ils font écrire un mot à différentes vitesses. Ils étudient l'invariance des composantes horizontales et verticales (taille des traits supérieurs et inférieurs), de la durée et de l'accélération. Leurs résultats supportent l'hypothèse d'une hiérarchie verticale où la caractéristique spatiale, et en particulier la taille du trait vertical inférieur, est un paramètre plus invariant et de degré plus élevé que les caractéristiques dynamiques (durée, accélération). Ceci est cohérent avec le fait que l'écriture soit une tâche graphique où la structure spatiale est le but (à des fins de lisibilité). Le fait que le temps ne soit pas une information de premier ordre est donc logique.

Pour Van Galen & Morasso (1998), il ne fait aucun doute que les patrons d'écriture sont représentés par leurs caractéristiques spatiales à un des niveaux les plus centraux du système psychomoteur. La série d'expériences menées par Van Galen & Weber en 1998 en est une illustration. Elle consiste à réduire la surface de papier disponible pendant que le sujet écrit. Après modification du paramètre « longueur de ligne restante », le sujet s'adapte immédiatement en redimensionnant son écriture (adaptation graduelle au fil des lettres), et en particulier en adaptant la taille de ses traits supérieurs. En revanche, ils observent que de petites adaptations au niveau spatial peuvent entraîner des variations importantes au niveau de

la durée de réalisation du trait. Le processus de paramétrage de la taille est alors qualifié de hautement adaptatif par les auteurs. Et le fait que les variations spatiales se fassent en continu, à l'inverse des variations temporelles, les conduit à privilégier l'hypothèse d'une **représentation spatiale des programmes moteurs**. Ces résultats vont dans le sens du modèle qu'avaient déjà décrit Ellis en 1979, puis Schomaker & Van Galen en 1996 (figure 33) :

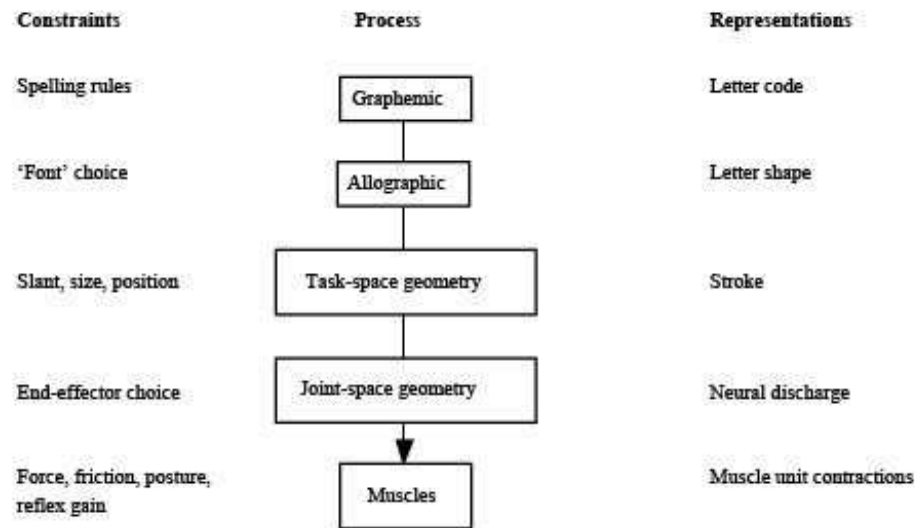


Figure 33 : Modèle de production de l'écriture selon Schomaker & Van Galen (1996) (extrait de Found & Rogers, 1999)

Si l'écriture est représentée sous sa forme spatiale au sein de notre cerveau, cela constitue un argument supplémentaire en faveur d'une conservation de la forme selon le contexte.

### 6.2.2.2.3. Lien entre la représentation des lettres et les mouvements permettant de les former

Les lettres seraient représentées au sein de notre cerveau, non seulement par leur composante visuelle, mais aussi sous leur forme sensorimotrice, c'est-à-dire qu'elles seraient étroitement associées au mouvement qui permet de les former, et qu'un programme moteur spécifique serait automatiquement activé à la simple vue de chaque caractère (Velay *et al*, 2005). L'étude expérimentale de la reconnaissance de lettres par imagerie cérébrale (IRMf) permet de montrer que la simple présentation visuelle de lettres isolées provoque l'activation d'une zone particulière située dans le cortex prémoteur (aire 6), alors qu'aucune réponse motrice n'est requise. Cette zone ne s'active pas lorsque des « pseudolettres » (que les sujets

ne savent donc pas écrire) sont présentées. En revanche, la même zone s'active très fortement lorsque les sujets doivent écrire les lettres (Longcamp *et al.*, 2003 et 2005). L'expérience menée par Longcamp *et al.* en 2005, sur des élèves de maternelle en cours d'apprentissage de la lecture/écriture, puis par Longcamp *et al.* en 2006 sur des adultes, montre que l'écriture manuscrite semble contribuer à une meilleure mémorisation des caractères (par rapport à un apprentissage au clavier). L'ensemble de ces résultats souligne l'importance de la motricité pour la mémorisation des formes graphiques (Hulme, 1979 ; Naka & Naoi, 1995).

Une autre illustration de ce phénomène est mise en évidence par Roll & Gilhodes en 2001. Les auteurs montrent qu'il est possible d'induire des illusions d'écriture de lettres, chiffres ou mots courts, grâce à quatre vibrateurs appliqués sur les muscles du coude et de l'épaule. Les sujets sont capables de reconnaître et de catégoriser le symbole perçu puis de le dessiner avec fidélité. Les messages proprioceptifs issus de la main qui écrit ou dessine semblent donc être non seulement des « descripteurs sensoriels et perceptifs » des trajectoires graphiques réalisées, mais aussi porteurs du sens de ce que la main écrit.

En plus d'être représentée par sa forme, l'écriture serait donc représentée au sein de notre cerveau par la séquence des mouvements qui permettent de la générer. Ce phénomène de mémorisation du geste à l'origine de la trace conforte l'idée d'une certaine constance de la forme quelles que soient les circonstances d'écriture.

#### **6.2.2.2.4. Composantes topocinétiques et morphocinétiques**

Paillard (1988), dans son étude de l'acte graphique, fait la distinction entre les modalités *morphocinétiques* et *topocinétiques* de l'écriture. Selon lui, elles relèvent de contrôles nerveux différenciés. La composante morphocinétique concerne la "trajectoire cursive qui donne sa forme à la lettre", et la composante topocinétique concerne les "déplacements orientés de la main dans l'espace bidimensionnel de la feuille". Alors que la composante morphocinétique (morpho = forme) correspond à la représentation centrale de chaque forme, la composante topocinétique (topos = lieu) correspond à l'endroit où il faut placer les formes (traits / lettres / mots / accents...). Elle permet par exemple aux barres de 't' d'être correctement positionnées, ou aux lettres de ne pas se chevaucher et de se succéder sur une ligne horizontale. Elle correspond à l'organisation spatiale du texte.

Plusieurs expériences sont consacrées à l'étude de ces composantes. Une première expérience, réalisée par Paillard (1988), consiste à évaluer le rôle de l'information visuelle sur ces deux dimensions de l'écriture. Des sujets momentanément privés de vision ont été invités à écrire un texte de mémoire. Leur performance a été comparée au même texte rédigé en 'condition normale de vision'. Les résultats montrent que l'ordonnancement de la trace écrite dans la page a globalement été modifié (parallélisme des lignes, distances aux bordures, erreur de positionnement des accents et signes de ponctuation...), alors que la forme intrinsèque des lettres n'a pas été 'perturbée' (figure 34). La lisibilité générale demeure très comparable à la lisibilité en condition normale.

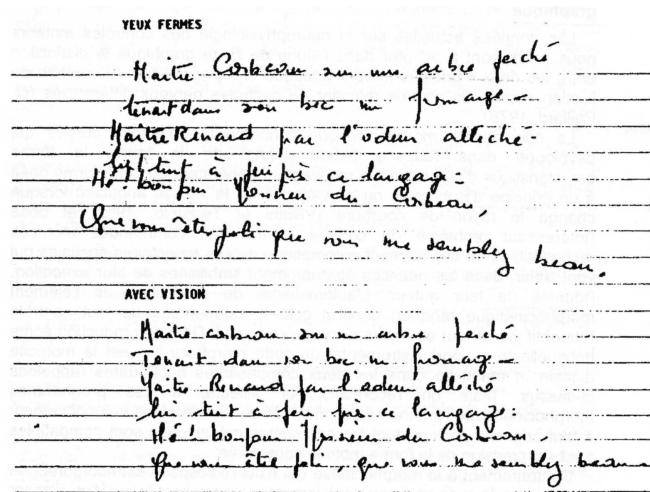


Figure 34 : Ecriture spontanée d'un texte connu les yeux fermés (en haut) et en conditions normales de vision (en bas) (extrait de Paillard, 1988).

Teasdale *et al.* (1993) ont réalisé la même expérience sur un patient déafferenté, c'est-à-dire ne possédant plus le sens du toucher, ne ressentant ni les vibrations, ni la pression, ni aucune sensation kinesthésique (perception du mouvement). Lorsque l'on observe le tracé obtenu sans vision, on s'aperçoit que le 'l' de 'il' est superposé au 'i', la barre du 't' dans 'fait' est située sur le 'f', le point du 'i' et la barre du 't' dans 'tiède' sont anormalement positionnés au-dessus du mot. Les auteurs décrivent une forte dégradation de la composante topocinétique, ce qui n'est pas le cas de la composante morphocinétique globalement bien conservée. En effet, chez ce patient, l'absence de vision s'ajoute à une absence de feedback de tout autre type, d'où un rendu moins 'harmonieux' que celui observé dans l'expérience de Paillard. Ceci amène les auteurs à parler d'une « parfaite conservation du style personnel d'écriture » (figure 35).



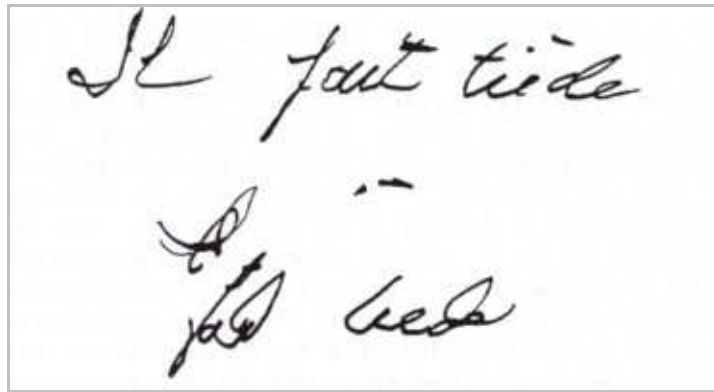


Figure 35 : Ecriture d'un patient déafferenté avec (en haut) et sans vision (en bas) (extrait de Teasdale, 1991).

Ces résultats permettent donc de penser que la composante topocinétique est dépendante d'un contrôle rétroactif visuel, ce qui n'est pas le cas de la composante morphocinétique, qui est dépendante d'un programme moteur central (boucle ouverte).

L'objectif de la deuxième expérience était de tester le degré d'automatisme de chacune de ces composantes de l'acte graphique. C'est dans cette perspective que se place le travail de Smyth & Silvers (1987, cités par Paillard, 1988). Ces auteurs utilisent une tâche annexe consistant soit en un comptage mental, soit en la répétition régulière d'une monosyllabe, qu'ils associent à une tâche principale d'écriture (copie de phrases). La composante topocinétique n'est pas affectée par l'addition d'une tâche secondaire, ce qui signifie qu'elle est caractérisée par un *haut degré d'automatisme* et qu'elle peut être réalisée sans mobiliser l'attention du sujet. Quant à la composante morphocinétique, les auteurs décrivent une dégradation systématique de cette composante suite à l'ajout d'une tâche secondaire. Cela leur permet de conclure sans ambiguïté à l'importance de la charge attentionnelle requise par l'opération de production de la séquence morphocinétique, et à son faible degré d'automatisme. Mais si l'on regarde les résultats de manière plus précise, on s'aperçoit que c'est en fait la séquence des graphèmes qui est affectée – ie- l'ordre de succession des lettres, et non pas leur forme intrinsèque. Ces derniers résultats ne vont donc pas à l'encontre des idées développées dans les trois paragraphes précédents, à savoir une convergence vers l'hypothèse d'invariance de la forme due à un fort degré d'automatisme. Rosenbaum (1991), au sujet de l'écriture, suggère que les lettres seraient le résultat d'une 'concaténation' de composants morphocinétiques. Concernant le type d'erreur constatée dans l'expérience de Smyth & Silvers, on peut faire le lien avec l'expérience postérieure de Patterson & Wing (1989) où les auteurs mettent en évidence le fait que ce soit l'étape de formulation d'un texte, en comparaison avec la copie (processus de bas niveau) ou une pensée sur un sujet

quelconque (processus de niveau supérieur), qui demande le plus d'attention. Dans l'expérience de Smyth & Silvers, les altérations notées dans la composante morphocinétique de l'écriture seraient alors le fait d'erreurs qui se seraient produites en amont du niveau graphomoteur (niveaux supérieurs tels que sémantique ou de planification?).

Piolat en 2003 et 2004, résume les faits en rappelant que la production verbale écrite est une activité complexe qui implique au moins trois niveaux de traitements (sémantique, linguistique, graphomoteur) qui mobilisent des connaissances diversifiées (figure 36) et des processus, outils de transformation de l'information. "Le rédacteur doit construire un ensemble de représentations pré-verbales regroupant les idées qu'il veut communiquer dans un contexte donné (niveau sémantique). Ce message doit faire l'objet de traitements afin d'être mis en langue (niveau linguistique). Ces représentations verbales sont, elles-mêmes, transformées pour être transcrites (niveau graphomoteur)". Le rédacteur, par l'entraînement, doit automatiser en priorité certains traitements comme l'exécution de lettres, afin de pouvoir consacrer plus de ressources à des traitements non automatisables comme certaines opérations complexes de planification. Si ces opérations complexes ne se déroulent pas correctement, les niveaux qui en découlent subissent forcément des perturbations.

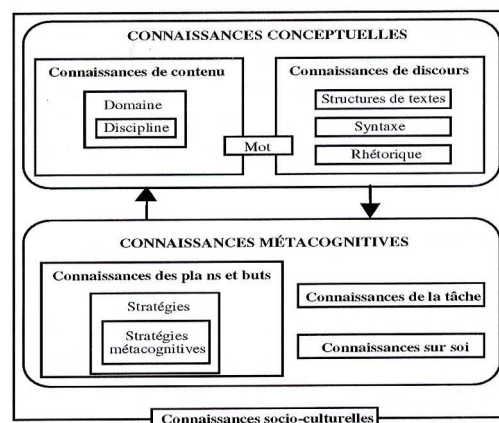


Figure 36 : Catégorisation des connaissances selon Dolchy et Alexander (1995).

### 6.2.3. Modèles computationnels de l'acte graphomoteur

Ces modèles se basent également sur l'hypothèse d'un programme moteur, mais ont opté pour une démarche différente. "Egalement désignés par le terme « bottom-up », ils se focalisent dans un premier temps sur les aspects périphériques des mouvements d'écriture, qu'ils intègrent ensuite aux aspects centraux, liés à la notion de représentation abstraite du

mouvement" (Sallagoïty, 2004). Ils essaient de mettre en évidence un principe qui minimiserait la charge de traitement du système nerveux central et constituerait le contenu du programme moteur. Pour cela ils donnent des descriptions quantitatives de l'ensemble des actions mécaniques des muscles et des commandes neuronales les activant. Ils peuvent simuler ou explorer les implications des différentes hypothèses de contrôle et les comparer aux observations expérimentales.

### **6.2.3.1. Hypothèse de la moindre secousse**

Flash & Hogan (1985) formulent un modèle mathématique pour décrire la coordination des mouvements volontaires du bras humain. La trajectoire qui conduit à la meilleure performance de la main est définie grâce à une théorie d'optimisation dynamique. Le but majeur de la coordination motrice étant la production d'un mouvement qui soit le plus régulier possible, la magnitude de la secousse (variation de l'accélération –ide- dérivée seconde de la vitesse) doit être la plus faible possible.

En 1995, Viviani & Flash précisent que ce n'est pas le mouvement lui-même qui est généré par la « théorie de la moindre secousse », mais plutôt la représentation virtuelle de sa trajectoire (ce que nous avons jusqu'à présent appelé « représentation spatiale »). Ils décrivent les trajectoires complexes comme un enchaînement de petites actions motrices appelé « chunking » (regroupement).

L'application de cette théorie au mouvement d'écriture est envisagée par Lambert & Espéret (1997) dans leur étude relative à l'apprentissage de l'écriture chez l'enfant. A l'instar des acquisitions observées dans d'autres domaines cognitifs, la mise en place d'unités graphiques peut être décrite par un phénomène de chunking : la réalisation des traits de base serait automatisée à des fins d'assemblage en une unité plus importante (lettres, syllabes, mots par exemple), pour constituer peu à peu un programme moteur unique. Cette économie cognitive est non négligeable dans le cas de l'écriture manuscrite, étant donné que cette action met en jeu une somme de processus différents (graphomoteur, orthographique, sémantique...), puisant tous dans les mêmes ressources attentionnelles. Ainsi, plus l'automatisation de processus de bas niveaux se réalise, plus l'attention peut être portée sur des processus de plus haut niveau (Bourdin *et al*, 1996 ; Fayol *et al*, 1987 ; Passerault *et al*, 1996).

### **6.2.3.2. Modèle de Plamondon *et al.* (2003)**

Dans son travail sur les mouvements rapides humains, l'auteur s'intéresse à l'écriture. Selon ce modèle, l'action motrice n'est pas complètement contrôlée par le SNC : une partie est programmée à l'avance et une partie évolue de façon autonome. Le tracé de la pointe du stylo est alors divisé en sous-mouvements produits sans l'intervention d'un contrôle en ligne (Plamondon & Guerfali, 1998).

La représentation des mouvements est basée sur la représentation des vitesses correspondant aux différents sous-mouvements composant l'écriture (unité de segmentation : le trait). Le SNC ne commande alors que *l'orientation et l'amplitude* de chaque vecteur vitesse spécifique à chaque trait, en activant deux systèmes neuromusculaires (un agoniste et un antagoniste). La représentation abstraite de la trace est mémorisée au niveau central comme une séquence de cibles virtuelles à atteindre pour pouvoir produire la trajectoire voulue (Sallagoïty, 2004).

### **6.2.3.3. Modèle masse-ressort oscillatoire**

Selon ce modèle, l'écriture manuscrite est générée par l'action de deux paires d'oscillateurs opposés orthogonalement : le système du poignet (pour la composante horizontale) et le système des doigts (pour la composante verticale) (Hollerbach, 1981). Les lettres résultent uniquement des oscillations couplées dans les directions horizontale et verticale. En effet, leur largeur et leur hauteur sont contrôlées par l'amplitude et la fréquence des oscillations, et leur forme par la modulation de la phase relative (positionnement relatif des deux oscillateurs dans le temps). Le rajout d'un glissement global vers la droite permet une séparation spatiale des lettres et le passage d'un patron d'oscillation à un autre se produit exclusivement aux points où la vitesse verticale s'annule.

Ce modèle postule la présence d'un codage de la forme au niveau du SNC en terme de « symboles ». Dans le cadre de formes graphiques produites, quand les deux oscillateurs ont la même fréquence d'oscillation, ces symboles correspondent à des formes codées en terme de relation de phase et d'amplitude entre les deux oscillateurs orthogonaux. Chaque forme graphique est caractérisée en terme de valeurs de phase relative et d'amplitude relative spécifiques. "La seule intervention du SNC consisterait alors à impulser une force à des

moments appropriés de la trajectoire, et à spécifier l'ensemble des conditions initiales nécessaires pour produire la forme désirée" (Sallagoity, 2004).

#### **6.2.4. Modèle dynamique de l'acte graphomoteur : théorie d'auto-organisation appliquée à l'écriture**

Les conceptions cognitivistes décrites jusqu'alors s'appuient sur un nombre important d'études empiriques. Elles constituent actuellement les théories de référence pour expliquer l'apprentissage moteur. Cependant, depuis une vingtaine d'années, des théories alternatives aux théories cognitivistes se développent. Ces nouvelles théories sont appelées approches dynamiques de l'apprentissage. Bien que n'ayant pas encore donné lieu à des propositions pratiques aussi formalisées que les théories cognitivistes, ces nouvelles théories de l'apprentissage sont à bien des égards stimulantes et renouvellent la vision des habiletés motrices. Dans son dernier livre, Carole Sève (2009) apporte quelques repères essentiels sur ces nouvelles approches de l'apprentissage.

"Une des faiblesses des théories cognitivistes est la capacité limitée de traitement et de stockage de l'information de l'homme (par rapport à des ordinateurs)". Autrement dit, notre capacité de mémoire n'autoriserait pas le stockage et le rappel de tous les programmes moteurs impliqués dans nos habiletés motrices.

Face à cette lacune, les chercheurs ont proposé une autre vision ne faisant pas appel au traitement et au stockage de l'information. Nos habiletés motrices ne seraient pas stockées dans des mémoires, mais résulteraient de la confrontation de l'individu à un réseau de contraintes (liées à la tâche, à l'organisme et à l'environnement). L'auteure prend l'exemple suivant : si vous faites l'expérience de fléchir-étendre plusieurs fois de suite, simultanément et à une fréquence importante vos deux index, spontanément vous optez pour une coordination en phase (vos index se fléchissent et se tendent à la même fréquence). Avec un peu de contrôle attentionnel, il est possible d'opter pour une coordination en antiphase (un index se fléchit pendant que l'autre s'étend) mais les autres coordinations (décalage de 90° par exemple entre les deux index) sont beaucoup plus difficiles à réaliser et ne tiennent plus lorsque la fréquence des mouvements augmente. Ce phénomène de *coordinations spontanées ou préférentielles* a été observé pour d'autres articulations. Il est interprété par les chercheurs comme une tendance spontanée du système à adopter les synchronisations les plus simples

possibles. Dans cette optique, l'apprentissage consiste à maîtriser de nouveaux degrés de liberté, afin de rendre l'organisation de plus en plus économique.

Le travail de Sallagoïty (2004) identifie les patrons de coordination (ou patrons de phase relative) préférentiels caractérisant le système graphomoteur, c'est-à-dire la localisation des orientations préférentielles présentes dans la trace graphique. L'auteure, qui a travaillé sur des formes graphiques stationnaires (sans glissement du stylo de la gauche vers la droite puisqu'elle n'a pas fait écrire de lettres, ni de mots), en identifie quatre, ayant chacun un degré de stabilité différent. Avant d'aller plus loin, il est nécessaire de définir le concept de *stabilité*. Ce dernier correspond à la capacité d'un système à maintenir une structure spatiotemporelle donnée dans un contexte donné, et à sa capacité de produire d'autres mouvements en réponse à une modification de contraintes (ce que ne permet pas la notion d'invariance). En terme d'écriture, les formes dans l'orientation oblique vers la droite sont par exemple plus précises et plus stables que celles dans l'orientation oblique vers la gauche (pour les droitiers). De même, les formes verticales sont préférées à leurs homologues horizontales. Dans cette perspective, des études sur l'apprentissage au niveau de la coordination bimanuelle, montrent que des patrons originellement instables peuvent être stabilisés par la pratique (Smethurst & Carson, 2001). La dynamique de coordination multistable de la graphomotricité observée par Sallagoïty pourrait alors être le résultat d'une longue pratique de l'écriture, permettant aux individus d'enrichir petit à petit leur dynamique de coordination, en stabilisant de nouveaux *patrons de coordination* imposés par la tâche d'écriture.

Ces résultats confirment que toutes les formes graphiques n'ont pas le même statut : les formes graphiques composant l'écriture manuscrite sont plus ou moins faciles à produire en fonction de la stabilité du patron de coordination qu'elles impliquent. Par voie de conséquence, la performance graphique reposerait sur des formes préférentielles, et les caractéristiques des formes graphiques à produire dépendraient de leur propriété de stabilité. Des expériences de détérioration de ces patrons confirment l'existence d'une stabilité différentielle. En effet, la dégradation de la performance graphique sous diverses contraintes (par exemple, une augmentation de la vitesse de mouvement) n'est pas uniforme : l'ordre de la détérioration suit l'ordre de stabilité relative de chaque patron préférentiel. De la même façon, lorsque l'on demande aux sujets de réaliser des patrons non préférentiels, les formes produites montrent une plus grande variabilité, une plus grande imprécision et une plus faible fréquence de mouvement. Quant à l'unité de segmentation de la trace, elle correspond aux

valeurs fixées de la phase relative. Les lettres sont alors produites de façon plus ou moins précise, rapide et stable selon qu'elles sont composées d'une ou plusieurs unités (et donc d'un ou plusieurs patrons de coordination) plus ou moins stables.

Selon cette théorie, la formation de patrons graphiques stables n'est pas prescrite par un modèle interne ou un programme moteur, mais elle est le fruit de l'interaction cohérente et spontanée de l'ensemble des éléments composant le système graphomoteur. Ceci répond à la théorie de *l'auto-organisation* utilisée pour expliquer le fonctionnement de la plupart des systèmes complexes, c'est-à-dire comprenant un nombre important d'éléments ou degrés de libertés (ex : neurones, molécules, muscles, particules) en interaction les uns avec les autres.

Ces deux approches alternatives à l'approche neurocognitive, que ce soit par la tentative de minimiser la part de traitement au niveau central, ou par la tentative de prouver l'existence de patrons de coordinations préférentiels, privilégient toutes les deux une part d'automatisation de l'action d'écriture.

\*  
\*                      \*

Pour la suite de notre travail, nous choisirons de privilégier le modèle neurocognitif de l'écriture qui, aussi bien au niveau des concepts théoriques qu'il envisage, qu'au niveau des méthodologies qu'il emploie, est celui qui aborde le mieux les questions que nous nous posons.

Ce modèle décrit l'écriture en tant que mouvement volontaire découlant d'une automatisation et comportant de ce fait des composantes automatisées. Ces dernières lui confèrent des propriétés telles que la reproductibilité du geste ou l'indépendance vis-à-vis de perturbations issues de l'environnement, et tout ceci à moindre coût énergétique. L'efficacité de l'automatisme n'est cependant pas systématique. Les erreurs d'exécution ne sont pas complètement éliminées. Dans ce cas, ce sont les rétroactions sensorielles qui permettent au sujet de détecter des messages d'erreur et de reprendre le contrôle de l'exécution grâce à l'attention : il passe de la « pénombre psychique » à la conscience (Collet, 2002). Les processus attentionnels ne sont pas absents du mouvement automatisé. Ils fonctionnent simplement à bas régime et sont réactivés en cas de problème dans l'exécution. "Pour ces

raisons, le contrôle de l'automatisme n'est pas inconscient. Il faut le qualifier d'*infraconscient*, pour montrer qu'il reste sous contrôle cognitif, d'une part, et qu'en cas de besoin, le sujet conserve la capacité de mobiliser de nouveau son attention sur l'exécution" (Collet, 2002). La notion d'automatisation est donc un phénomène relatif qui dépend moins du sujet que des contraintes auxquelles il est soumis. Il n'y a pas de différence de nature entre le mouvement automatique et le mouvement volontaire, mais simplement une **différence de degré**.

En résumé, toute habileté motrice complexe est constituée d'activités réflexes, automatiques et contrôlées par l'attention. Chaque niveau d'organisation du système nerveux central garde sous son contrôle une famille de mouvements. L'ensemble ne fonctionne pas de manière séparée, mais comme une totalité organisée. Chaque niveau fait partie intégrante des étages supérieurs (figure 37). "Ainsi, les niveaux de contrôle des mouvements volontaires vont intégrer ceux de la motricité réflexe et primaire, cette dernière pouvant être transformée pour répondre aux objectifs fixés par la commande intentionnelle" (Collet, 2002).

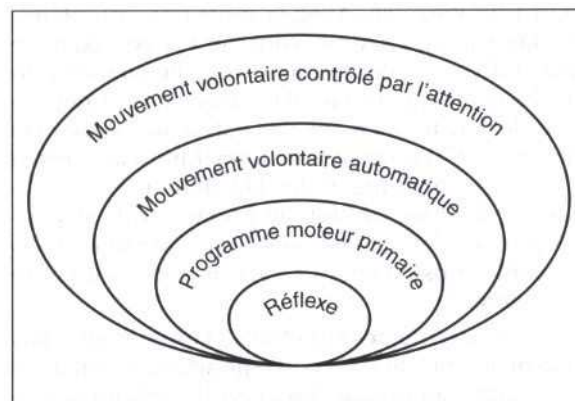


Figure 37 : Notion de performance motrice intégrée (extrait de Collet, 2002)

Notre protocole expérimental sera donc destiné à tester dans quelles mesures les conditions non conventionnelles que nous avons choisies seront susceptibles de « déstabiliser » ou pas les programmes moteurs existants au plus haut niveau et leurs automatismes / invariants associés.



## 7. Problématique

En dépit de son aspect stéréotypé, la trace écrite est caractérisée par une variabilité de sa forme, variable que nous avons choisi de mesurer dans notre protocole expérimental. La forme est la caractéristique la plus étudiée par l'expert, en ce sens où elle fournit la plus large palette d'informations. Harrison, en 1966 déjà, souligne le fait que l'individualité de l'écriture s'explique en grande partie par la diversité des modes de formation à l'origine des lettres. Hanlen *et al.*, en 1999, après avoir retenu 34 éléments d'étude de l'écriture, ont envoyé un questionnaire à un ensemble d'experts en documents. Le but était de recenser et hiérarchiser les caractéristiques utilisées pour réaliser une étude de ce type. Il en ressort que la forme des lettres fait partie des paramètres les plus exploités par les experts questionnés pour réaliser une étude d'écriture. Marquis, dans ses travaux de thèse publiés en 2007, rappelle l'ensemble des systèmes d'identification de scripteurs se basant sur des éléments morphologiques des caractères manuscrits, tels que les recherches de Bensefia *et al.* (2002), Srihari *et al.* (2002) et les systèmes FISH et SCRIPT (Buquet, 2000). D'autres données telles que des données temporelles (comme les durées d'écriture), cinématiques (comme la vitesse), ou de pression, restent des éléments importants pour l'expert, mais qui demeurent plus difficiles à extraire en off-line, c'est-à-dire une fois le document rédigé.

Les examens réalisés par les experts en écriture nécessitent plusieurs exemplaires de comparaison, afin de réduire le risque d'utiliser un spécimen non représentatif de l'étendue de la variabilité du(des) scripteur(s) de comparaison. L'écriture réalisée en condition conventionnelle (CR), c'est-à-dire un scripteur assis devant une table, varie dans une certaine mesure, et peut être différenciée de l'écriture d'un autre scripteur. Cependant, les analyses forensiques peuvent concerner des traces réalisées dans une position non usuelle (corps / support). L'écriture dans ces conditions (CNC) pourrait voir sa variabilité augmenter de par l'inconfort créé et, le cas échéant, son analyse nécessiterait un nombre de spécimens de comparaison supérieur à celui utilisé en condition classique et/ou réalisés en conditions comparables.

Les questions abordées dans cette thèse découlent d'un problème concret qui est posé aux experts en écriture. Implicitement, tenter d'identifier un scripteur, c'est considérer d'une part, que le risque que deux personnes écrivent de la même façon est faible, c'est-à-dire que la

variabilité inter-individuelle est grande et d'autre part, que chaque scripteur écrit quasiment toujours de la même façon, c'est-à-dire que la variabilité intra-individuelle est faible devant la variabilité inter-individuelle.

Le rapport des variabilités inter / intra est donc considéré comme grand par définition. Ce principe fondamental du processus d'identification d'écriture est admis en condition classique, mais il n'a pas été vérifié en CNC. Que devient ce rapport dans ces conditions ?

Comparer un écrit de question non conventionnel avec un écrit de comparaison réalisé en CR revient à supposer que l'écriture ne subit pas (ou pas suffisamment) de variations dans ces conditions. Quels éléments théoriques permettent de conforter cette hypothèse ?

Deux possibilités sont envisageables : soit la variabilité n'est pas modifiée en CNC, et à ce moment-là la pratique classique de comparaison reste inchangée. Soit la variabilité augmente, entraînant ainsi une diminution du rapport inter / intra, rendant plus difficile l'identification. Cela conduit à plusieurs solutions : on peut envisager d'augmenter le nombre de spécimens de comparaison ou d'adapter leur nature en se procurant des écrits réalisés dans les mêmes conditions. Au cas où ce ne serait pas possible, l'expert devra émettre des réserves et adapter ses conclusions en les tempérant.

Dans tous les cas, il faudrait savoir combien de spécimens sont théoriquement nécessaires pour faire une étude comparative. Il faudrait avoir une estimation correcte des deux valeurs de variabilités (intra et inter) et de la valeur critique de leur rapport –ie- valeur en deçà de laquelle il devient difficile, voire impossible, d'identifier un scripteur, ceci en conditions normales et en CNC.

Dans le cadre de cette étude, nous nous attacherons à évaluer la quantité de matériel nécessaire pour estimer la variabilité d'un mot (nombre de répétitions), et à apporter un élément d'information (validation ou réfutation) à l'approche consistant à comparer un matériel de question réalisé en CNC (ou inconnue) avec un matériel de comparaison réalisé en CR.

En cas d'absence de modification de la variabilité en CNC, notre étude apportera un argument objectif, tendant à valider la méthode classique d'identification d'écriture employée à l'heure

actuelle. Dans le cas contraire, notre étude préconisera une augmentation du nombre de spécimens de comparaison requis en cas d'écrits non conventionnels, et / ou de nature différente.

L'acquisition d'écriture sur tablette graphique et son analyse par des logiciels de traitement ont pour but d'extraire des **données objectives** permettant de répondre à la question suivante : est-il valide/cohérent, d'un point de vue statistique, de comparer une écriture réalisée en CNC avec une écriture réalisée en CR ? Pour cela, nous cherchons à comparer l'**intra-variabilité** obtenue en CNC à celle obtenue en CR, ceci à l'aide de critères objectifs.

L'intra-variabilité est calculée à partir des coordonnées (x, y) des points composant chaque mot. Répété n fois au sein d'une condition et ramené à un nombre de points prédéfini, un mot rédigé lors d'un essai peut alors être comparé au même mot réalisé lors d'un autre essai. On obtient ainsi une variance pour chaque mot, établi par un sujet et dans une condition donnée. Cette valeur représente l'intra-variabilité scripturale de chaque sujet dans le cadre défini par notre protocole, c'est-à-dire à l'échelle du mot, et uniquement sur quatre mots.

Pourquoi le choix du mot comme support de base de notre étude ?

Dans leurs travaux parus en 2003, Zhang & Srihari choisissent d'étudier le mot plutôt que la lettre. Ils justifient leur choix par le fait que ce soit une approche plus objective que celle se plaçant à l'échelle de l'allographe. Il est effectivement logique de considérer que la lettre est d'autant plus informative qu'elle se trouve dans son contexte, et plus encore dans le cas d'une écriture cursive.

Par ailleurs, la question de l'unité graphique n'a à ce jour pas encore été tranchée. En effet, dans la théorie du programme moteur, l'unité de base est définie comme étant la structure qui reste inchangée quel que soit le contexte dans lequel elle est produite (invariant). La réalisation d'écriture, en tant que mouvement complexe, suggère l'existence d'unités de base ou sous-mouvements, qui pourraient correspondre à des programmes distincts, comme le trait, la lettre ou des groupes de lettres. Jusqu'à présent, rien dans la définition du programme moteur graphique ne précise la taille de cette unité de base (Sallagoity, 2004).

Dans cette perspective, nous estimerons d'abord le nombre de répétitions minimum (n) nécessaire pour avoir une représentation de l'intra-variabilité qui soit la plus fidèle possible

(CR et CNC la plus inconfortable). Cette première expérience permettra aussi de réaliser les premières constatations sur l'effet d'une CNC sur la variabilité d'écriture. Puis, au cours d'une seconde expérience, nous placerons les sujets dans différentes autres CNC et mesurerons l'impact de ces dernières sur la variabilité.

Quant à la variable instrument scripturant, deux éléments font que nous ne testerons pas ce paramètre : tout d'abord, nous avons vu que les nombreuses études réalisées par la communauté forensique ont montré que l'instrument n'avait pas d'influence significative sur le mode de formation des lettres, et ensuite le protocole expérimental que nous avons choisi de mettre en place permet de réaliser des tracés uniquement avec un stylet magnétique, en vue de leur enregistrement sur tablette graphique. Nous n'envisagerons donc que les variables position du corps et position du support dans notre protocole expérimental.

## 8. But de l'expérimentation

Il s'agissait d'étudier l'influence que peuvent avoir des CNC d'écriture sur un tracé. Pour cela, nous avons choisi d'étudier deux variables : la **position du corps** et la **position du support**, en recréant des conditions se rapprochant plus (ex : debout / support vertical) ou moins (couché / support vertical) de conditions déjà rencontrées dans des affaires parvenues à la section documents du laboratoire. Nous avons également décidé d'effectuer des essais en majuscules et en minuscules. En effet, les experts exploitent ces deux types de casse. Et même si d'un point de vue sémantique, un mot représente une seule et même entité, qu'il soit écrit en majuscules ou en minuscules, en science forensique, les deux casses représentent deux 'matières premières' distinctes, entre lesquelles aucune comparaison n'est envisageable.

Nous avons décidé de numériser la trace pour raisonner sur sa variabilité. L'acquisition sur tablette graphique a permis l'acquisition on-line et le traitement informatisé des données. Pour ce point précis, notre approche est différente de celle employée par l'expert en écriture. En effet, la comparaison de données dans notre cas est totalement privée de l'appréciation de l'observateur, et en ce sens plus objective. Il s'agit non pas de remplacer l'analyse 'optique' traditionnelle, puisque de toute façon, cette technique n'est pas applicable en pratique, mais bien d'apporter un éclairage différent, et donc complémentaire. Ces données, envisagées sous un angle statistique (calculs de moyennes et de variances), ont conduit à la comparaison des **variabilités intra-individuelles** calculées en CNC et en CR. Des observations sur la variabilité inter-individuelle ont également pu être réalisées.

## Partie pratique

L'expérimentation a été conduite à l'Institut des Neurosciences Cognitives de Marseille.

### 9. Matériels

#### 9.1. Tablette graphique

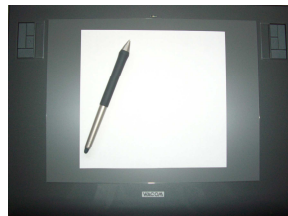


Figure 38 : Tablette graphique Wacom Intuos 2

Il s'agit d'un instrument permettant l'enregistrement des déplacements d'un stylo sur une surface lisse (figure 38). La tablette est reliée à un ordinateur, via une liaison USB, qui peut stocker l'ensemble des données enregistrées. L'écran de l'ordinateur peut être utilisé pour donner des instructions ou afficher un modèle. Une feuille de papier peut être placée sur la tablette et un stylo classique qui laisse une trace sur la feuille peut être utilisé. "Seul le stylet ou les autres outils utilisant la même fréquence radio sont détectés (et non une pression extérieure comme celle d'un doigt) " ([http://fr.wikipedia.org/wiki/Tablette\\_graphique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Tablette_graphique)). Nous avons utilisé une tablette Wacom Intuos 2 (<http://www.wacom.com>). L'intérêt majeur de la tablette est qu'elle permet de numériser avec une extrême précision spatiale (de l'ordre de 0,025 mm) et une résolution temporelle importante (100 points par seconde) la trace graphique produite par le stylet. Elle permet donc de représenter et de mémoriser les positions successives occupées par le stylet et de pouvoir reconstituer la trajectoire parcourue. A chaque intervalle de temps (10ms), un triplet (x, y, t) est enregistré, correspondant aux coordonnées spatiales du stylet sur la tablette à l'instant donné. De plus, la tablette est aussi en mesure de fournir une indication de la pression exercée dans l'axe du stylet dans une étendue de valeurs comprise entre 0 et 1023. Ces unités sont arbitraires et ne correspondent pas à une pression exprimée en unités physiques standard (bar, g/mm<sup>2</sup>,...). Elles sont relatives et ne peuvent être

utilisées que pour comparer des conditions d'écriture (ou des sujets) obtenues avec la même tablette et le même stylet. Une comparaison directe avec d'autres études, réalisées avec d'autres matériels, n'est alors pas possible. Il s'avère d'ailleurs que les mêmes modèles de tablettes peuvent fournir des mesures très différentes pour des pressions physiques identiques (J.L.Velay, communication personnelle). Pour résoudre ces problèmes, la solution consiste à étalonner chaque tablette de façon à convertir les mesures de la tablette (0-1023) en mesures physiques réelles (g/cm par ex) et à exprimer la pression dans ces unités. Quoi qu'il en soit, nous n'avons pas utilisé les données de pression dans ce travail.

Avec cet outil, on est en mesure d'analyser les données spatiales, temporelles, cinématiques ou de pression qui caractérisent l'écriture. En outre, le signal magnétique ne s'arrête pas à la tablette elle-même, mais s'étend à un centimètre au-dessus environ. Cela permet la détection du stylet même quand il n'est pas en contact avec la tablette. Cette caractéristique technique est très importante car elle permet de mesurer les temps et les déplacements 'en l'air' entre les lettres et les mots qui échappaient totalement à l'analyse jusqu'à lors. Cette fonctionnalité est, dans le cas présent, non négligeable, étant donné qu'elle nous permet de considérer la lettre dans son contexte, que l'écriture soit cursive (avec des liaisons matérialisées sur le papier) ou pas (c'est le cas de l'écriture en majuscules, avec des liaisons majoritairement 'aériennes'). Dans tous les cas, la composante aérienne, qui fait partie intégrante du geste d'écriture, est prise en compte. L'analyse de la trace s'effectue sur des éléments relativement restreints comme un ensemble de lettres ou de traits. Chaque trait est généralement constitué d'une phase d'accélération et d'une phase de freinage avec quelquefois passage par une vitesse nulle, voire une pause (Albaret & Santamaria, 1996).

Afin de permettre le positionnement différent de la tablette selon les conditions, un dispositif appelé 'potence' et réglable à deux niveaux (hauteur / inclinaison) était utilisé (cf. paragraphe Méthodes).

## **9.2. Sujets**

La population expérimentale était composée de 2 x 12 sujets âgés de 25 à 55 ans, hommes et femmes francophones, à niveau graphique moyen ou bon. Tous avaient un niveau d'étude supérieur et une pratique courante de l'écriture. Il est utile de rappeler qu'en France, l'apprentissage de l'écriture fait appel à un système standardisé. Les différences entre

abécédaires qui existent par exemple dans les différents cantons suisses n'ont pas d'équivalent en France.

Il y avait deux étudiants d'origine étrangère, possédant un niveau de pratique équivalent aux autres sujets et ne s'étant pas différencié des autres malgré un système d'apprentissage différent. Il y avait deux gauchers par session.

### 9.3. Echantillon d'écriture

Dans un premier temps, une phrase avait été créée afin de replacer les mots dans leur contexte. Elle contenait toutes les lettres de l'alphabet, sauf le 'x'. Les mots contenaient entre quatre et six lettres, afin de limiter le nombre de levées de plume au sein des mots (en vue du traitement de segments comparables par le programme). Nous avons également intégré le maximum de signes diacritiques et de ponctuation (■) car ce sont des détails d'écriture qui ne requièrent que très peu d'attention, et qui sont donc davantage le reflet de l'inconscient du scripteur (Hilton, 1957).

Phrase-test : L'époque « bazar », fièvre d'objets : stylo, mèche, glaçon, kiwi !

Dans un second temps, après avoir constaté que les fichiers informatiques engendrés par le programme de segmentation étaient trop volumineux et ralentissaient le traitement des données, nous avons décidé de travailler avec des échantillons d'écriture plus réduits (mots). Comme nous l'avons précisé dans la partie théorique, nous nous sommes appuyés sur l'hypothèse de Zhang & Srihari (2003) selon laquelle la lettre est d'autant plus informative qu'elle se trouve dans son contexte.

Pour cette raison, nous avons choisi deux mots de la phrase-test : « l'époque » et « d'objets », déclinés en majuscules et en minuscules. Ce choix nous a paru judicieux car il permettait d'avoir une représentation d'une certaine diversité, de par la nature / le nombre / la combinaison de lettres présentes, ainsi que par la présence de l'apostrophe. Ceci reste tout de même relatif étant donné la richesse offerte par la langue française, aussi bien du point de vue de la diversité de son vocabulaire que de sa syntaxe.



## 10. Méthodes

L'expérience principale s'est déroulée en deux temps. Une première étude avait pour but de définir le nombre de minimum d'essais à partir duquel une représentation correcte de l'intra-variabilité scripturale d'un individu pouvait être atteinte. Elle a été réalisée sur un échantillon d'écriture répété un grand nombre de fois, et dans peu de positions (corps et support). Une fois ce nombre défini, et les premières constatations sur la variabilité réalisées, une deuxième étude a été menée dans des conditions posturales plus variées, afin d'étudier la variabilité intra-individuelle dans ces différentes conditions.

Il a cependant été nécessaire de définir certains paramètres en amont de la 1<sup>ère</sup> expérience. Cela a fait l'objet d'une expérience préparatoire.

Dans les trois expériences, il s'agissait de plans à mesures répétées, c'est-à-dire de protocoles expérimentaux faisant intervenir les mêmes sujets, placés dans diverses conditions. On sait que ces plans sont sensibles aux effets de séquence (ou apprentissage), susceptibles d'entraîner la 'contamination' d'un essai par un autre. C'est la raison pour laquelle la théorie statistique des plans à mesures répétées suppose que l'ordre des conditions fasse l'objet d'une randomisation distincte pour chaque sujet (Howell, 1999). C'est ce que nous nous sommes employés à réaliser, en déterminant un enchaînement aléatoire des essais, entrecoupé de pauses.

### 10.1. Expérience préparatoire

Il s'agissait de paramétrer un ensemble d'éléments :

- la taille du support : nous avons choisi de travailler avec un format A4
- la taille de l'écriture : les sujets avaient pour consigne d'écrire de manière 'usuelle', c'est-à-dire à une taille correspondant à leur moyenne habituelle
- lorsque le support est horizontal, nous avons choisi de travailler à trois hauteurs standards, afin de se rapprocher des conditions réelles (au sol lorsque l'on est à genoux, à hauteur de table lorsque l'on est assis, à hauteur de guichet lorsque l'on est debout).
- le nombre de mots par feuille : l'influence que peut avoir un espace d'écriture restreint sur les composantes topocinétiques de l'écriture a été évaluée (limitation des marges

supérieures et inférieures par division d'une page A4 en 4 bandeaux horizontaux). Le test a été effectué sur une phrase (initialement prévue comme échantillon d'écriture) dictée trois fois, à différents moments de la journée. Onze critères topocinétiques ont été passés en revue sur 5 sujets (figure 39 et tableau 1).



Figure 39 : Phrase-test dictée à un sujet (papier libre / espace prédéfini)

	Papier libre	Espace prédéfini
Placement et équilibre du texte	Utilisation du 1 <sup>er</sup> quart supérieur Centrage par rapport aux bords latéraux	Utilisation de la moitié supérieure Positionnement plutôt à gauche
Dimensions et uniformité des marges	1 <sup>ère</sup> ligne G : 3,3 ; 2 <sup>ème</sup> ligne G : 4,4 1 <sup>ère</sup> ligne D : 3,3 ; 2 <sup>ème</sup> ligne D : 6,1 Marge sup : 6 ; Marge inf : 21,8	1 <sup>ère</sup> ligne G : 2,6 ; 2 <sup>ème</sup> ligne G : 3,3 1 <sup>ère</sup> ligne D : 5,4 ; 2 <sup>ème</sup> ligne D : 9,4 Marge sup : 2,8 ; Marge inf : 3,3
Interlignes	1,9	1,5
Parallélisme des lignes	OK	OK
Direction	Horizontale	Horizontale
Retraits	A droite 1,1	A droite 0,7
Espacements inter-mots	Entre 0,2 et 1,2	Entre 0,3 et 0,9
Espacements intra-mots	0,1 maximum	0,1 maximum
Alignement	Rectiligne dans l'ensemble	Convexe ou rectiligne
Expansion latérale (longueur des mots)	Plus importante pour tous les mots sauf pour « bazar »	
Proportions des mots	Largeur du mot « époque »	Largeur du mot « époque »

Tableau 1 : Exemple de mesure de 11 critères topocinétiques (1 sujet)

Le constat était le suivant : lors du passage d'un espace d'écriture de format A4 à un espace restreint, l'ensemble des critères topocinétiques étudiés restaient constants ou variaient dans une fourchette d'intra-variabilité propre à chaque sujet. Ceci nous a amené à considérer

que l'on pouvait faire rédiger plusieurs phrases-tests par page sans que cela ne modifie l'ordonnement de l'écriture. Ceci était d'autant plus vrai à l'échelle du mot puisque les contraintes exercées étaient moindres. Ceci a permis un gain de temps (plusieurs spécimens par feuille, d'où changement de support moins fréquent) (figure 40). Dans les cas réels, lors de la réalisation de corps d'écriture par dictée, cette procédure ne doit évidemment pas être appliquée, afin que le scripteur qui a potentiellement déguisé son écriture, n'ait pas à sa disposition le modèle de son déguisement.

D'OBJETS 17	l'époque 18	L'EPOQUE 19	d'objets 20
L'EPOQUE 21	D'OBJETS 22	d'objets 23	l'époque 24
l'époque 25	d'objets 26	D'OBJETS 27	L'EPOQUE 28
d'objets 29	L'EPOQUE 30	l'époque 31	D'OBJETS 32

Figure 40 : Exemple d'acquisition (1 sujet, 1 condition)

## 10.2. Première expérience

Nous avons utilisé la variance de la trace écrite comme quantification de la variabilité. La variance est la somme des carrés des écarts de chaque valeur à la moyenne divisée par l'effectif. L'estimation non biaisée de la variance de la population à partir de l'échantillon est calculée comme suit :

$$s^2 = \sum(x_i - \bar{x})^2 / N - 1$$

où

$s^2$  est la variance

$X_i$  est une mesure donnée

$\bar{X}$  est la moyenne de l'échantillon

$N$  est la taille de l'échantillon.

Donc, par définition, la variance dépend de l'effectif de l'échantillon avec lequel elle est mesurée.

La première question à laquelle nous avons dû répondre afin de quantifier la variance est celle du nombre de répétitions dont il fallait disposer pour obtenir une estimation correcte de la variance, c'est-à-dire la plus représentative de la variabilité scripturale du sujet.

On peut supposer que celle-ci augmente avec  $N$ , mais que pour une certaine valeur de  $N$ , la variance atteint une valeur stable qui ne varie plus, même si la taille de l'échantillon augmente. Comme ce nombre de répétitions optimal ne pouvait être déterminé a priori, nous nous sommes proposés de le mesurer expérimentalement en répétant un grand nombre de fois chaque mot. La variance était quantifiée après chacune des répétitions.

Nous avons ainsi observé l'évolution de la variance en fonction du nombre de répétitions, afin de connaître le nombre de répétitions au-delà duquel la variance ne variait pas de manière significative.

Lors de cette 1<sup>ère</sup> expérience, nous avons agi sur deux variables :

- la position du corps (assis, à genoux)
- le type de lettres (M : majuscule, m : minuscule)

Assis		A genoux	
M	m	M	m

Tableau 2 : 4 conditions testées lors de la 1<sup>ère</sup> expérience

Au cours de cette expérience, à chacune des deux positions corporelles était associée une position de support différente. Les deux paramètres variaient donc en même temps. Le but n'était pas de voir l'influence de chaque paramètre mais bien de choisir parmi les conditions non conventionnelles prédéterminées celle qui était la plus éloignée de la condition de référence du point de vue du confort. Ceci avait pour but d'augmenter les chances d'observer de grandes variations d'écriture. Ainsi, on optimisait nos chances de 'balayer' un spectre d'intra-variabilité qui soit le plus large possible, et on évaluait au mieux le nombre de répétitions nécessaires à l'estimation de l'intra-variabilité (figures 41a&b). Chaque mot a été répété 32 fois. Au total, chaque sujet réalisait donc 256 essais (2 positions x 4 mots x 32 répétitions). L'ordre de dictée respectait un enchaînement aléatoire des 4 mots, différent pour chaque sujet, et entrecoupé d'une pause de 5-10 minutes environ à mi-expérience.



Figure 41a : Condition de référence



Figure 41b : Condition non conventionnelle

### 10.3. Deuxième expérience

Lors de cette 2<sup>ème</sup> expérience, nous avons agi sur trois variables :

- la position du corps (assis, debout, à genoux, couché)
- la position du support (H : horizontal, V : vertical)
- le type de lettres (M : majuscule, m : minuscule)

Au cours de cette expérience, à chacune des positions corporelles étaient associées deux positions de support différentes. Le nombre de répétitions des essais était celui défini à l'issue

de la 1<sup>ère</sup> expérience. Comme lors de la 1<sup>ère</sup> expérience, l'ordre de dictée respectait un enchaînement aléatoire des 4 mots, différent pour chaque sujet, et entrecoupé d'une pause de 5-10 minutes environ à mi-expérience.

L'ensemble des conditions testées est récapitulé dans le tableau 2 et illustré sur la figure 42.

Assis				Debout				A genoux				Couché			
H		V		H		V		H		V		H		V	
M	m	M	m	M	m	M	m	M	m	M	m	M	m	M	m

Tableau 3 : 16 conditions testées lors de la 2<sup>ème</sup> expérience



Figure 42 : Condition de référence (assis horizontal) et 7 positions non conventionnelles

Une fois les paramétrages de l'expérience préparatoire effectués, les deux expériences ont pu être lancées. Au cours des deux expériences, seules les conditions de rédaction étaient

différentes, les techniques d'acquisition et de traitement des données mises en œuvre étaient identiques.

#### 10.4. Acquisition des données

L'acquisition des données a été réalisée à l'aide du programme Saisietrace®. L'expérimentateur lançait l'acquisition, dictait le mot, interrompait l'acquisition et enregistrait le fichier contenant l'essai (1 fichier / 1 mot). La saisie se faisait à vitesse spontanée sans modèle visuel. Le sujet regardait la feuille positionnée devant lui. L'écran permettant la visualisation du tracé en direct servait de contrôle à l'expérimentateur (figure 43).

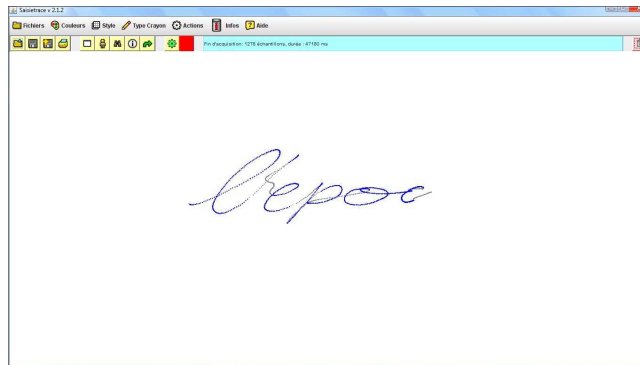


Figure 43 : Acquisition du mot « l'époque » (Programme Saisietrace®)

#### 10.5. Traitement des données

##### 10.5.1. Première étape : segmentation

Cette opération consistait à définir la partie de la trajectoire du stylo qui allait être utilisée pour effectuer l'analyse, et à déterminer le nombre de segments constitutifs du mot. La trajectoire enregistrée par la tablette comprenait le tracé sur le papier et les déplacements effectués en l'air ou 'levers'. Un segment est une partie tracée séparée par deux levers de stylo. Le 1<sup>er</sup> programme que nous avons utilisé pour analyser les tracés (programme RunSeg®) réalisait cette segmentation automatiquement : par l'analyse de la pression exercée sur la tablette, il calculait le nombre et la durée de chaque segment (figure 44).



Considérant que l'individualité à l'échelle du mot est supérieure à celle à l'échelle de l'allographe (Zhang & Srihari, 2003), nous rappelons que notre étude se base sur la comparaison de mots. La finalité de cette étape était donc la génération d'un mot par fichier.

Le logiciel de traitement RunSeg® offre trois types d'informations :

- le déplacement capturé par la tablette, sous forme de coordonnées (x, y) (encadré ■) : la trace papier est matérialisée par différentes couleurs correspondant aux différents segments (tracé séparant deux levées de plume) et la trajectoire en l'air est représentée par une seule couleur (gris).
- le nombre de segments constituant le mot (encadré ■)
- la pression en fonction du temps (encadré ■)

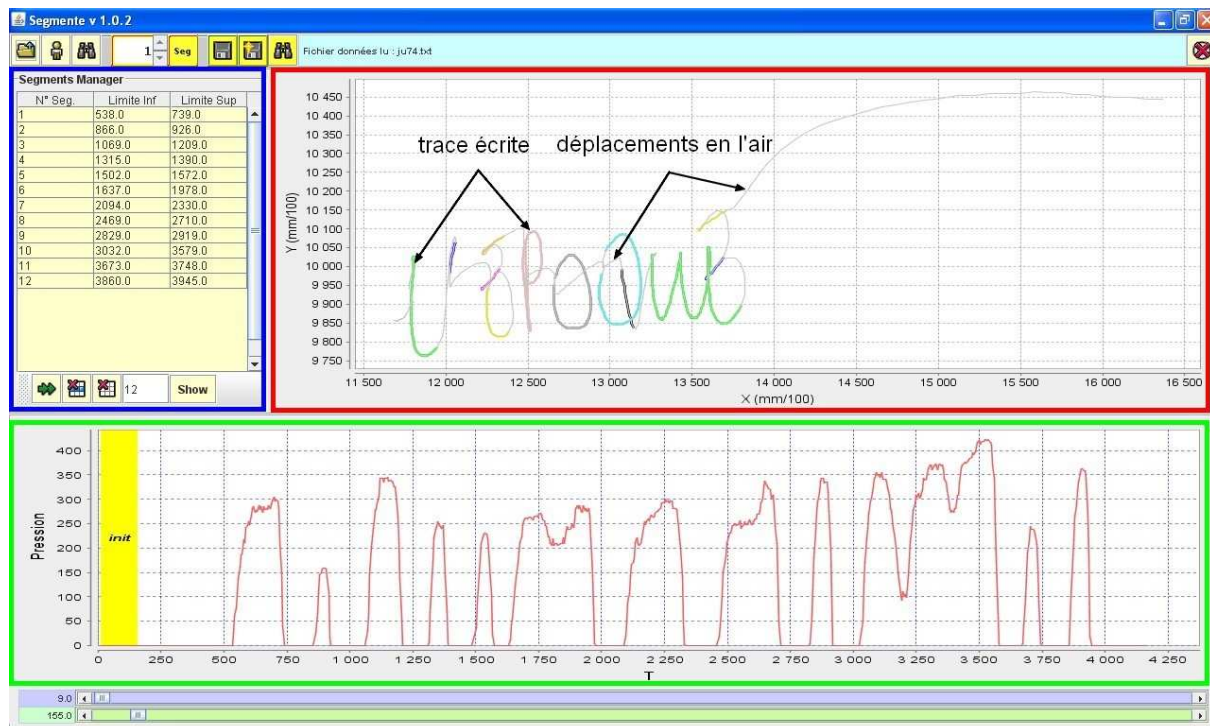


Figure 44 : Trajectoire du mot « L'EPOQUE » avant segmentation (1sujet, 1 essai, CR) (Programme RunSeg®)

Notre objectif étant de délimiter un seul segment qui englobe la totalité du mot, nous n'avons pas tenu compte de la segmentation automatique et avons décidé de délimiter les bornes de chaque mot, c'est-à-dire de définir le premier contact avec la tablette comme étant le début du mot et le dernier contact comme étant la fin du mot. C'est la phase de **segmentation** (figure 45). A ce stade, la trace est exprimée en coordonnées (x, y), elles-mêmes exprimées en 'coordonnées tablette'.



Figure 45 : Trajectoire du mot « L'EPOQUE » après segmentation (1sujet, 1 essai, CR) (Programme RunSeg®)

### 10.5.2. Deuxième étape : interpolation

A l'issue de l'étape précédente, tous les mots étaient décrits par un segment unique qui incluait les déplacements en l'air entre chaque lettre. Comme la fréquence d'acquisition des mots sur la tablette était de 100Hz, chaque mot était décrit par un nombre de points variable selon la longueur, la durée et la vitesse d'écriture. Plus le tracé était long et / ou plus la vitesse était lente, plus le nombre de points était important. Les mots devaient donc être normalisés dans l'espace – les ramenant ainsi à une taille identique – et dans le temps – les ramenant ainsi à un même nombre de points – afin de quantifier et comparer les variances. C'est la phase d'**interpolation** (programme RunStats®).

Nous avons utilisé une méthode d'interpolation polynomiale pour représenter au mieux la trajectoire des mots. Une fois le polynôme calculé, il suffisait de reconstituer le mot avec un nombre de points donné. La durée moyenne pour écrire les mots de 7 lettres que nous avons choisis pour notre étude (« L'EPOQUE » et « D'OBJETS ») était d'environ 5 sec. Autrement dit, les mots réellement écrits étaient numérisés à l'aide de 500 points environ (en moyenne). Nous avons choisi d'interpoler les mots avec 1500 points, c'est-à-dire davantage que le nombre initial, ce qui nous laissait une marge en cas d'écriture plus lente chez un sujet.

A ce stade, la trace est exprimée en coordonnées (x, y), elles-mêmes exprimées en unités arbitraires comprises entre 0 et 1.

### 10.5.3. Troisième étape : calcul du tracé moyen et de la variance moyenne

Chaque mot a été répété N fois dans chaque condition. Une fois ces N mots normalisés, ils pouvaient être moyennés point à point pour chacun des 1500 points de la trajectoire. La trajectoire représentant le mot moyen (figure 46 (■)) était calculée et enregistrée. Bien que cette normalisation augmente l'incertitude dans la zone médiane du mot et favorise la distorsion des lettres situées dans cette zone (Schomaker & Thomassen, 1986), les tracés moyens obtenus restaient reconnaissables. Cette trajectoire, constituée de 1500 points moyens, représentait le mot moyen d'un sujet donné pour les N répétitions dans la condition donnée.

Pour chacun des 1500 points, la variance horizontale (sur x) et verticale (sur y) a été calculée et représentée par une ellipse. Chaque trajectoire moyenne a alors été associée à 1500 ellipses qui décrivent une 'enveloppe de variabilité' autour du tracé (figure 39 (□)). La surface de chaque ellipse a été calculée à l'aide du produit  $ET(x) \times ET(y) \times 3.1416$  (ET = écart-type). Finalement, la surface moyenne des 1500 ellipses a été calculée. Elle représentait la **variabilité intra-individuelle** pour un mot donné, répété N fois et dans une condition expérimentale donnée.

A ce stade, la variance est exprimée en unités arbitraires (u.a.) comprises entre 0 et 1. Afin d'éviter un trop grand nombre de décimales, chaque surface a été multipliée par  $10^4$  et transformée en intégrale.

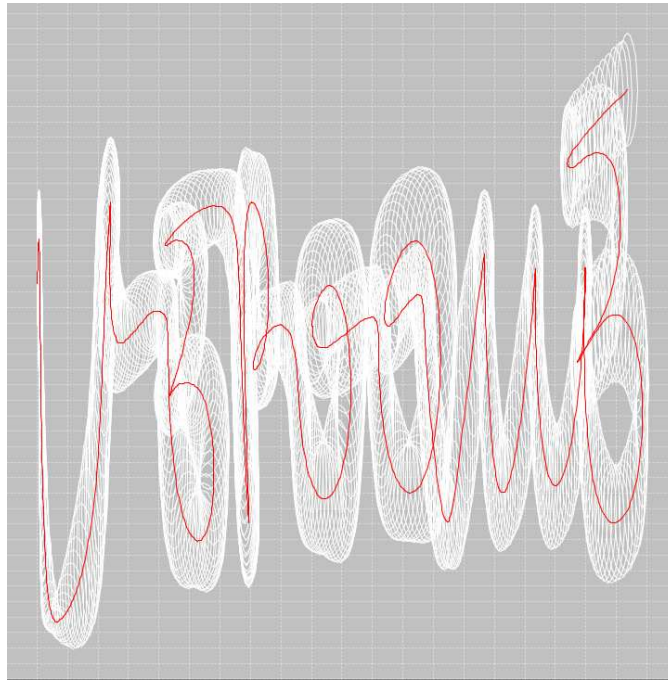


Figure 46 : Trajectoire moyenne du mot « L'EPOQUE » (■) et sa dispersion (□) (1 sujet, 32 répétitions, CR) (Programme RunStats®)

Nous avons ainsi obtenu 4 mots moyens par sujet (et par condition). La **variabilité inter-individuelle** a été calculée de la même façon que la variabilité intra-individuelle, en moyennant les mots moyens de chaque sujet et en calculant la variance moyenne autour des 1500 points constituant les 12 traces moyennes des 12 sujets.

En d'autres termes, pour le calcul d'intra-variabilité, il s'agissait d'appliquer la formule énoncée précédemment sur N répétitions (pour chaque sujet, chaque condition, chaque casse, chaque mot), et pour le calcul d'inter-variabilité, il s'agissait d'appliquer la même formule, mais sur 12 sujets (pour chaque condition, chaque casse, chaque mot) (figure 47).

N répétitions

12 sujets

Figure 47 : Valeurs (x, y) impliquées dans le calcul d'intra et inter-variabilités (d'objets / debout / vertical)

### 10.6. Méthode d'analyse des résultats : analyse de variance pour mesures répétées

Etant en présence d'un petit échantillon de population, nous aurions dû utiliser des méthodes statistiques non paramétriques. Mais comme nous avons choisi un plan expérimental comprenant des mesures répétées pour plusieurs facteurs imbriqués entre eux, et comme les interactions entre ces facteurs nous intéressaient, nous avons été amenés à utiliser des méthodes paramétriques. En effet, il n'existe pas de méthode non paramétrique simple pour effectuer ce type d'analyse. Si nous n'avions eu qu'un facteur, même à plusieurs niveaux (comme la posture : 4), nous aurions pu faire un test des rangs de Friedman pour 4

échantillons non indépendants, ce qui nous aurait par exemple permis de savoir si assis était 'meilleur' que debout etc. Mais nous n'aurions pas pu tester en même temps les orientations du support.

Nous avons donc choisi d'effectuer un des tests fondamentaux de la statistique : l'analyse de variance ANOVA (ANalysis Of VAriance) pour mesures répétées. Elle est destinée à analyser les données collectées dans le cadre de mesures répétées chez le même sujet. Ce qui est notre cas.

L'utilisation de méthodes paramétriques présuppose que certaines conditions soient réunies quant aux données : en particulier, 1- celles-ci doivent être normalement distribuées (condition de *normalité*) et 2- la variance ne doit pas être trop différente d'une condition à l'autre (condition d'*homogénéité des variances*). Aucune de ces deux conditions n'étant remplie (vérification par le test de Kolmogorov-Smirnov pour la normalité, et constat de certaines variances 4 fois plus importantes que d'autres pour l'homogénéité), nous avons décidé de transformer nos données afin de les optimiser. Le but était de faire en sorte que les données soient raisonnablement distribuées (peu de valeurs aberrantes) et que les variances soient relativement homogènes. N'ayant affaire qu'à des valeurs positives, nous avons utilisé la transformation logarithmique classique, dans laquelle chaque valeur est remplacée par son logarithme, puis réalisé une analyse de variance standard (Howell, 1999).

En outre, comme nous avons utilisé une ANOVA à mesures répétées, et afin de remédier à certains problèmes associés au non-respect de la condition d'application de sphéricité, nous avons effectué la correction de Greenhouse-Geisser. Cette correction se traduit, quand cela est nécessaire, par un ajustement des degrés de liberté.

Toutes les analyses statistiques ont donc été faites sur les données transformées. Les résultats étant comparables, nous avons choisi, pour des raisons de lisibilité, de présenter les tableaux et les figures correspondant aux données initiales non transformées. Les tableaux des données transformées en logarithmes sont présentés en annexe 2.

ANOVA est un test dont l'objectif est de tester l'hypothèse selon laquelle les moyennes des distributions sont identiques. Plus généralement, soient  $k$  groupes d'observations issus de  $k$  distributions normales indépendantes de variances identiques, et de moyennes respectives

$\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k$ . Les groupes n'ont pas besoin d'avoir des effectifs égaux. Si l'hypothèse d'égalité des moyennes est rejetée, ANOVA ne fournit pas d'analyse des raisons de ce rejet. En effet, ANOVA étant un test global, la statistique a été amenée à développer un grand nombre de tests consécutifs à un rejet de l'hypothèse nulle. Ces tests sont destinés à analyser les raisons ayant amené ce rejet en fournissant une analyse plus détaillée des comparaisons de moyennes (ce sont les tests post-hoc).

Lorsque le but est de comparer des moyennes deux à deux, deux méthodes sont couramment utilisées : le test de Tukey et celui de Student-Newman-Keuls. Ces deux tests sont liés et leurs résultats sont similaires quand on compare la plus grande des moyennes à la plus petite des moyennes. Pour les autres comparaisons, la méthode de Tukey est plus conservatrice mais risque trop souvent de ne pas détecter des différences réelles. La méthode de Student-Newman-Keuls est plus puissante mais risque de mettre en évidence à tort des différences qui n'existent pas. Quant à dire laquelle des deux il faut choisir, les statisticiens ne sont pas tous d'accord sur la réponse (Motulsky & Robert, 2002).

Notre seconde expérience comprenait deux facteurs: 'posture' (4 modalités) et 'inclinaison' (2 modalités) ce qui faisait 28 comparaisons possibles (cf tableau 4). Toutes ces comparaisons n'étaient pas pertinentes. Nous avons planifié les comparaisons qui nous intéressaient a priori -ie- celles qui apportaient des éléments de réponse à notre question de départ, à savoir la différence de variabilité existant entre les CNC et la CR. Pour le paramètre posture, 3 comparaisons ont été ciblées (celles faisant intervenir la posture de référence) et pour la variable combinée posture x inclinaison, 7 comparaisons ont été retenues (tableau 4). Pour effectuer ces comparaisons, nous avons utilisé le test t de Student. Le nombre de comparaisons d'intérêt a ensuite été utilisé comme facteur de correction (méthode de Bonferroni) afin de réduire le risque de faux positifs. En effet, une situation de multiplicité des comparaisons enlève presque toute valeur à un résultat statistiquement significatif puisqu'il est possible, en répétant les tests, d'obtenir une différence significative ( $p < 0.05$ ) avec n'importe quelles données de départ, même sans réel effet. La méthode de Bonferroni consiste à réaliser les tests avec un seuil de signification plus petit que 5% et à choisir cette valeur de telle sorte qu'après 'inflation' due aux comparaisons multiples, le niveau global atteint soit de 5%. Cette méthode est à réserver aux situations où le nombre de tests est petit, ce qui est notre cas. Ainsi, le seuil de probabilité classique ( $p = 0.05$ ) a été divisé par 7 (soit  $p = 0.0072$ ) et seules les comparaisons planifiées donnant une probabilité inférieure à ce

nouveau seuil ont été considérées comme significatives (cela correspond à la seconde expérience seulement).

	Ass H	Ass V	Deb H	Deb V	Gen H	Gen V	Cou H	Cou V
Ass H								
Ass V								
Deb H								
Deb V								
Gen H								
Gen V								
Cou H								
Cou V								

Tableau 4 : Récapitulatif des 28 comparaisons possibles (□, ■) dont celles que l'on planifie (CR vs. autres conditions ■)



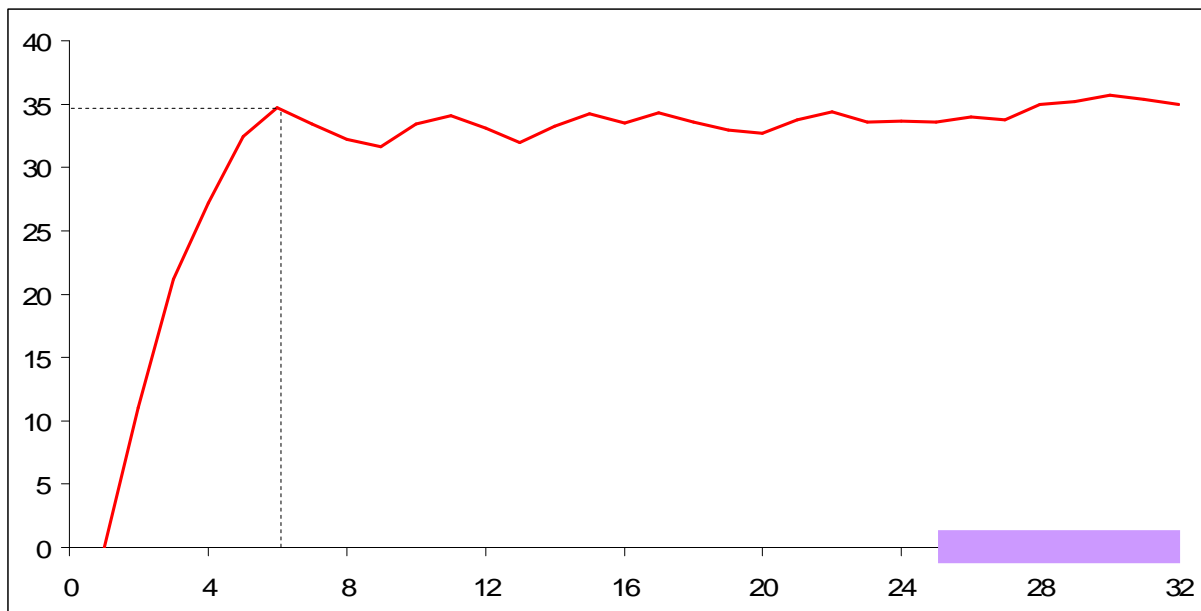
# 11. Résultats

## 11.1. Première expérience

### 11.1.1. Intra-variabilité

#### 11.1.1.1. Mesure de l'intra-variabilité moyenne

Chaque sujet réalisait 32 répétitions d'un même mot, dans une casse donnée. Ceci dans les deux conditions : assis support horizontal et à genoux support horizontal. Dans l'exemple ci-dessous (graphique 1), la variance se stabilise à partir de 6 répétitions du même mot.



Graphique 1 : Variance (u.a.) en fonction du nombre de répétitions (1 sujet, L'EPOQUE, CR). Zone de calcul de la moyenne théorique (■)

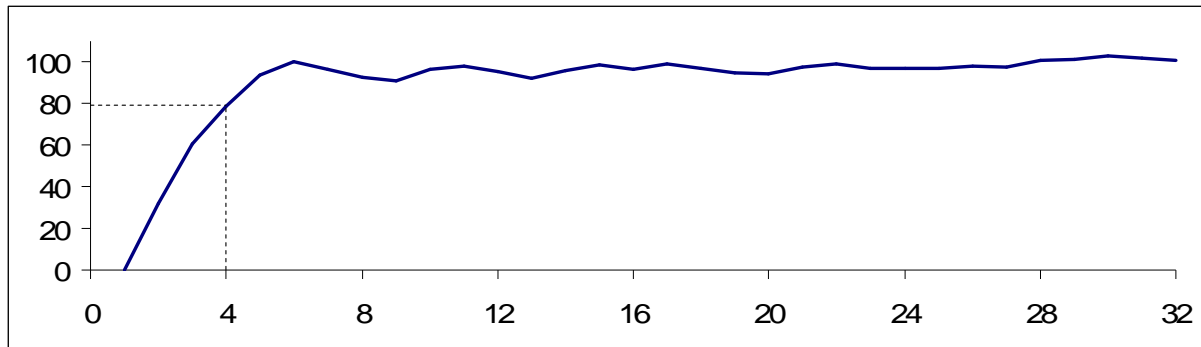
Comme le nombre de répétitions était important, la variance observée à la fin se rapprochait de la variance théorique. Nous avons donc considéré que la variance théorique, qui était celle que nous voulions estimer, était atteinte pour les dernières répétitions. Ainsi, pour chaque sujet et dans chaque condition, nous avons considéré que cette moyenne théorique correspondait à la moyenne des variances comprises entre les répétitions 25 et 32 (Graphique 1 ■). Les variances théoriques ainsi calculées sont rapportées, pour chaque condition et chaque sujet, dans le tableau 5.

	Condition de référence				Condition non conventionnelle			
	MAJUSCULE		minuscule		MAJUSCULE		minuscule	
Sujets	L'EPOQUE	D'OBJETS	l'époque	d'objets	L'EPOQUE	D'OBJETS	l'époque	d'objets
S1	35	40	67	98	40	45	60	100
S2	42	45	58	105	60	67	82	130
S3	35	30	37	65	38	35	45	68
S4	45	70	70	140	130	70	120	130
S5	14	23	29	33	23	23	45	65
S6	23	28	45	85	22	24	45	36
S7	23	22	30	28	22	17	27	23
S8	24	26	34	58	25	26	28	45
S9	36	60	98	89	41	54	79	99
S10	25	30	30	73	27	32	53	60
S11	28	65	64	110	44	56	86	112
S12	50	54	62	48	71	119	71	87
<b>IntraV moy.</b>	<b>32</b>	<b>41</b>	<b>52</b>	<b>78</b>	<b>45</b>	<b>47</b>	<b>62</b>	<b>80</b>

Tableau 5 : Intra-variabilité moyenne (u.a.) de chaque sujet (32 répétitions) et des 12 sujets (dernière ligne) (CR ■)

### 11.1.1.2. Nombre de répétitions nécessaires pour mesurer l'intra-variabilité

Etant donné les grandes différences de valeurs d'intra-variabilité entre les sujets, il était impossible de calculer une évolution de la variance moyenne pour les 12 sujets (ex : le sujet 4 pèserait très lourd dans cette moyenne). Nous avons donc converti les 32 mesures de variances de chaque mot et de chaque sujet en pourcentage de leur valeur finale. La valeur finale (entre les répétitions 25 et 32) représentait 100%. Pour chaque sujet dans chaque condition, nous disposons de l'évolution de la variance (en pourcentage) entre la première et la dernière répétition. Dans l'exemple ci-dessous, le sujet atteint 80 % de sa valeur optimale de variance pour 4 répétitions (graphique 2).



Graphique 2 : Pourcentage de la variance finale en fonction du nombre de répétitions (1 sujet, L'EPOQUE, CR)

Les courbes individuelles (en pourcentage) des 12 sujets ont ensuite été moyennées (graphique 3). De manière générale, le nombre de répétitions nécessaire pour atteindre la valeur plateau en CNC était du même ordre de grandeur que celui en CR.

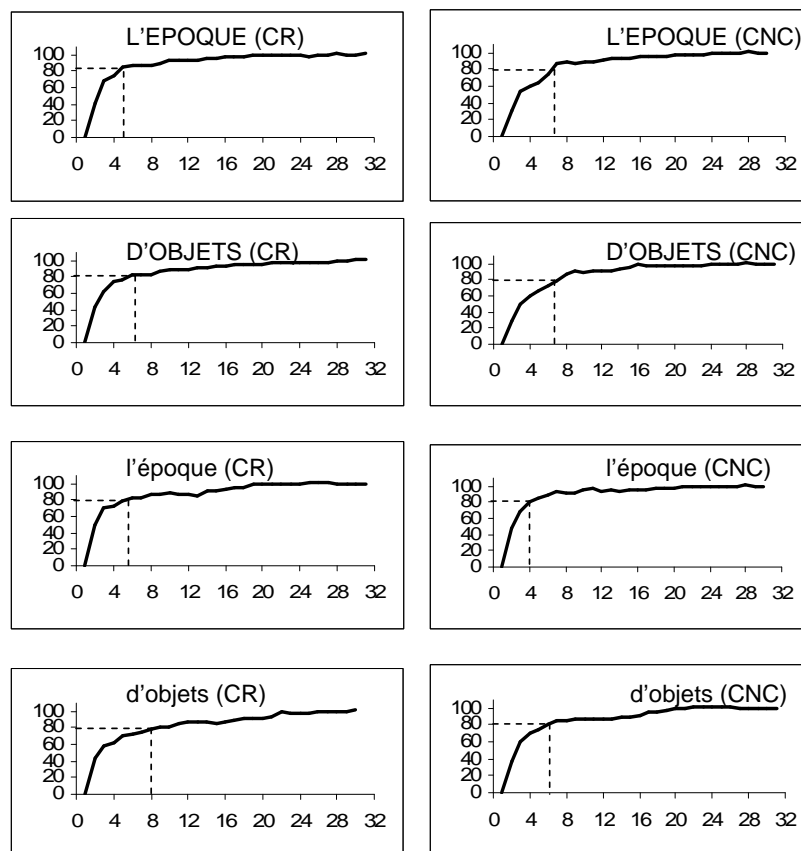
Les résultats ont montré que pour obtenir 100% de la variabilité d'un scripteur, il fallait parfois disposer de plus de 20 répétitions d'un même mot, alors qu'en moyenne, 4 à 8 répétitions suffisaient pour atteindre 80% de la variabilité (tableau 6). Afin de savoir à partir de quel moment (répétition) la variance atteinte n'était plus différente de la variance 'vraie' (finale), nous avons comparé par un test t chaque valeur de variance à la variance finale (100%). La variance finale est calculée en faisant la moyenne des répétitions 25 à 32. On a donc comparé la variance correspondant à la 1<sup>ère</sup> répétition avec la variance finale ainsi calculée, puis la variance correspondant à la 2<sup>nde</sup> répétition avec la variance finale, et ainsi de suite jusqu'à la 24<sup>ème</sup> répétition. Comme on réalise 23 tests t, la correction de Bonferroni est appliquée et le seuil de probabilité pour accepter une différence significative est corrigé en le divisant par 23 ( $0.05 / 23 = 0.0022$ ). Toutes les comparaisons qui donnent lieu à un t inférieur à 0.0022 correspondent donc à des variances significativement inférieures à la variance vraie (100%).

Les résultats indiquent qu'à partir de la 8<sup>ème</sup> répétition, les variances sont toujours non significativement différentes de la variance finale. Dans la condition où la variance augmente le plus lentement ('d'objets min' CR), on mesure au moins 79.6% de la variance, à la 8<sup>ème</sup> répétition. Et de manière générale, on mesure au moins 83% de la variance avec 8 répétitions pour toutes les autres conditions. Si on regarde les statistiques, on constate que même quand on ne mesure que 79.6%, la différence avec 100% n'atteint pas le seuil de 0.0022. En résumé,

à partir de 8 répétitions, on obtient une valeur de variance pouvant être assimilée à 100% (Annexe 1).

Idéalement, pour s'assurer que l'on estime correctement la variance de la condition testée, il faudrait avoir un maximum de répétitions : avec 20, on dépasse toujours 90%. Pratiquement, cela allonge considérablement la durée de l'expérience et la lassitude des sujets. Compte tenu des objectifs que nous nous étions fixés, à savoir tester un certain nombre de conditions sur un certain nombre de sujets, et afin de ne pas aboutir à un protocole expérimental trop lourd, nous avons choisi de ne mesurer que 80% de la valeur maximale de variance. Nous avons vu que pour obtenir 80% de la variance, 8 spécimens étaient en moyenne nécessaires. C'est avec ce nombre de spécimens minimum que l'on peut avoir une représentation correcte de la variabilité.

Aucune variation mesurable ne s'est produite au-delà de 8 répétitions d'un même essai. Une estimation correcte de la variance a ainsi été possible avec ce nombre minimum de répétitions, sur une quantité limitée de matériel (un mot).



Graphique 3 : Evolution de la variance (%) en fonction du nombre de répétitions (moyenne des 12 sujets)

	Condition de référence				Condition non conventionnelle			
	MAJUSCULE		Minuscule		MAJUSCULE		Minuscule	
Répétitions	L'EPOQUE	D'OBJETS	l'époque	d'objets	L'EPOQUE	D'OBJETS	l'époque	d'objets
	5	6	6	8	7	7	4	6

Tableau 6 : Nombre de répétitions nécessaire pour atteindre au moins 80% de la variance finale (CR ■)

Les tests réalisés dans le cadre de cette première expérience ont également permis d'extraire un certain nombre de premières informations quant à la variabilité d'écriture dans ces deux conditions.

### 11.1.1.3 Condition de référence vs. condition non conventionnelle

Les résultats d'intra-variabilité de 12 sujets ont été traités. L'analyse de variance effectuée sur la variable dépendante « intra-variabilité » (niveau de risque du test égal à  $\alpha = 0.05$ ) a montré que, de manière globale, la variance moyenne atteinte en CNC (58) était légèrement supérieure à celle atteinte en CR (51). Elle a révélé un impact non significatif de la condition ( $F_{(1, 11)} = 3.45, p = 0.09$ ).

Autrement dit le fait d'écrire à genoux sur un support horizontal n'a eu qu'une influence limitée sur la variabilité de l'écriture (diagramme 1).

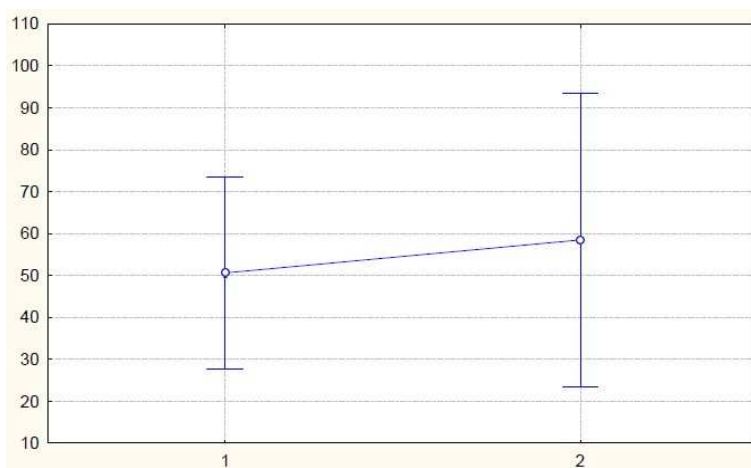


Diagramme 1 : Effet de la condition sur la variance (u.a.) ( $p=0,090052$ )  
1 = assis / horizontal, 2 = à genoux / horizontal

#### 11.1.1.4. Majuscules / minuscules

La variabilité moyenne des mots en minuscules était plus importante (68) que celle des mots en majuscules (41).

Les résultats de l'analyse de variance ont permis d'observer un effet du paramètre « casse » sur la variabilité de l'écriture ( $F_{(1, 11)} = 58.5, p < 0.001$ ) (diagramme 2).

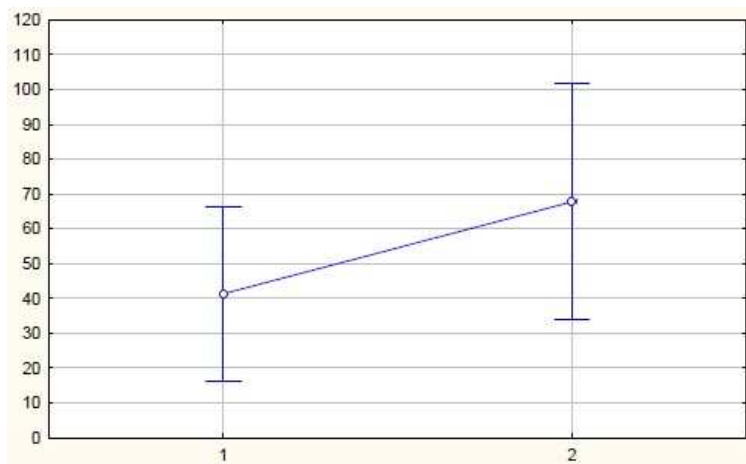


Diagramme 2 : Effet de la casse sur la variance (u.a.)  
1 = majuscules, 2 = minuscules

#### 11.1.2. Inter-variabilité

##### 11.1.2.1. Mesure de l'inter-variabilité moyenne

Comme nous l'avons indiqué dans la partie 'Méthodes', l'inter-variabilité a été calculée à partir des variances moyennes de chaque sujet dans chaque condition (et un mot moyen par casse).

Cependant les résultats d'inter-variabilité ne sont que préliminaires. Ils ne pourront être étendus qu'avec une population plus conséquente. Les valeurs obtenues n'ont à ce stade que **valeur d'indication**.

### 11.1.2.2. Condition de référence vs. condition non conventionnelle

De manière globale, l'inter-variabilité moyenne atteinte en CNC (120) était légèrement supérieure à celle atteinte en CR (108) (tableau 7).

	Condition de référence				Condition non conventionnelle			
	MAJUSCULE		Minuscule		MAJUSCULE		Minuscule	
InterV moy.	L'EPOQUE	D'OBJETS	l'époque	d'objets	L'EPOQUE	D'OBJETS	l'époque	d'objets
	34	47	150	199	38	48	174	218

Tableau 7 : Inter-variabilité moyenne (u.a.) des 12 sujets dans chaque condition (CR ■)

### 11.1.2.3. Majuscules / minuscules

L'inter-variabilité moyenne des mots en minuscules était nettement supérieure à celle des mots en majuscules, que ce soit en CR (175 vs. 41) ou en CNC (196 vs. 43) (diagramme 3).

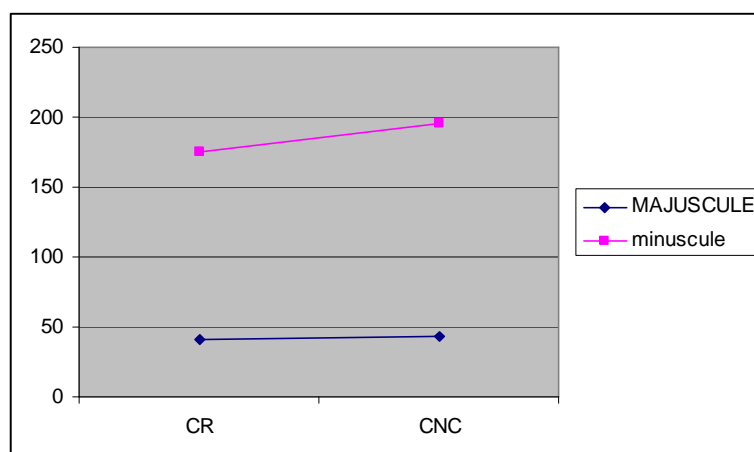


Diagramme 3 : Evolution de l'inter-variabilité moyenne (u.a.) en fonction de la condition (CR/CNC) et de la casse (MAJ/Min)

### 11.1.3. Comparaison de l'intra et de l'inter-variabilités

Nous rappelons que l'inter-variabilité a été calculée à partir d'un échantillon de population limité, ce qui donne aux valeurs obtenues un statut purement indicatif.

### **11.1.3.1 Condition de référence vs. condition non conventionnelle**

L'inter-variabilité était supérieure à l'intra-variabilité que ce soit en CR (108 vs. 51) ou en CNC (120 vs. 58). Quelle que soit la condition, le rapport InterV / IntraV était de l'ordre de 2.

### **11.1.3.2. Majuscules / minuscules**

En ce qui concerne les majuscules, l'intra et l'inter-variabilités étaient du même ordre de grandeur (41 et 42), alors que l'inter-variabilité était nettement supérieure à l'intra-variabilité pour les lettres minuscules (186 vs. 68) avec un rapport Inter-variabilité / Intra-variabilité de 2.7.

## **11.2. Deuxième expérience**

### **11.2.1. Intra-variabilité**

#### **11.2.1.1. Mesure de l'intra-variabilité moyenne**

Compte-tenu de la 1<sup>ère</sup> expérience qui a montré que 8 répétitions permettaient d'estimer correctement la variabilité, chaque sujet a réalisé 8 répétitions d'un même mot dans une casse donnée.

8 conditions différentes ont été testées : assis / horizontal, assis / vertical, debout / horizontal, debout / vertical, à genoux / horizontal, à genoux / vertical, couché / horizontal et couché / vertical. Au total, chaque sujet réalisait donc 256 essais (8 positions x 4 mots x 8 répétitions).

L'ensemble des valeurs d'intra-variabilité obtenues dans les 4 postures et les 2 inclinaisons est présenté ci-dessous (tableaux 8 & 9).



a	Condition de référence				Assis Vertical			
	MAJUSCULE		minuscule		MAJUSCULE		minuscule	
Sujets	L'EPOQUE	D'OBJETS	l'époque	d'objets	L'EPOQUE	D'OBJETS	l'époque	d'objets
S1	25	37	45	110	29	29	46	93
S2	19	21	25	24	44	21	55	23
S3	17	23	18	22	17	25	29	56
S4	37	48	71	58	56	56	41	91
S5	20	18	40	87	16	16	42	40
S6	25	36	79	64	20	26	47	78
S7	35	35	37	106	21	24	22	92
S8	22	41	86	122	19	32	40	73
S9	19	17	27	43	19	23	15	35
S10	35	37	83	67	46	42	65	117
S11	31	30	38	44	32	57	84	55
S12	58	56	85	88	38	37	69	71
<b>IntraV moy.</b>	<b>29</b>	<b>33</b>	<b>53</b>	<b>70</b>	<b>30</b>	<b>32</b>	<b>46</b>	<b>69</b>

b	Debout Horizontal				Debout Vertical			
	MAJUSCULE		minuscule		MAJUSCULE		minuscule	
Sujets	L'EPOQUE	D'OBJETS	l'époque	d'objets	L'EPOQUE	D'OBJETS	l'époque	d'objets
S1	24	30	51	66	34	33	59	75
S2	13	27	18	17	30	51	35	79
S3	27	21	31	47	11	23	20	44
S4	29	38	35	50	36	47	55	83
S5	38	23	27	74	21	26	44	36
S6	29	59	54	63	39	40	54	66
S7	21	28	39	40	30	27	37	74
S8	37	46	77	95	28	20	41	43
S9	26	13	25	29	20	15	23	61
S10	26	47	34	85	51	47	47	68
S11	28	52	18	38	39	52	37	113
S12	23	46	69	52	48	50	102	54
<b>IntraV moy.</b>	<b>27</b>	<b>36</b>	<b>40</b>	<b>55</b>	<b>32</b>	<b>36</b>	<b>46</b>	<b>66</b>

c	A genoux Horizontal				A genoux Vertical			
	MAJUSCULE		minuscule		MAJUSCULE		minuscule	
	L'EPOQUE	D'OBJETS	l'époque	d'objets	L'EPOQUE	D'OBJETS	l'époque	d'objets
S1	21	21	48	97	27	28	39	86
S2	14	19	21	18	13	16	17	24
S3	19	13	21	23	20	23	28	61
S4	22	56	38	133	22	63	36	90
S5	17	20	34	37	52	79	88	123
S6	23	29	42	40	37	41	39	93
S7	14	32	48	48	94	87	85	116
S8	26	18	58	44	37	56	39	68
S9	32	11	20	29	98	43	81	58
S10	67	46	63	93	81	79	102	182
S11	39	40	95	60	80	113	202	197
S12	43	62	92	75	68	43	128	76
<b>IntraV moy.</b>	<b>28</b>	<b>31</b>	<b>48</b>	<b>58</b>	<b>53</b>	<b>56</b>	<b>74</b>	<b>98</b>

d	Couché Horizontal				Couché Vertical			
	MAJUSCULE		minuscule		MAJUSCULE		minuscule	
	L'EPOQUE	D'OBJETS	l'époque	d'objets	L'EPOQUE	D'OBJETS	l'époque	d'objets
S1	37	51	68	71	43	92	91	114
S2	13	27	18	17	30	51	35	79
S3	24	23	20	53	36	32	70	54
S4	40	55	66	151	53	65	95	166
S5	37	32	33	59	36	43	109	92
S6	20	41	48	50	35	46	49	65
S7	28	19	38	125	63	73	63	125
S8	19	21	50	63	24	31	72	38
S9	17	15	25	46	53	29	56	60
S10	58	39	31	78	72	59	93	82
S11	43	49	56	82	43	60	44	80
S12	39	50	49	77	87	90	96	63
<b>IntraV moy.</b>	<b>31</b>	<b>35</b>	<b>42</b>	<b>73</b>	<b>48</b>	<b>56</b>	<b>73</b>	<b>85</b>

Tableau 8 : Intra-variabilité moyenne (u.a.) de chaque sujet (8 répétitions) et des 12 sujets (dernière ligne)  
a. en CR (■) et assis vertical, b. debout, c. à genoux, d. couché

	Horizontal		Vertical		
	MAJUSCULE	minuscule	MAJUSCULE	minuscule	
Assis	31	62	31	58	<b>45</b>
Debout	32	48	34	56	<b>42</b>
A genoux	30	53	55	86	<b>56</b>
Couché	33	58	52	79	<b>55</b>
	<b>43</b>		<b>56</b>		

Tableau 9 : Intra-variabilité moyenne (u.a.) des 12 sujets dans chaque condition (CR ■)  
 En gras : intra-variabilité moyenne / condition / casse (colonnes) et intra-variabilité moyenne / posture (lignes)

### 11.2.1.2. Effet de la posture

De manière globale, le changement de posture avait un impact significatif sur la variance ( $F_{(1,85, 20,4)} = 4.04, p < 0.04$ ) (diagramme 4).

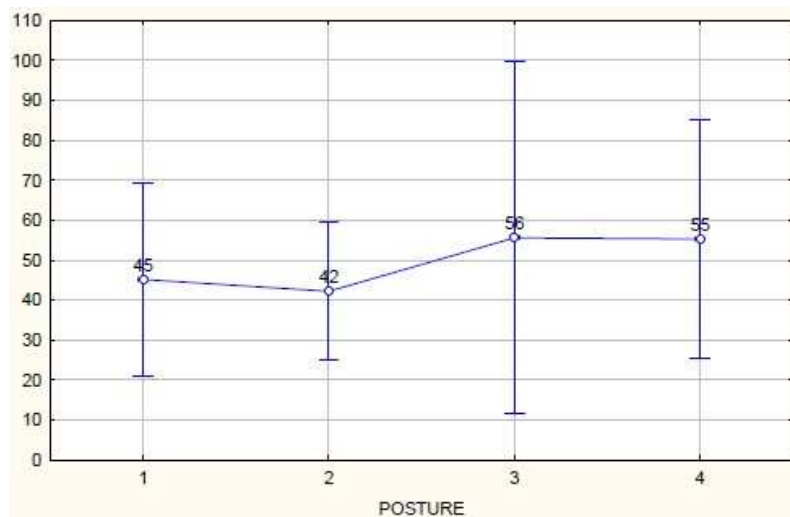


Diagramme 4 : Effet de la posture sur la variance (u.a.)  
 1 = assis, 2 = debout, 3 = à genoux, 4 = couché

Il a donc été nécessaire de déterminer quels groupes étaient statistiquement significativement différents deux à deux (Motulsky & Robert, 2002).

Dans notre cas, nous avons planifié les comparaisons d'intérêt, c'est-à-dire la position « assis » (position impliquée dans la condition de référence) *versus* les trois autres positions (tableaux 10). En effet, nous sommes partis du postulat qu'à priori, les comparaisons qui nous intéressaient étaient celles qui impliquaient la CR, puisque nous avons décidé de baser notre étude sur la comparaison des différentes CNC avec la condition classique. Nous avons

effectué un test de Student pour tester ces comparaisons. Ce premier test nous a donné une première appréciation de l'effet des CNC sur la variabilité d'écriture. Il a ensuite été affiné grâce à l'étude de l'effet de l'interaction posture x inclinaison.

Variable	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyenne des carrés	F	p
M1	0,007118	1	0,007118	0,647508	<b>0,438051</b>
Erreur	0,120914	11	0,010992		

Tableau 10a : Résultats du test de Student « effet posture » (comparaison assis vs. debout)

Variable	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyenne des carrés	F	p
M1	0,158930	1	0,158930	1,891887	<b>0,196352</b>
Erreur	0,924067	11	0,084006		

Tableau 10b : Résultats du test de Student « effet posture » (comparaison assis vs. à genoux)

Variable	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyenne des carrés	F	p
M1	0,426387	1	0,426387	11,96932	<b>0,005336</b>
Erreur	0,391857	11	0,035623		

Tableau 10c : Résultats du test de Student « effet posture » (comparaison assis vs. couché)

Ce test a montré que seule la condition « couché » modifiait la variance de manière significative ( $p = 0,0053$ ).

### 11.2.1.3. Effet de l'inclinaison

La variance moyenne atteinte lorsque le support était vertical ( $F_{(1, 11)} = 21.9$ ,  $p = 0.0007$ ) était significativement supérieure à celle atteinte lorsque le support était horizontal (diagramme 5).

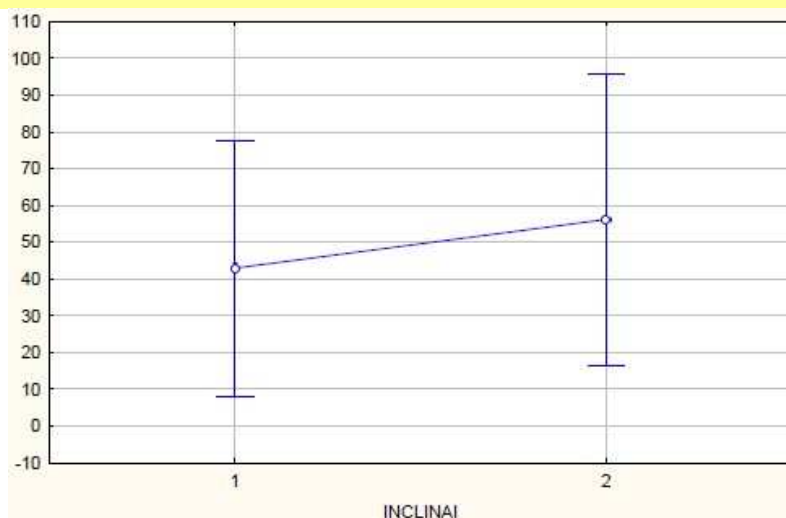


Diagramme 5 : Effet de l'inclinaison sur la variance (u.a.) ; 1 = horizontal, 2 = vertical

#### 11.2.1.4. Interaction posture / inclinaison

Nous avons constaté que l'interaction posture x inclinaison avait un impact significatif ( $F_{(1.97, 21.64)} = 5.6, p < 0.02$ ) sur la variabilité. Autrement dit, l'effet de l'inclinaison n'était pas identique dans toutes les positions corporelles (diagramme 6).

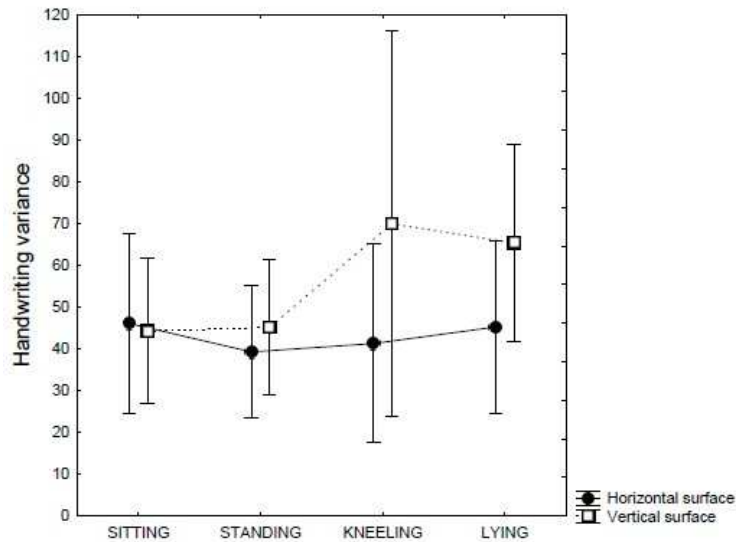


Diagramme 6 : Interaction de la posture et de l'inclinaison sur la variance (u.a.)  
sitting = assis, standing = debout, kneeling = à genoux, lying = couché (Sciacca<sup>b</sup> *et al.*, 2009)

Afin d'affiner ces résultats, nous avons effectué les tests post-hoc. Au total, 28 comparaisons étaient possibles mais seules 7 étaient pertinentes (partie Méthodes, tableau 3, cases ■). Nous avons effectué ces 7 comparaisons à l'aide d'un test de Student auquel nous avons appliqué une correction du seuil de risque par la méthode de Bonferroni ( $0,05 / 7 = 0,0071$ ).

A l'issue de ce test, seules les conditions à genoux / vertical et couché / vertical se sont avérées significativement différentes de la condition standard (assis / horizontal) (0.0011 et 0.00034 respectivement).

### 11.2.1.5. Effet de la casse

a	MAJUSCULE		b	Minuscule	
	Horizontal	Vertical		Horizontal	Vertical
Assis	31	31	Assis	62	58
Debout	32	34	Debout	48	56
A genoux	30	55	A genoux	53	86
Couché	33	52	Couché	58	79

Tableau 11 : Intra-variabilité moyenne (u.a.) des 12 sujets (a : majuscule, b : minuscule) (CR ■)

La variabilité moyenne des mots en minuscules était significativement plus importante que celle des mots en majuscules ( $F_{(1, 11)} = 100.5, p < 0.0001$ ) (tableau 11 & diagramme 7).

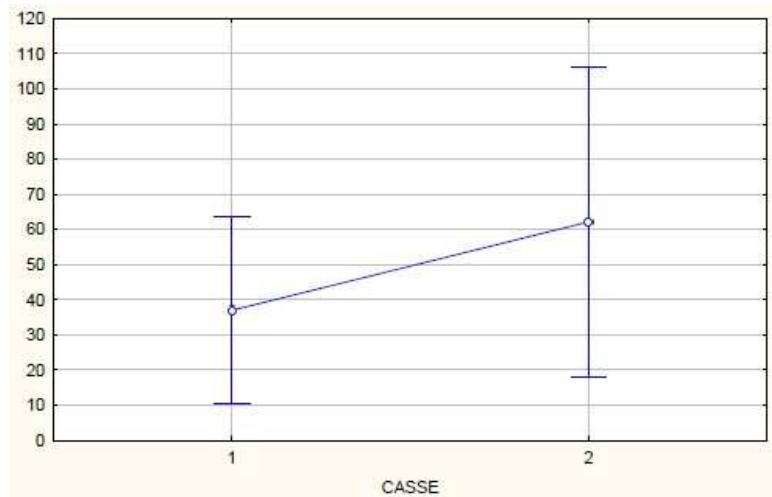


Diagramme 7 : Effet de la casse sur la variance (u.a.)  
1 = majuscule, 2 = minuscule

Cependant ce paramètre n'interagit ni avec la posture, ni avec l'inclinaison.

### 11.2.2. Inter-variabilité

De manière globale, l'inter-variabilité atteinte en CNC était du même ordre de grandeur que celle atteinte en CR.

De la même manière que pour l'intra-variabilité, les valeurs atteintes pour les mots en minuscules étaient très largement supérieures à celles relatives aux mots en majuscules, aussi bien en CNC qu'en CR (tableau 12).

a	MAJUSCULE		b	Minuscule	
	Horizontal	Vertical		Horizontal	Vertical
Assis	45	40	Assis	134	128
Debout	42	42	Debout	150	140
A genoux	44	49	A genoux	146	147
Couché	39	38	Couché	137	135

Tableau 12 : Inter-variabilité moyenne (u.a.) des 12 sujets (a : majuscule, b : minuscule) (CR ■)

### 11.2.3. Comparaison de l'intra et de l'inter-variabilités

#### 11.2.3.1. Condition de référence vs. condition non conventionnelle

L'inter-variabilité était supérieure à l'intra-variabilité, que ce soit en CR ou en CNC (tableau 13).

	Intra-variabilité	Inter-variabilité
Assis H	46	89
Assis V	44	84
Debout H	40	96
Debout V	45	91
A genoux H	41	95
A genoux V	70	98
Couché H	45	88
Couché V	66	86

Tableau 13 : Intra et inter-variabilités moyennes (u.a.) des 12 sujets dans chaque condition (CR ■)

#### 11.2.3.2. Majuscules / minuscules

Pour les mots en majuscules, l'intra et l'inter-variabilités étaient du même ordre de grandeur (37 / 42), alors que l'inter-variabilité était très nettement supérieure à l'intra-variabilité (139 / 62) pour les mots en minuscules avec un rapport Inter-variabilité / Intra-variabilité égal à 2.2.

## 12. Discussion des résultats

A notre connaissance, très peu d'études forensiques s'étaient spécifiquement intéressées à la variabilité d'écriture et, bien qu'il soit admis que l'écriture puisse varier pour un scripteur, l'étendue de ces fluctuations reste inconnue. Les études les plus poussées concernent les caractères idéographiques, très différents et plus complexes que les caractères latins (caractères chinois : Kao, 1983 <sup>a et b</sup> ; Li et al., 2007 ou japonais : Ueda & Matsuo, 2007). Et lorsqu'il s'agit de caractères latins, les études ne s'intéressent pas au mot, mais plutôt aux caractères (Eldridge et al., 1984 ; Wing et al., 1987) ou aux segments de lettres (Marquis et al., 2006, Marquis, 2007). Une étude récente a été consacrée à l'impact du changement de posture sur les dimensions des signatures (Equey et al., 2008), mais les changements potentiels pouvant être induits par des changements de conditions d'écriture, autres que les variations de taille, n'ont jamais été mesurés. C'est en particulier le cas pour les modifications de forme.

En neurosciences, ce sont majoritairement les aspects cinématiques du mouvement d'écriture qui ont été étudiés (et très peu la forme). De nombreux travaux mettent en évidence la présence d'invariants, considérés comme l'expression de programmes moteurs graphiques (Viviani & Terzuolo, 1980 ; Van Galen, 1991), ou le concept d'équivalence motrice – ie – le fait que le mouvement d'écriture soit indépendant de l'effecteur utilisé. Plusieurs travaux ont été dédiés à ces caractéristiques invariantes (Bernstein, 1967 ; Merton, 1972 ; Raibert, 1977 ; Wright, 1990 ; Meulenbroek *et al.*, 1996), mais aucun ne les a quantifiées de manière précise et objective.

Nous voulions quantifier la variabilité de la forme des mots écrits en condition classique et en conditions non conventionnelles. La première question qui s'est posée était combien d'exemplaires des mots sont nécessaires pour estimer correctement cette variabilité? Ce nombre est-il différent dans différentes conditions d'écriture?

### 12.1. Nombre de répétitions nécessaires pour estimer l'intra-variabilité

Le premier but de cette étude était de quantifier l'intra-variabilité en condition de référence et en condition non conventionnelle, puis de les comparer. Lorsque nous avons



débuté l'étude, nous ne connaissions pas le nombre d'échantillons nécessaires pour avoir une estimation correcte de l'intra-variabilité, même en condition standard. C'est la raison pour laquelle nous avons demandé aux sujets d'écrire les mêmes mots un grand nombre de fois (32). En outre, nous voulions savoir si la variabilité intra-individuelle était plus grande quand les conditions d'écriture étaient inhabituelles. En théorie, plus la variabilité (variance) est importante, plus le nombre de mesures requises pour l'évaluer est important. Cela découle de la formule même de la variance et c'est assez intuitif. Donc, si la variabilité est plus importante dans des conditions non conventionnelles, on doit s'attendre à ce que le nombre de spécimens d'écriture soit plus important. C'est pourquoi, afin d'augmenter les chances de voir apparaître des modifications dans l'écriture, nous avons choisi deux postures corporelles très différentes.

Il est nécessaire de rappeler que les résultats ont été obtenus en mesurant au moins 80 % de la variance (moyenne calculée à partir des 12 sujets faisant partie d'une population homogène aussi bien d'un point de vue culturel que de sa pratique régulière de l'écriture). En d'autres termes, le nombre de répétitions obtenu peut constituer un chiffre suffisant pour un sujet relativement stable (et dans ce cas, on mesurera 100% de sa variance), et au contraire ne pas permettre d'estimer complètement l'étendue de la variabilité chez un sujet plus variable (et dans ce cas, on sera en deçà de 100%, mais à plus de 80% de sa variance). Et de cette limitation, il découle que les écarts de variance observés pourraient aussi être le fait d'un sous échantillonnage au départ. Idéalement, il aurait fallu réaliser la deuxième expérience avec un plus grand nombre de répétitions (plus de 20), afin d'être sûr de se situer à un niveau de variance de 100%. Les raisons de ce choix ont été évoquées dans la description du protocole choisi pour la deuxième expérience.

Le premier résultat est que, en condition classique comme dans la condition non conventionnelle testée, 8 répétitions d'un même mot sont nécessaires pour obtenir une estimation correcte de l'intra-variabilité (nous rappelons que les valeurs obtenues pour les mots en majuscules étaient légèrement inférieures, en CR et en CNC). Ce résultat a deux intérêts pratiques : tout d'abord, il nous donne une idée du nombre de répétitions nécessaire pour les travaux futurs sur la variabilité d'écriture (à l'échelle du mot). Ensuite, il signifie que l'expert en écriture a besoin d'au moins 8 spécimens de comparaison contenant les mêmes mots ou, en extrapolant, les mêmes combinaisons de lettres pour couvrir correctement l'étendue de la variabilité d'une écriture. Cela signifie qu'en l'absence d'indication sur l'intra-

variabilité de l'écriture d'une personne, 8 spécimens du mot seront la plupart du temps suffisants. La limitation à un mot peut paraître très restrictive, mais en même temps, ces conditions limites doivent encourager les experts en présence de matériel de comparaison plus complet. En effet l'expert, même s'il dispose d'un matériel souvent quantitativement faible, a généralement plus d'un mot à sa disposition pour évaluer l'intra-variabilité du scripteur de comparaison.

L'étude présente l'intérêt majeur de donner une indication chiffrée de ce qui peut être une quantité suffisante de matériel de comparaison pour procéder à une analyse de qualité.

## **12.2. Conditions d'écriture et intra-variabilité**

Les résultats de la première expérience montrent que la variabilité intra-individuelle ne varie pas de manière significative, que le scripteur soit assis ou à genoux devant une surface horizontale (Sciacca *et al.*, 2007). C'est pour cette raison que le nombre de mesures nécessaires était le même dans les deux conditions. Ces résultats sont globalement confirmés par la deuxième expérience au cours de laquelle la variabilité n'est pas modifiée de manière significative dans cinq des sept conditions non conventionnelles. Donc, a priori la variance que nous avons mesurée dans ces conditions en utilisant 8 échantillons reflète bien la variabilité de l'écriture dans ces conditions. En revanche, ce n'est pas le cas pour les conditions à genoux / vertical et couché / vertical qui ont induit une augmentation significative de la variance. La combinaison de contraintes imposées par ces conditions a probablement créé une condition particulièrement inconfortable d'écriture, ce qui a d'ailleurs été rapporté par la majorité des sujets après l'expérience. En outre, la variance que nous avons mesurée dans ces deux conditions a probablement été sous-estimée avec 8 mesures. Lors de la première expérience, nous avons choisi une posture qui nous paraissait très atypique pour la comparer avec la posture classique; l'idée était ainsi de trouver une condition 'extrême' pour avoir une limite supérieure de la variabilité. En fait, cette condition extrême l'était moins que certaines utilisées dans la seconde expérience et davantage d'échantillons auraient dû être utilisés pour mieux estimer la variabilité dans ces conditions. En pratique, il vaut mieux surdimensionner le nombre de mesures qu'on utilise, avec l'inconvénient que cela allonge et complique le recueil de données.

De manière générale, l'ensemble des résultats tend à montrer que, sur l'échantillon de conditions testées, la variabilité d'écriture n'est pas dépendante de la position du scripteur ou du support, lorsque celle-ci est 'confortable'. Miyahara *et al.* (2008), testent l'effet de l'instabilité posturale sur une action motrice fine de dessin. L'auteur cite des références où l'influence de l'instabilité posturale sur une action motrice fine avait déjà été testée et où elle affectait la performance motrice. Mais il s'agissait d'instabilité posturale due à une pathologie : tremblement postural (Birnbaum *et al.*, 1999) / désordre dans la coordination motrice (Johnston *et al.*, 2002). Dans leur étude, les auteurs font réaliser des dessins ou des lignes à des sujets plus ou moins stables au niveau de leur posture. Ils constatent que l'instabilité posturale entraîne de plus nombreuses erreurs au niveau de la tâche demandée qu'une posture stable, et généralisent ce résultat à d'autres tâches motrices fines, telles que l'écriture. Ce résultat peut être rapproché de nos résultats en ce sens où les conditions dans lesquelles nous avons constaté une différence significative de variabilité ont pu représenter des conditions 'critiques' de stabilité pour les scripteurs. D'un point de vue pratique, cela signifie que, dans de telles CNC extrêmes, le risque de fausse interprétation de l'expert augmente. Et d'un point de vue théorique, il s'agirait de savoir si une condition, lorsqu'elle est très inhabituelle pour le scripteur (sachant que cette notion est relative et dépend des scripteurs), pourrait être susceptible de modifier l'expression du programme moteur à l'origine du mouvement d'écriture. Ceci expliquerait les déformations graphiques observées, la diminution du rapport inter / intra-variabilités et par conséquent la perte de personnalisation du tracé. Et dans le même ordre d'idée, ces contraintes agiraient-elles de manière homogène sur tous les sujets, en partant du principe que tous sont constitués de la même façon d'un point de vue biomécanique ?

Quant au résultat relatif aux valeurs d'intra-variabilité en CNC (les plus réalistes, plus proches de celles que les experts en écriture sont à priori susceptibles de rencontrer) du même ordre de grandeur que celles obtenues en CR, il tend à valider l'approche classique consistant à comparer des tracés acquis dans certaines conditions d'écriture avec des spécimens d'écriture acquis dans d'autres conditions, voire dans des conditions inconnues. Ces résultats expérimentaux autorisent à travailler, dans le cas de comparaisons 'multi-conditions', sur des échantillons de même taille que dans le cas de comparaisons 'uni-condition'. Autrement dit, l'expert, s'il a affaire à des écrits de comparaison rédigés dans une condition différente de celle identifiée en question, peut utiliser une même quantité de matériel de comparaison

(même si de nature différente) que s'il avait eu affaire à deux conditions de rédaction identiques, la représentation de la variabilité étant la même.

Rappelons que cette étude, appuyée sur les valeurs de variance et non pas les valeurs de moyennes, ne donne pas d'indication quant aux modifications de forme qui se produisent. L'outil de mesure et de traitement permet en effet de mesurer des écarts de variabilité basés sur la forme de l'écriture, mais en aucun cas il ne nous renseigne sur les zones où se produisent ces modifications. Par conséquent, des variances identiques peuvent être observées autour de moyennes différentes et vice versa. Notre méthodologie permet d'évaluer l'étendue de la variabilité mais pas sa 'position', c'est-à-dire que nous ne sommes pas capables d'observer dans quelles mesures deux intra-variabilités se chevauchent d'un point de vue qualitatif. Concrètement, cela signifie qu'il est possible que deux valeurs de variances identiques correspondent à deux valeurs moyennes différentes. Des méthodes permettant de pallier ce problème peuvent être envisagées (cf. Discussion générale).

Par ailleurs, et indépendamment de la posture d'écriture, nous avons constaté que l'intra-variabilité obtenue avec les mots en minuscules était supérieure à celle obtenue avec les mots en majuscules. Ce résultat implique que l'expert devrait, lorsqu'il travaille sur des écrits en minuscules, théoriquement demander un nombre de spécimens de comparaison supérieur à celui qu'il demanderait dans le cas d'écrits en majuscules. Ceci afin de couvrir au mieux l'étendue de la variabilité du scripteur.

Une limite importante de notre étude a été que, bien que nous ayons imposé des postures et une orientation de support non conventionnelles, nous ayons gardé un stylo, un papier et une taille d'écriture conventionnels. En faisant cela, il est possible que nous ayons conservé une constance dans les mouvements produits (par le poignet, les doigts...), ou dans la distance yeux / trace écrite. Finalement, nous avons changé la posture générale du corps sans modifier grandement la relation du corps à la trace écrite. On pourrait penser par exemple, qu'écrire debout sur un support vertical puisse naturellement entraîner une taille d'écriture plus importante (et éventuellement une modification de la forme ?). Dans le cas où cette hypothèse serait vérifiée, nous aurions considérablement réduit les contraintes appliquées sur le mouvement, de par la nature même de nos conditions expérimentales, et très certainement la variabilité d'écriture.

Par ailleurs, nous avons choisi d'utiliser la tablette graphique comme matériel d'étude de la trace écrite. Il pourrait par exemple être intéressant d'étudier l'écriture debout sur un tableau interactif, ou encore de numériser une mention réalisée à l'aide d'une bombe aérosol par le biais d'une caméra. L'utilisation d'une bombe sollicite d'autres segments corporels, met en jeu d'autres articulations (appuis / lâchers du bouton pulvérisateur) et implique des techniques de modification du calibrage du trait différentes (modularité de la pression ou de la distance au support) de celles employées lors d'un geste classique d'écriture.

Ce sont autant de questions qui mériteraient d'être abordées afin d'être le plus exhaustif possible sur le sujet. Dans un souci d'observation d'une seule variable à la fois et de la mise en place d'un protocole expérimental qui ne soit pas trop lourd, et réalisable dans le temps qui nous était imparti, cet ensemble de choix s'est imposé à nous.

### **12.3. Relations entre l'intra et l'inter-variabilités**

La variabilité inter-individuelle est également cruciale dans le processus d'identification d'écriture. En science forensique, l'identification d'un scripteur repose sur le concept d'individualité, c'est-à-dire sur le fait que l'écriture de chaque individu comporte une combinaison unique de caractéristiques. Chacune des caractéristiques générales prise isolément est commune à un très grand nombre d'individus, mais plus on associe de caractéristiques, plus le nombre de personnes qui possèdent leur faisceau devient restreint (Buquet, 1991).

La première question que l'on peut se poser est, à l'instar de celle que nous nous sommes posée pour l'intra-variabilité, quel est le nombre de sujets nécessaire pour avoir une estimation correcte de la variabilité inter-individuelle. Combien de scripteurs faut-il utiliser pour avoir un échantillon représentatif de la diversité des écritures? Cette valeur est difficile à estimer à priori. Pour la connaître, on peut procéder de deux façons. On pourrait faire comme nous l'avons fait dans la première expérience pour l'intra-variabilité, c'est-à-dire prendre un grand nombre de sujets et regarder à partir de quel effectif l'inter-variabilité ne change plus. Cela est coûteux en temps et, de plus, le choix initial des scripteurs amènerait sûrement à un échantillon trop large (afin de prendre en compte un maximum de paramètres tels que l'âge, le sexe, le niveau culturel...). Une meilleure solution serait de faire des choix à priori et de poursuivre par des tests en aveugle. Il s'agirait par exemple de former des échantillons de

population homogène, définis en fonction d'un critère (âge, abécédaire employé lors de l'apprentissage...). Le but serait de savoir si l'on peut facilement différencier deux scripteurs au sein d'une première population, puis de réaliser le test sur une autre population homogène, et de voir si en 'mélangeant' les populations, puis en agissant en aveugle, on serait capable de prédire l'appartenance à l'une ou l'autre des populations. Quoi qu'il en soit, il est fort probable que l'estimation de la variabilité inter-individuelle avec 12 sujets soit très en deçà de la valeur théorique.

Même si on doit considérer avec méfiance la valeur absolue de la variabilité inter-individuelle que nous avons mesurée et les comparaisons entre intra- et inter-variabilités, il est cependant intéressant de savoir ce qui fait varier l'inter-variabilité. Dans ce cadre, il est important de connaître les facteurs qui peuvent agir sur l'inter-variabilité. Nos résultats, même préliminaires, montrent qu'elle est globalement constante quelles que soient les conditions, et généralement plus élevée que la variabilité intra-individuelle. Si l'on regarde de manière plus précise, il est intéressant de s'apercevoir que le rapport de la valeur d'inter-variabilité sur la valeur d'intra-variabilité varie avec la casse. L'inter-variabilité est en effet 1,5 fois plus grande que l'intra-variabilité dans le cas des mots écrits en majuscules, alors que ce rapport est de 2,2 en lettres minuscules. En d'autres termes, les faibles valeurs d'intra et d'inter-variabilités des majuscules confèrent à ce type de lettres un caractère plus 'normalisé', ce qui ne facilite pas le travail d'identification de l'expert. A l'inverse, la faible valeur d'intra-variabilité et la grande valeur d'inter-variabilité retrouvées pour les mots en minuscules donnent à ces lettres un statut plus 'personnalisé', et donc un grand pouvoir discriminant dans le processus d'identification d'écriture. C'est le cas pour l'ensemble des conditions, quelle que soit la posture ou l'inclinaison de la tablette, excepté pour les conditions à genoux et couché / vertical, du fait des hautes valeurs d'intra-variabilité observées.

Par ailleurs, il est intéressant de relever que la variabilité inter-individuelle peut légèrement augmenter en CNC. Alors que ce n'est pas toujours le cas pour les mots en majuscules, c'est majoritairement le cas pour les mots en minuscules, comme si l'impact de la condition était plus fort sur ces lettres, leur conférant un caractère plus 'instable'. Cependant, nous pouvons difficilement conclure sur cette différence étant donné qu'il n'a pas été possible d'entreprendre une analyse statistique classique de l' 'effet casse' sur l'inter-variabilité. Dans l'hypothèse où l'augmentation de la valeur d'inter-variabilité serait confirmée par des travaux futurs, cela impliquerait un processus de reconnaissance facilité en CNC. Rappelons de

nouveau que les résultats d'inter-variabilité que nous avons obtenus indiquent une tendance, qui nécessiterait d'être réévaluée avec davantage de sujets ou une population francophone différente. Enfin, il est intéressant de noter qu'en liaison avec la différence de 'comportement' de ces deux types de lettres, les travaux de Patterson et Wing en 1989 supposaient l'existence de deux répertoires distincts de stockage des formes majuscules et minuscules, sans pour autant évoquer un quelconque positionnement relatif de l'un par rapport à l'autre au niveau du programme moteur.

#### **12.4. Prise en compte de la trajectoire globale**

La méthode que nous avons utilisée pour le traitement de la trace inclut les déplacements en l'air dans la forme globale du mot. Bien que limités, ces déplacements ont probablement contribué à augmenter la variabilité d'écriture telle que nous l'avons mesurée. Il n'y a que très peu de données sur ce que l'on appelle, de façon très inappropriée les 'pauses' entre les lettres, car ces instants de suspens entre les lettres échappaient jusqu'à maintenant à toute observation. Nous sommes en mesure aujourd'hui avec les tablettes graphiques, de savoir ce qui se passe pendant ces 'pauses', et les premiers résultats montrent que, paradoxalement, elles sont en fait constituées d'un grand nombre de mouvements. Les enfants dysgraphiques par exemple, dont l'écriture est plus variable que celle des enfants normoscripteurs (Velay et al., 2009), sont ceux chez qui les temps de 'pause' et les déplacements en l'air sont les plus importants (Rosenblum, 2003; Velay et al., en préparation). Tous les tracés que nous avons analysés, depuis leur acquisition jusqu'à leur interpolation, en passant par leur segmentation, ont été pris en compte dans leur globalité, c'est-à-dire aussi bien dans leur composante 'papier' que dans leur composante 'aérienne'. Le geste scriptural a donc été considéré dans son ensemble. La question qui se pose est donc la suivante : les résultats seraient-ils transposables à l'une ou à l'autre des composantes prise isolément ? Il pourrait être intéressant de séparer la trace écrite de la trajectoire réalisée au-dessus de la feuille de papier, afin de savoir si les deux types de mouvements varient dans les mêmes proportions. En d'autres termes, est-ce que les contraintes appliquées par le système nerveux central sur la trace écrite sont différentes de celles appliquées sur les déplacements entre les traits ?

Au vu de la théorie expliquant le mouvement d'écriture en tant qu'automatisme, du moins dans sa partie exécutrice (non sémantique, linguistique etc.), il serait par exemple

légitime de penser que les différentes composantes du mouvement obéissent aux mêmes règles de production. Ou à l'inverse, on pourrait supposer que la trace aérienne soit par exemple une 'zone' où le programme moteur réajuste le mouvement, afin que la composante 'papier' qui est, rappelons-le, l'objectif essentiel dans l'acte d'écriture, soit stable, lisible, esthétique etc. Pophal & Dunker (1960, cités par Huber 1999), grâce à un procédé photographique permettant de recréer un mouvement au ralenti, orientent leurs travaux sur la démonstration du caractère hautement individuel des mouvements aériens de la main lors du processus d'écriture. En résumé, la question de savoir si la trajectoire en l'air pourrait ou pas être le siège de corrections destinées à affiner le résultat graphique reste posée. Un des moyens de tester ceci serait d'observer les deux types de trajectoires, et de voir comment chacune réagirait aux perturbations telles que celles utilisées dans notre travail.

Au plan forensique, ces données pourraient avoir des implications différentes. En effet, l'expert en écriture ne dispose que de la trace papier pour son travail d'analyse. Dans le cas où les conditions non conventionnelles ayant entraîné une augmentation de la variabilité n'auraient en fait affecté que la composante aérienne, cela signifierait que cette dernière jouerait le rôle d'amortisseur des chocs. Et du coup, cela n'impliquerait aucune répercussion sur le matériel d'étude dont dispose l'expert. En revanche, si la trace écrite était modifiée, l'expert serait contraint de prendre des dispositions pour adapter son matériel de comparaison (cf. *infra*).



## 13. Discussion générale

### 13.1. Lien avec les notions théoriques

#### 13.1.1. Equivalence motrice

Il est intéressant de rappeler certaines notions évoquées dans la partie théorique et dont nous avons pu mesurer toute la portée au vu de nos résultats. Tout d'abord, nous évoquons le fait que, selon Viviani (1994), les déterminants métriques et temporels du geste, ainsi que les groupes musculaires impliqués dans son exécution, n'étaient pas spécifiés explicitement par le programme moteur. 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. Rijntjes (1999) quant à lui, montre que l'exécution d'un mouvement normalement effectué par la main, en l'occurrence l'écriture, implique les aires cérébrales 'de la main' lorsqu'il est réalisé par un autre membre (orteil). De la même façon, Wing (2000) précise les résultats de Rijntjes et attire notre attention sur le rôle du cortex pariétal postérieur dans le phénomène d'équivalence motrice. Selon l'auteur, les paramètres codant pour un mouvement acquis (comme l'écriture) sont stockés dans des aires cérébrales correspondant au membre effectuant habituellement le mouvement.

L'ensemble de ces observations signifie que, quel que soit l'effecteur activé, et par extension les groupes musculaires impliqués (ce qui est notre cas), ce sont toujours les mêmes aires cérébrales qui sont sollicitées pour le mouvement d'écriture, ce qui va dans le sens de l'hypothèse de l'équivalence motrice, et explique que nous ayons globalement obtenu une stabilité de la variabilité scripturale dans la plupart des conditions.

Le principe d'équivalence motrice, s'il est vérifié au niveau de la forme, est sensé être également vérifié dans le cas de l'utilisation d'un instrument tel qu'une bombe aérosol. En effet, contrairement aux instruments utilisés jusqu'alors dans la littérature forensique pour montrer l'absence d'impact de l'instrument sur le mode de formation, la bombe ne sollicite pas de contact avec le support. Cela pourrait-il potentiellement avoir un impact sur le mode de liaison des lettres ? Il serait pertinent de tester si cet élément serait susceptible de modifier

suffisamment la gestuelle du scripteur et entraîner une intra-variabilité significativement différente. En effet, si l'on prend par exemple les levers de plume entre les mots ou les lettres, ils sont, dans le cas d'écrits à la bombe, matérialisés par des lâchés, ce qui diffère du point de vue moteur et de la coordination. Ces données permettraient de savoir si l'expert, lorsqu'il est confronté à ce type de mentions, devrait ou non faire en sorte d'obtenir des écrits de comparaison réalisés avec ce type d'instrument. En effet, ce genre de condition non conventionnelle implique par exemple une réévaluation complète des circonstances entourant la réalisation d'une dictée de comparaison (lieu et support adaptés).

### **13.1.2. Niveau de stockage de l'information**

Sur le plan théorique, nous avons vu que la réflexion au sujet du mouvement d'écriture reposait sur le concept de programme moteur, qui implique l'existence d'une représentation motrice des mouvements graphiques. L'essentiel des travaux dans le domaine de la graphomotricité a en fait pour but de déterminer la nature de l'information codée dans ces représentations. Pour cela, les études portent sur l'analyse des invariants du mouvement. Le raisonnement est le suivant : les paramètres du mouvement qui sont les moins perturbés par des variations du contexte d'exécution sont probablement ceux qui sont stockés au plus haut niveau de la structure du programme moteur. En revanche, les paramètres les plus variables peuvent être considérés comme la manifestation de contraintes plus périphériques, liées à l'exécution (Longcamp, 2003). Dans notre cas, on pourrait supposer que les conditions ayant eu un impact significatif sur la variabilité d'écriture étaient des conditions où le scripteur faisait appel à des paramètres situés à un niveau inférieur du programme moteur. D'où une moins grande stabilité de leur écriture dans ces cas-là. Les programmes moteurs mémorisés (engrammés) au cours du temps sont adaptés pour des conditions conventionnelles d'écriture. Quand ce n'est pas le cas, c'est le même programme moteur qui est utilisé mais, les conditions d'exécution étant différentes, l'expression de ce programme est modifiée. Si cette modification était toujours la même, l'écriture serait déformée de façon constante. En fait, le scripteur tente probablement de corriger en temps réel la modification de son écriture et cela se traduit par une trace qui tend à se rapprocher de la trace habituelle, mais avec des variations de production.

Pour l'expert en écriture, il s'agit donc d'évaluer correctement la condition de rédaction de l'écrit de question. Par évaluer, on entend 'qualifier', c'est-à-dire que l'expert devrait être

en mesure de savoir, ou au minimum de se renseigner pour savoir si la ‘condition de question’ est susceptible d’être une condition familière au scripteur potentiel. Ceci afin de qualifier le caractère ‘anormal’ des éléments discriminants qu’il observe : sont-ils ou pas des déformations de l’écriture habituelle de l’individu ? En effet, une différence fondamentale et une variation naturelle ont une chose en commun : jusqu’à ce que des éléments supplémentaires viennent s’ajouter à l’analyse d’écriture, chacune d’entre elles demeure une différence inexpliquée (Mac Alexander, 1994), ce qui fait de la notion de CNC une notion très relative. Et disposer de ce type de renseignements permettrait d’accorder des degrés d’identification différents selon les contextes.

### **13.1.3. Apprentissage**

Dans notre étude, la mise en situation non conventionnelle a placé le scripteur en condition de réalisation d’un mouvement nouveau, en ce sens où les paramètres habituels ont été modifiés. On peut supposer que les sujets n’étaient pas suffisamment ‘entraînés’ à écrire dans ces conditions et que, comme c’est le cas dans tout mouvement, l’apprentissage aurait amené à une plus grande dextérité. La notion d’apprentissage est donc au cœur du phénomène d’automatisation. Il est donc nécessaire de comprendre les mécanismes de l’apprentissage, afin de mieux comprendre ce qui a pu se passer dans les conditions non conventionnelles ayant eu un impact significatif sur la variabilité d’écriture. En effet, les sujets auraient-ils atteint de meilleures ‘performances’, c’est-à-dire manifesté une plus grande stabilité dans leurs écrits s’ils avaient été ‘habitués’ à ces conditions particulièrement inconfortables ? Des aspects tels que la fluidité, la précision, ou la vitesse d’exécution auraient-ils été améliorés ?

L’apprentissage permet l’acquisition de programmes moteurs plus stables, plus précis, plus adaptables et mieux coordonnés. A l’origine, le programme moteur ne contrôle qu’un court enchaînement d’actions. Grâce à la pratique, le programme devient plus élaboré et susceptible de contrôler des enchaînements d’actions plus complexes. Ces programmes moteurs présentent l’avantage de diminuer le coût attentionnel du mouvement. En effet, les processus conscients et cognitifs interviennent très peu pour la réalisation d’un mouvement automatisé.

Lorsque les programmes moteurs ne sont pas encore constitués et stabilisés, les individus ne maîtrisent pas le déroulement de leurs mouvements. L’acquisition d’un

programme moteur exige une répétition importante et n'est pas un phénomène continu et linéaire. Lorsque le geste se stabilise, du fait de la mémorisation et de la fixation du programme moteur, il est à même de se diversifier et de s'adapter aux modifications de l'environnement. Les individus prennent en compte de nouveaux indices et les identifient de manière plus fine. L'automatisation d'un mouvement libère l'attention de l'individu qui peut ainsi se porter vers d'autres aspects de la tâche à réaliser. L'automatisation accroît l'adaptabilité, et les mouvements peuvent se réaliser dans des conditions variées avec une faible demande attentionnelle (figure 48). Ainsi, Castiello & Stelmach (1993) font le lien entre le processus d'apprentissage et le phénomène d'équivalence motrice. En effet, selon eux, seule la pratique permet d'atteindre un état d'indépendance vis-à-vis de l'effecteur.

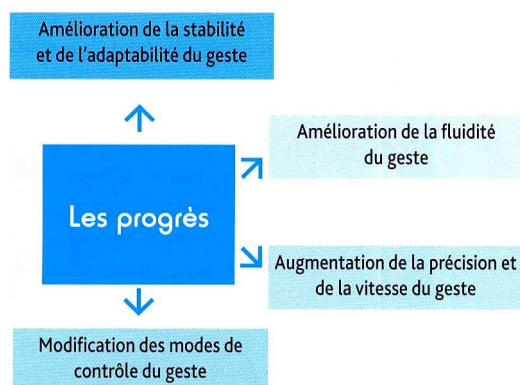


Figure 48 : Les progrès dus à l'apprentissage moteur (Sève, 2009)

Sur un plan pratique, ces connaissances peuvent aider l'expert à interpréter le mode de formation d'un ou plusieurs graphes en le replaçant dans son contexte. Disposer des tracés 'antérieurs' à un tracé donné, permet de comprendre le cheminement qui a conduit à un mode de formation donné. L'expert est alors à même d'évaluer correctement le résultat d'un geste scriptural qui s'est amélioré au cours du temps et des répétitions.

Ces données théoriques, qu'elles soient de type neuroscientifique, avec la théorie du programme moteur, ou issues des expériences de la psychologie expérimentale, sont incontestablement un apport pour la discipline qui est la nôtre, à savoir l'expertise forensique en écriture. Elles fournissent des éléments de compréhension essentiels à l'interprétation du mouvement d'écriture et à l'analyse de la trace écrite qui en découle. Et dans le cadre précis de ce travail, l'ensemble de ces connaissances nous a procuré des pistes permettant

d'expliquer l'absence de modification de la variabilité dans certaines conditions ou au contraire son augmentation dans d'autres plus 'extrêmes'.

## 13.2. Perspectives

### 13.2.1. Mesure de distances

La variabilité de l'écriture, considérée seule, sans s'intéresser au tracé moyen produit, ne donne qu'une information partielle sur les changements qui interviennent. En effet, il est théoriquement envisageable qu'une posture atypique induise des déformations systématiques de la trace écrite sans augmenter la variabilité autour de cette trace. Si cela s'est produit, notre façon d'analyser l'écriture en se limitant à la variance n'a pas permis de le détecter. Comme nous l'avons souligné précédemment, il serait intéressant de comparer les traces moyennes produites dans les différentes conditions. Une façon de le tester consiste à mesurer la 'distance' qui existe entre les traces moyennes d'un scripteur donné dans différentes conditions. Utiliser un algorithme reposant sur le DTW (Dynamic Time Warping) permettrait de mesurer la distance entre deux séquences pouvant varier par leur durée ou leur vitesse. De la même façon, le DSW (Dynamic Space Warping) est une méthode qui découle du DTW et qui est invariante aux déformations non linéaires de l'image. Le principe de ces méthodes est de 'tordre' des séquences dans le temps ou dans l'espace, afin de mesurer la distance qui les sépare, et donc leur similarité, indépendamment de certaines variations non linéaires (Ananthakrishnan *et al.*, 2007 ; Chang & Shin, 2007). L'algorithme calcule un 'coût' correspondant à la superposition entre une trace donnée et la trace de référence. La juxtaposition tient compte des déformations temporelles : l'algorithme recherche les meilleures correspondances spatiales même si elles ne correspondent pas aux mêmes moments. Le 'coût' calculé pour l'écriture est la distance euclidienne entre deux points correspondants. Cette distance moyenne pour l'ensemble de la trace donne un score de correspondance. Plus la distance est faible, plus la correspondance est bonne.

Plus simplement, on pourrait envisager de comparer des tracés ayant une intra-variabilité proche, à l'aide d'outils 'visuels', c'est-à-dire en observant si les tracés moyens sont effectivement proches. Cette solution, même si elle reste approximative et non quantitative, pourrait apporter un élément d'information sur la proximité formelle des tracés.

### **13.2.2. Possibilités d'exploitation des données fournies par la tablette**

La variabilité spatiale de l'écriture est le résultat d'une variabilité dynamique (Longstaff & Heath, 1997). La connaissance des caractéristiques dynamiques peut être très utile pour interpréter les phénomènes spatiaux. Les enregistrements dont nous disposons sont à même de nous fournir des informations de ce type, en plus de celles de type spatial déjà exploitées. En effet, il est possible d'extraire des données de vitesse, de pression ou de temps (de réaction, de pause...), qu'il serait ensuite intéressant d'exploiter afin de compléter nos résultats. Nous ne nous sommes intéressés qu'à la variabilité spatiale car c'est à celle-là que sont confrontés les experts.

Par ailleurs, ce que permet la tablette à l'échelle du mot est également possible à l'échelle de la lettre. Ceci conduirait à la segmentation d'une ou plusieurs lettres, qui pourraient par exemple être sélectionnées en fonction de leur fréquence d'apparition dans la langue française ou du nombre de levées de plume qu'elles comportent. De la même façon, nous n'avons travaillé que sur quatre mots. Les changements de conditions agiraient-ils de la même manière sur d'autres mots ? Et du coup, est-il aussi pertinent de calculer la variance sur un mot ou sur un autre ?

La prise en compte de l'ensemble de ces paramètres apporterait une vision complémentaire de celle que nous avons choisie d'adopter, aussi bien du point de vue de l'angle d'observation que nous choisirions que de l'échelle à laquelle nous nous placerions.

### **13.2.3. Complémentarité des approches**

Il aurait été intéressant de compléter l'angle d'étude envisagé dans ce travail par une étude graphistique classique de l'écriture. Cette méthode, actuellement employée par la majorité des experts en écriture, repose exclusivement sur une méthode optique. L'observation du tracé (à l'œil nu / sous fort grossissement / sous différents rayonnements) comprend trois étapes successives que sont l'analyse, la comparaison et l'évaluation (Huber, 1987). Lors de l'étape d'analyse, l'expert examine d'abord le document sous une perspective globale, puis il collecte les caractéristiques discriminantes du tracé, pour finalement se concentrer sur les lettres et les combinaisons de lettres (Kam *et al*, 1994). Ensuite, les éléments discriminants définis d'une part sont comparés à des éléments discriminants de

même type définis d'autre part. Enfin, lors de l'étape d'évaluation, il s'agit de déterminer si les caractéristiques de l'écriture de question entrent dans la fourchette d'intra-variabilité de l'écriture de comparaison et à émettre une hypothèse découlant de cette observation (Hilton, 1983).

L'objectif serait de voir si les différentes étendues de variabilité définies par la méthode classique, en CR et en CNC, correspondraient (ou pas) à celles mises en évidence par l'approche numérique envisagée dans ce travail de recherche. Et par extension, il pourrait se révéler intéressant de procéder à l'inverse, et d'extraire le même type de données à partir de traces papier que l'on numériserait avec un nombre déterminé de points. L'apport pour les experts serait non plus théorique mais pratique.

#### **13.2.4. Fréquence d'apparition des lettres et combinaisons de lettres**

Dans ce travail, la sélection des mots ayant servi à l'étude a été réalisée tel que nous l'avons décrit dans la partie 'Matériels', à savoir à partir d'une phrase-test initiale comportant toutes les lettres de l'alphabet. Il aurait été intéressant de mener une étude préalable destinée à évaluer par exemple la fréquence d'apparition de ces mots dans la langue française. Ou bien encore, il aurait pu être possible de calculer la fréquence d'apparition des bigrammes (2 lettres) ou des trigrammes qui les constituent ('ép' pour époque, 'bj' pour objets, etc.). Des travaux tels que ceux de New *et al.* (2007) ont ainsi utilisé les sous-titres de films pour estimer la fréquence d'apparition des mots dans les langues française et anglaise. Il existe également des sites tels que <http://www.lexique.org> où sont fournies la fréquence des lettres, des phonèmes ou des mots. Disposer de ce type d'informations aurait par ailleurs pu avoir un intérêt en amont du choix des mots. Quoiqu'il en soit, connaître ces données apporterait un plus à l'interprétation de nos résultats. Cela permettrait par exemple de déterminer si les variations observées sont uniquement la conséquence d'un changement de conditions ou au contraire si elles sont le résultat d'un emploi moins usuel des combinaisons littérales, et donc le fait d'une moins bonne maîtrise.

## 14. Conclusion

La particularité de ce travail réside d'abord dans le fait qu'il s'intéresse à la génération d'écriture en conditions non conventionnelles. Par ailleurs, et contrairement aux plus récentes études forensiques traitant de variabilité d'écriture, cette étude se place à l'échelle du mot et s'affranchit volontairement des variables temporelle ou textuelle. L'autre point fort de ce travail est que, même si ce n'est qu'un ordre de grandeur (puisque ce chiffre peut varier d'un scripteur à un autre, selon sa variabilité), pour la première fois, l'expert dispose de données chiffrées permettant d'approximer l'intra-variabilité du matériel de comparaison. Dans notre protocole expérimental, le matériel d'étude se limite à un mot, ce qui laisse entrevoir de belles perspectives pour des analyses comparatives reposant sur un matériel plus conséquent.

Dès le départ, cette démarche avait pour but de comprendre les limites qualitatives (condition de référence / conditions non conventionnelles) et quantitatives (nombre minimum de spécimens nécessaire à l'estimation de l'intra-variabilité) du processus de comparaison d'écriture. En effet, la question de l'écriture étant par essence tellement vaste, il s'agissait d'explorer quelques pistes offertes par cette spécialité, et de fournir une proposition qui orienterait l'expert vers telle ou telle direction. Rapidement, la difficulté de la tâche nous a obligés à faire des choix, afin d'utiliser de manière optimale le temps qui nous était imparti. Cela a permis de mettre en exergue des résultats non dénués d'intérêt, aussi bien d'un point de vue théorique que d'un point de vue pratique. Concrètement, nous pouvons par exemple imaginer que l'utilisation de l'outil tablette à des fins expérimentales puisse évoluer vers une exploitation de routine, qui permettrait à l'expert de réaliser les premières estimations de l'intra-variabilité d'un scripteur et de lui attribuer un 'niveau' de variabilité ('très variable' / 'variable' / 'peu variable').

Ce travail a permis de montrer une certaine constance de l'écriture, dans son aspect formel, quelles que soient les conditions de rédaction, pour autant qu'elles ne soient pas trop contraignantes. Il a également fourni des données préliminaires concernant le rapport de variabilités (intra- et inter-individuelles) dans ces conditions, apportant ainsi un argument en faveur de la théorie de l'individualité de l'écriture. Ce résultat a été complété par un 'comportement' différent des lettres majuscules et minuscules, qui présentent des différences notables de valeurs de variabilité. Alors que les premières ont un caractère 'normalisé', les



secondes montrent des valeurs de variabilité plus importantes, adoptant ainsi un aspect plus ‘personnalisé’, leur conférant par voie de conséquence un pouvoir identificateur plus élevé.

Enfin, dans ce travail, une problématique forensique a été abordée à l'aide de notions des neurosciences, et en recourant à des méthodes classiquement employées en psychologie expérimentale. Dès les prémices de cette recherche et de notre investissement dans cette entreprise, le choix d'une telle approche nous a confrontés aux difficultés habituelles des interfaces entre différentes disciplines telles que les difficultés de langage, d'appréhension des problèmes, ou tout simplement de méthodes. Et c'est ce caractère atypique de la démarche qui l'a rendue d'autant plus enrichissante, aussi bien de par les questionnements qu'elle a suscités, que par la diversité des enseignements que nous en avons tiré.

## Bibliographie

**Alamargot D, Lambert E, Chanquoy L.** La production écrite et ses relations avec la mémoire. *Approche Neuropsychologique des Acquisitions de l'Enfant* 2005; 17 : 41-46.

**Albaret JM, Santamaria M.** Utilisation des digitaliseurs dans l'étude des caractéristiques motrices de l'écriture. *Evolutions Psychomotrices* 1996; 8(33): 113-119.

**Alegria J, Mousty P.** On the development of lexical and non-lexical spelling procedures of french speaking normal and disabled children. In: *Handbook of spelling: theory, process and intervention*. Chichester: John Wiley and Sons, 1994.

**Allal L, Chanquoy L, Largy P.** *Revision of written language: cognitive and instructional processes*. Dordrecht-Boston-London: Kluwer Academic Publishers, 2003.

**Amar Y, Bras AC.** Tag, graphe, graffiti. Parler au quotidien : les archives inofficielles. <http://www.chilton.com/paq/archive/PAQ-04-065.html> (dernière consultation le 9/12/09).

**Ananthakrishnan G, Sen A, Sundaram S, & Ramakrishnan AG.** Dynamic space warping of sub-strokes for recognition of online handwritten characters. *Proceedings of the 13<sup>th</sup> Conference of the International Graphonomics Society* 2007; p. 40-43.

**Anderson, SW, Saver, J, Tranel, D, Damasio, H.** Acquired agraphias caused by focal brain damage. *Acta Psychologica* 1993; 82(1-3): 193-210.

**Antohie C.** The disguise – The intentionate modification of the handwriting. *Forensic Science International* 2003; 136, Supplement 1: 80.

**Arshavsky YI, Berkinblit MB, Gelfand JM, Orlovsky GN, Fukson OI.** Activity of the neurons of the ventral spino-cerebellar tract during locomotion of cats with deafferented hindlimbs. *Biophysics* 1972 ; 17: 1169-76.

**Auriol B.** De-voir, l'écriture du bien-voyant de l'aveugle. <http://auriol.free.fr/psychiatrie/devoir.htm> (dernier accès le 20/12/2006).

**Auzias M, Ajuriaguerra J.** Les fonctions culturelles de l'écriture et les conditions de son développement chez l'enfant. *Enfance* 1986 ; 2-3 : 145-167.

**Bartlett FC.** Remembering: a study in experimental and social psychology. Cambridge: Cambridge University Press, 1932.

**Bazin H.** La culture hip-hop. Paris: Desclée de Brouwer, 1995.

**Benoît C, Soppelsa R.** Mise en pratique de l'analyse neuropsychologique de l'écriture dans la rééducation. *Evolutions Psychomotrices* 1996 ; 8(33) : 123-127.

**Bensefia A, Nosary A, Paquet T, Heutte L.** Writer identification by writer's invariants. *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Workshop on Frontiers in Handwriting Recognition (IWFHR)*, Niagara-on-the-Lake, Canada 2002; p. 274-279.

**Bernstein NA.** The coordination and regulation of movements. Oxford: Pergamon Press, 1967.

**Birnbaum R, Majnemer A, Shevell M, Limperopoulos C, Wood-Dauphinee S.** Psychometric properties of an upper extremity steadiness tester in children of school age. *Canadian Journal of Rehabilitation* 1999; 12: 285-293.

**Black DA.** Fiber tipped pens. *Journal of Criminal Law, Criminology and Police Science* 1966; 57(4): 521-525.

**Blanchon P.** Au cœur de la ville et aux frontières de l'art : la pratique du graffiti. Institut d'Etudes Politiques de Lyon, Université Louis Lumière (Lyon II), 2000.

**Bourdin B, Fayol M.** Is a written language production more difficult than oral language production? A working memory approach. *International Journal of Psychology* 1994; 29(5): 591-620.

**Bourdin B, Fayol M, Darciaux S.** The comparison of oral and written modes on adult's and children's narrative recall. In: *Theories, models and methodology in written research*. G. Rijlaarsdam, H. Van den Bergh, M. Couzijn. Amsterdam: Amsterdam University Press, 1996 ; p. 159-169.

**Buquet A.** L'expertise en écritures ; données et tendances actuelles. *Revue Internationale de Police Criminelle* 1981 ; 352 : 242-246.

**Buquet A.** La vérification automatisée des écritures et signatures. *Revue Internationale de Police Criminelle* 2000 ; 483 : 10-18.

**Castiello U, Stelmach G.** Generalized representation of handwriting: evidence of effector independence. *Acta Psychologica* 1993; 82: 53-68.

**Chang WD, Shin, J.** Dynamic position warping for on-line 2D shape. *Proceedings of the 13<sup>th</sup> Conference of the International Graphonomics Society* 2007; p. 36-39.

**Collet C.** Mouvements et cerveau. Neurophysiologie des activités physiques et sportives. Paris : De Boeck Université, 2002 ; 21, 27, 65, 111, 118, 121.

**Dawson GA.** Brain function and writing with the unaccustomed left hand. *Journal of Forensic Sciences* 1985; 30(1): 167-171.

**Desvoignes O.** Le graffiti hip-hop à la Chaux-de-Fonds: Entre supports et formes. *Mémoire de Licence en Histoire de l'Art*, Université de Neuchâtel, Avril 2003.

**Dolchy FJ, Alexander PA.** Mapping prior knowledge : a framework for discussion among researchers. *European Journal of Psychology of Education* 1995; 10(3): 225-242.

**Dreger AA.** Is it authentic ? *Canadian Society of Forensic Science Journal* 1997; 30(3): 97-104.

**Drewniak F.** Le Réseau: guide annuaire de la culture hip-hop en France. Paris : Centre d'information et de ressources pour les musiques actuelles, 2003.

**Eldridge MA, Nimmo-Smith I, Wing AM, Totty RN.** The variability of selected features in cursive handwriting: categorical measures. *Journal of the Forensic Science Society* 1984; 24: 179-219.

**Ellis AW.** Slips of the pen. *Visible language* 1979; 13(3): 265-282.

**Ellis AW.** Normal writing processes and peripheral acquired dysgraphias. *Language and Cognitive Processes* 1988; 3(2): 99-127.

**Equey C, Marquis R, Mazzella WD.** Influence of writing posture on the dimensions of signatures. *Journal of the American Society of Questioned Document Examiners* 2008 ; 53-58.

**Flash T, Hogan N.** The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model. *The Journal of Neuroscience* 1985; 5(7): 1688-1703.

**Found B, Rogers D.** Documentation of forensic handwriting comparison and identification method: a modular approach. *Journal of Forensic Document Examination* 1999; 12: 1-68.

**Found B, Rogers D, Schmittat R.** Recovering dynamic information from static handwriting traces using “angular differential” software. *Journal of Forensic Document Examination* 1997; 6: 17-38.

**Goussard JP.** Mouvement volontaire.

<http://caratome.free.fr/Formations/BEAECPC/MVTVolontaire.pdf> (dernière consultation le 10/12/09)

**Graham S, Weintraub N.** A review of handwriting research: progress and prospects from 1980 to 1994. *Educational Psychology Review* 1996; 8(1): 7-87.

**Grant J.** The effect of posture on a signature. *Presented at the Meeting of the International Association of Forensic Sciences* (London, 1974).

**Grillner S, Shik ML.** On the descending control of the lumbosacral spinal cord from the “mesencephalic locomotor region”. *Acta Physiologica Scandinavica* 1973; 87(3): 320-333.

**Guedj C.** Traces et fragments: l’écriture aux limites. Cynos 2005; 20(2). La représentation en question – Microlectures.

**Haggag I.** Les variations naturelles de l’écriture. *Revue Internationale de Police Criminelle* 1972; 259 : 159-161.

**Hamstra-Bletz L, Blot A.** Development of handwriting in primary school: a longitudinal study. *Perceptual and Motor Skills* 1990; 70: 759-770.

**Hanlen RC, Manzillo PA, Muehlberger RJ, Sperry GR.** Survey of handwriting habit areas used by forensic document examiners : degree of use and discriminatory power. *Journal of the American Society of Questioned Document Examiners* 1999; 2(1): 45-50.

**Harrison WR.** Suspect documents. New-York: Frederick A. Praeger, 1958.

**Harrison WR.** Suspect documents; Their Scientific Examination, 2<sup>nd</sup> Impression, Sweet & Maxwell Limited, London, 1966.

**Hayes JR, Nash JG.** On the nature of planning in writing. In: *The Science of writing: theories, methods, individual differences and applications*. NJ. Mahwah. Lawrence Erlbaum Associates, 1996.

**Henry FM, Rogers DE.** Increased response latency for complicated movements and a “memory drum” theory of neuromotor reaction. *Research Quarterly* 1960; 31: 448-458.

**Hilton O.** Comment évaluer les différences d’écritures manuscrites ? *Revue Internationale de Police Criminelle* 1957; 105: 48-51.

**Hilton O.** How individual are personal writing habits? *Journal of Forensic Sciences* 1983; 28: 683-685.

**Hilton O.** Effects of writing instruments on handwriting details. *Journal of Forensic Sciences* 1984; 29(1):80-86.

**Hilton O.** Some basic rules for the identification of handwriting. *Journal of the American Society of Questioned Document Examiners* 2001; 4(2): 95-100.

**Hollerbach JM.** An oscillation theory of handwriting. *Biological Cybernetics* 1981; 39: 139-156.

**Howell C.** Méthodes statistiques en sciences humaines. Paris : De Boeck Université (Ed), 1999.

**Huber RA, Headrick AM.** Handwriting identification: facts and fundamentals. Boca Raton: CRC Press, 1999 ; 132, 229.

**Hulme C.** The interaction of visual and motor memory for graphic forms following tracing. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 1979; 31: 249-261.

**James W.** The principles of psychology. New-York: Holt, 1890.

**Johnston LM, Burns YR, Brauer SG, Richardson CA.** Differences in postural control and movement performance during goal directed reaching in children with developmental coordination disorder. *Human Movement Science* 2002; 21:583-601.

**Junker A, Köller N.** Die Stabilität der habituellen Schreibweise unter ausgewählten Bedingungsvariationen. *III Internationaler Kongress der Gesellschaft für Forensische Schriftuntersuchung (GFS)*, Luzern, 10-13 September 1997.

**Kao HSR<sup>a</sup>.** Differential effects of writing instruments on handwriting (abstract). *Applied Ergonomics* 1983; 14(2): 145.

**Kao, HSR<sup>b</sup>.** Progressive motion variability in handwriting tasks. *Acta Psychologica* 1983; 54: 149-159.

**Kapoor TS, Kapoor M, Sharma GP.** Study of the form and extent of natural variation in genuine writings with age. *Journal of the Forensic Science Society* 1985; 25: 371-375.

**Keele SW.** Movement control in skilled motor performance. *Psychological Bulletin* 1968; 70(6): 387-403.

**Keele SW.** Behavioral analysis of movement. *Handbook of Physiology, vol II, Motor control part 2.* Baltimore: VB. Brooks American Physiology Society, 1981; p. 1391-1414.

**Kellogg RT.** A model of working memory in writing. In: *The science of writing: theories, methods, individual differences and applications.* Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 1996.

**Klages L.** Graphologie. Stock, 1949

**Lambert E, Espéret E.** Le début du langage écrit: les premières productions graphomotrices, 1997. [http://www.univ-rouen.fr/arobase/v1\\_n2/lamb.html](http://www.univ-rouen.fr/arobase/v1_n2/lamb.html) (dernier accès le 20/12/2006).

**Lambert E, Espéret E.** Assemblage des unités traitées par les processus graphomoteurs et orthographiques au début de l'apprentissage de l'écriture. *Revue de Psychologie de l'Education* 2002 ; 6 : 76-97.

**Lani-Bayle M.** Du tag au graff'art. Marseille: Hommes et Perspectives S.A., 1993.

**La Rue J.** Une approche cognitive du comportement moteur : le contrôle et l'apprentissage moteurs, 2006. [iufmweb.reunion.iufm.fr/Dep/Eps/PLC/PLC1/06-07/Textes/Textes-complementaires/LaRue-contr-mot.pdf](http://iufmweb.reunion.iufm.fr/Dep/Eps/PLC/PLC1/06-07/Textes/Textes-complementaires/LaRue-contr-mot.pdf) (dernier accès le 28/12/2007).

**Lashley KS.** The effects of strychnine and caffeine upon the rate of learning. *Psychobiology* 1917; 1: 141-170.

**Lashley KS.** Basic neural mechanisms in behavior. *Psychological Review* 1930; 37: p. 1-24.



**Li, CK, Yang, CT, Poon, NL, & Fung, WK.** Significance of sequence of strokes in Chinese handwriting examination. *Journal of Forensic Sciences* 2007; 52(2): 467-472.

**Locard E.** Traité de criminalistique. Tome VI. Lyon: J. Desvigne, 1936 ; p. 675.

**Longcamp M.** Etude comportementale et neurofonctionnelle des interactions perceptivo-motrices dans la perception visuelle de lettres. Notre manière d'écrire influence-t-elle notre manière de lire ? *Thèse en Sciences de la Vie, spécialité Neurosciences*. Université de la Méditerranée, Aix-Marseille II, 2003.

**Longcamp M, Anton JL, Roth M, Velay JL.** Visual representation of single letters activates a premotor area involved in writing. *NeuroImage* 2003; 19: 1492-1500.

**Longcamp M, Anton JL, Roth M, Velay JL.** Premotor activations in response to visually presented single letters depend on the hand used to write: a study on left-handers. *Neuropsychologia* 2005; 43: 1801-1809.

**Longcamp M, Boucard C, Gilhodes, Velay JL.** Remembering the orientation of newly learned characters depends on the associated writing knowledge : a comparison between handwriting and typing. *Human Movement Science* 2006; 25 (4-5): 646-656.

**Longstaff MG, Heath RA.** Space-time invariance in adult handwriting. *Acta Psychologica* 1997 ; 97: 201-214.

**Ma S, Feldman AG.** Two functionally different synergies during arm reaching movements involving the trunk. *Journal of Neurophysiology* 1995; 73: 2120-2122.

**Mac Alexander TV.** Assigning weight to handwriting differences for elimination purposes. *Presented at the 46<sup>th</sup> Annual Meeting of the American Academy of Forensic Sciences*, (San Antonio, TX, 1994).

**Marconot JM.** Le langage des murs : du graffe au graffiti. Montpellier: Les Presses du Languedoc, 1995.

**Marquis R, Taroni F, Bozza S, Schmittbuhl M.** Quantitative characterization of morphological polymorphism of handwritten character loops. *Forensic Science International* 2006; 164: 211-220.

**Marquis R.** Etude de caractères manuscrits : de la caractérisation morphologique à l'individualisation du scripteur. *Thèse en Criminologie*. Institut de Police Scientifique de l'Ecole des Sciences Criminelles de l'Université de Lausanne, 2007.

**Marquis R, Taroni F, Bozza S, Schmittbuhl M.** Size influence on shape of handwritten character loops. *Forensic Science International* 2007; 172(1): 10-16.

**Masson JF.** Felt tip pen writing: problems of identification. *Journal of Forensic Sciences* 1985; 30(1): 172-177.

**Masson JF.** The effect of fiber tip pen use on signatures. *Forensic Science International* 1992 ; 53 : 157-162.

**Mathyer J.** Les stylos à bille et l'expertise des documents écrits. *Revue Internationale de Police Criminelle* 1950; 43: 357-360.

**Mathyer J.** The influence of writing instruments on handwriting and signatures. *Journal of Criminal Law, Criminology and Police Science* 1969; 60(1): 102-112. Paru en français: Influence de l'instrument utilisé sur l'écriture et les signatures. *Revue Internationale de Criminologie et de Police Technique* 1967 ; 21 : 67-79.

**Merton PA.** How we control the contraction of our muscles. *Scientific American* 1972; 226(5): 30-37.

**Meulenbroek RGJ, Rosenbaum DA, Thomassen AJWM, Loukopoulos LD, Vaughan J.** Adaptation of a reaching model to handwriting: how different effectors can produce the same written output, and other results. *Psychological Research* 1996; 59: 64-74.

**Miller G, Galanter E, Pribram KH.** Plans and structures of behavior. New-York: Holt, 1960.

**Miyahara M, Piek JP, Barrett N.** Effect of postural instability on drawing errors in children: a synchronized kinematic analysis of hand drawing and body motion. *Human Movement Science* 2008; 27: 705-713.

**Motulsky HJ, Robert A.** Biostatistique: une approche intuitive. Broché 2002 ; 319-321.

**Naka M, Naoi H.** The effect of repeated writing on memory. *Memory and Cognition* 1995; 23: 201-212.

**New B, Brysbaert M, Veronis J, Pallier C.** The use of film subtitles to estimate word frequencies. *Applied Psycholinguistics* 2007; 28: 661-677.

**Olive T, Piolat A.** Suppressing visual feedback in written composition: effects on processing demands and coordination of the writing processes. *International Journal of Psychology* 2002; 37(4): 209-218.

**Osborn AS.** Questioned documents. Rochester NY: The Lawyer's Pub. Co, 1910; p. 22.

**Osborn AS.** Questioned documents, 2<sup>nd</sup> ed. Albany NY: Boyd Publishing, 1929; p. 211, 208.

**Ostrum RB, Tanaka TA.** Another look at handwriting movement. *Journal of the American Society of Questioned Document Examiners* 2006; 9(2): 57-69.

**Paillard J.** Nouveaux objectifs pour l'étude de la performance motrice intégrée. Champaign, Human Kinetic Publishers. In C. H. Nadeau, W. R. Halliwell K. H. Newell, *Psychology of motor behavior and sport*, 1979; 561-584.

**Passerault JM, Alamargot D, Dansac C, Lambert E.** La production écrite : Approche de la psychologie cognitive. *Revue de Psychologie de l'Education* 1996; 1(2): 173-192.

**Patterson K, Wing AM.** Processes in handwriting: a case for case. *Cognitive Neuropsychology* 1989; 6(1): 1-23.

**Pigeon P, Feldman AG.** Compensatory arm-trunk coordination in pointing movements is preserved in the absence of visual feedback. *Brain Research* 1998; 802: 274-280.

**Pigeon P, Yahia LH, Mitnitski AB, Feldman AG.** Superposition of independent units of coordination during pointing movements involving the trunk with and without visual feedback. *Experimental Brain Research* 2000; 131: 336-349.

**Piolat A.** La prise de notes: écriture de l'urgence. Communication affichée au Colloque de l'Ecole Doctorale Cognition, Langage et Education. *L'écriture dans tous ses états, approches en sciences cognitives*. Aix-en-Provence, France, 2003. <http://www.up.univ-mrs.fr/wpsycle/documentpdf/documentpiolat/Publications/PiolatPUP.pdf> (dernier accès le 22/12/2006).

**Piolat A.** Approche cognitive de l'activité rédactionnelle et de son acquisition. Le rôle de la mémoire de travail. *LINX (Linguistique Institut Nanterre Paris X)* 2004 ; 51 : 55-74.

**Plamondon R, Guerfali W.** The generation of handwriting with delta-lognormal synergies. *Biological Cybernetics* 1998; 78: 119-132.

**Plamondon R, Feng C, Woch A.** A kinematic theory of rapid human movement. Part IV: a formal mathematical proof and new insights. *Biological Cybernetics* 2003; 89: 126-138.

**Pophal R, Dunker E.** Zeit lupenstudien des Schreibvorganges (Slow Motion Studies in Handwriting Movements), *Zeitschrift für experimentelle und Angewandte Psychologie*, 1960; 1: 76-99.

**Portier SJ, Van Galen GP, Meulenbroek RG.** Practice and dynamics of handwriting performance : evidence for a shift of motor programming load. *Journal of Motor Behavior* 1990; 22(4): 474-492.

**Preyer WT.** Graphisch fixierte Ausdrucksbewegungen (mouvements d'expression fixes graphiquement). *Graphologischen Monatshefte*, 1898.

**Raibert MH.** Motor control and learning by the statespace model. *Technical Report AITR-439*. Cambridge : Massachussets Institute of Technology, 1977.

**Rijntjes M, Dettmers C, Büchel C, Kiebel S, Frackowiak RSJ, Weiller C.** A blueprint for movement: functional and anatomical representations in the human motor system. *The Journal of Neuroscience* 1999; 19 (18): 8043-8048.

**Riout D.** Le livre du graffiti. Paris: Alternatives, 1985.

**Riout D, Gurdjian D, Leroux JP.** Le livre du graffiti. Paris: Alternatives, 1990.

**Roeltgen D.** Agraphia. In K. M. Heilman & E. Valenstein (Eds), *Clinical Neuropsychology*, New York: Oxford University Press, 1985; p. 75-96.

**Rogers D, Found B.** The objective measurement of spatial invariance in handwriting. In: *Handwriting and drawing research: basic and applied issues*. ML. Simner, CG. Leedham, AJWM. Thomassen, 1996; p. 3-13.

**Rosenbaum DA.** Human motor control. San Diego, CA: Academic, 1991.

**Rosenblum, S, Parush, S, Weiss, PL.** The in air phenomenon: temporal and spatial correlates of the handwriting process. *Perceptual and Motor Skills*, 2003; 96(3): 933-954.

**Rothwell J.** Control of human voluntary movement. London: Chapman & Hall, 1995.

**Sallagoïti I.** Dynamique de coordination spontanée de l'écriture. *Thèse en Sciences et techniques des activités physiques et sportives*. Université Paul Sabatier, Toulouse III, 2004.

**Saudek R.** Experiments with handwriting. George Allen & Unwin. London, 1926.

**Schmidt RA.** A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review* 1975; 82(4): 225-260.

**Schomaker LRB, Thomassen AJWM.** On the use and limitations of averaging handwriting signals. In: *Graphonomics: contemporary research in handwriting*. HSR. Kao, GP. Van Galen, R. Hoosain (Eds.). North Holland: Elsevier Science Publishers BV., 1986; p. 225-238.

**Schomaker LRB, Van Galen GIE.** Computer models of handwriting. In: *Computational psycholinguistics; AI and connectionist models of human language processing*. T. Dijkstra & De Smedt. London: Taylor & Francis, 1996; p. 386-420.

**Sciacca, E., Velay, J. L., Langlois-Peter, M. B., Gilhodes, J. C., Margot, P.** Study of within-subject handwriting variability under usual and unusual writing conditions. *Proceedings of the 13<sup>th</sup> Conference of the International Graphonomics Society*. JG. Phillips, D. Rogers, RP. Ogeil. Melbourne: Monash University, 2007; 110-113

**Sciacca E<sup>a</sup>, Langlois-Peter, MB, Gilhodes, JC, Margot, P, Velay, JL.** The range of handwriting variability under different writing conditions. *Journal of Forensic Document Examination* 2008; 19: 5-13.

**Sciacca E<sup>b</sup>, Langlois-Peter MB, Gilhodes JC, Margot P, Velay JL.** Comparing handwriting variability under four postural conditions. *Proceedings of the 14<sup>th</sup> conference of the International Graphonomics Society*. A. Vinter, JL. Velay. Dijon : 2009; p. 108 – 111.

**Sève C.** Préparation au brevet d'éducateur sportif. *Sciences humaines, l'esprit sportif, gestion, communication et promotion des APS, Tome 3*. @mphora Sports, 1998.

**Sève C.** Préparation aux diplômes d'éducateur sportif. *Encadrement et animation de la pratique sportive : aspects psychologiques et pédagogiques, Tome 3*. @mphora, 2009 ; p. 59-89.

**Smethurst CJ, Carson RG.** The acquisition of movements skills: practice enhances the dynamic stability of bimanual coordination. *Human Movement Science* 2001; 20: 499-529.

**Smyth MM, Silvers G.** Functions of vision in the control of handwriting. *Acta Psychologica* 1987; 65: 47-64.

**Srihari S, Cha SH, Arora H, Lee S.** Individuality of handwriting. *Journal of Forensic Sciences* 2002; 47: 857-872.

**Taylor LL, Hnilica V.** Investigation of death through body writing: a case study. *Journal of Forensic Sciences* 1991; 36(5): 1607-1613.

**Teasdale N, Forget R, Bard C, Paillard J, Fleury M, Lamarre Y.** The role of proprioceptive information for the production of isometric forces and for handwriting tasks. *Acta Psychologica* 1993; 82: 179-191.

**Teulings HL.** Handwriting movement control. In: *Handbook of perception and action*. Vol. 2. SW. Keele & H. Heuer. London: Academic Press, 1996; p. 561-613.

**Teulings HL, Schomaker LRB.** Invariant properties between stroke features in handwriting *Acta Psychologica* 1993; 82: 69-88.

**Thomassen AJWM, Schomaker LRB.** Between-letter context effects in handwriting trajectories. In: *Graphonomics: contemporary research in handwriting*. HSR. Kao, GP. Van Galen, R. Hoosain. Amsterdam: North-Holland, 1986; p. 253-272.

**Thomassen AJWM, Teulings HL.** Constancy in stationary and progressive handwriting. *Acta Psychologica* 1983; 54: 179-196.

**Thomassen AJWM, Van Galen GP.** Temporal features of handwriting: challenges for forensic analysis. *Journal of Forensic Document Examination* 1997; 10: 85-108.

**Totty RN.** A case of handwriting on an unusual surface. *Journal of the Forensic Science Society* 1981; 21: 349-350.

**Tucha O, Mecklinger L, Walitza S, Lange KW.** Attention and movement execution during handwriting. *Human Movement Science* 2006; 25: 536-552.

**Ueda K, Matsuo K.** Experimental analysis of variation and individuality of Japanese handwriting, second report: analysis of normal handwriting. *Proceedings of the 13<sup>th</sup> Conference of the International Graphonomics Society 2007*, pp. 119-122.

**Van der Plaats RE, Van Galen GP.** Effects of spatial and motor demands in handwriting. *Journal of Motor Behaviour* 1990; 22(3): 361-385.

**Van der Plaats RE, Van Galen GP.** Allographic variability in adult handwriting. *Human Movement Science* 1991; 10: 291-300.

**Van Galen GP.** Handwriting and drawing: a two-stage model of complex motor behaviour. In: *Tutorials in motor behavior*. Amsterdam North-Holland: G. Stelmach & J. Requin, 1980.

**Van Galen GP, Teulings HS.** The independent monitoring of form and scale factors in handwriting. *Acta Psychologica* 1983; 54: 9-22.

**Van Galen GP.** Handwriting: issues for a psychomotor theory. *Human Movement Science* 1991; 10: 165-191.

**Van Galen GP, Morasso PG.** Neuromotor control in handwriting and drawing: introduction and overview. *Acta Psychologica* 1998; 100: 1-7.

**Van Galen GP, Teulings HL.** The independent monitoring of form and scale factors in handwriting. *Acta Psychologica* 1983; 54: 9-22.

**Van Galen GP, Weber JF.** On-line size control in handwriting demonstrates the continuous nature of motor programs. *Acta Psychologica* 1998; 100: 195-216.

**Velay JL, Longcamp M, Zerbato-Poudou MT.** Apprendre à écrire les lettres pour mieux les reconnaître. [http://www.ufrstaps.ups-tlse.fr/recherche/lapma/publications/pdf/Velay\\_2005.pdf](http://www.ufrstaps.ups-tlse.fr/recherche/lapma/publications/pdf/Velay_2005.pdf) (dernier accès le 22/12/2006).



**Velay JL, Henin F, Moulin C, Thomas T, Devos-Charles I & Habib M.** Handwriting variability in children writing letters: a study in dyslexics, dysgraphics and proficient handwriters, *Proceedings of the 14<sup>th</sup> Conference of the International Graphonomics Society* 2009, pp. 91-94.

**Viviani P.** Les habiletés motrices. In : *Traité de psychologie expérimentale. Tome I.* M. Richelle, J. Requin, M. Robert. Paris: Presses Universitaires de France, 1994 ; p. 777-857.

**Viviani P.** La production du geste : pleins et déliés. *Science et Vie (hors-série)* 1998; 204: 36-47.

**Viviani P, Flash T.** Minimum-jerk, two thirds power law, and isochrony: converging approaches to movement planning. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 1995; 21(1): 32-53.

**Viviani P, Terzuolo C.** Space-time invariance in learned motor skills. In: *Tutorials in motor behavior.* Amsterdam North-Holland: G. Stelmach & J. Requin, 1980; p. 525-533.

**Vulbeau A.** Les tags, spectres de la jeunesse – Histoire d’une nouvelle pratique urbaine. *Annales de la Recherche Urbaine* 1992 ; 54 : 60-67.

**Wann JP, Nimmo-Smith I.** Evidence against the relative invariance of timing in handwriting. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 1990; 42A(1): 105-119.

**Wann J, Nimmo-Smith I.** The control of pen pressure in handwriting: a subtle point. *Human Movement Science* 1991; 10: 223-246.

**Welford AT.** Single channel in the brain. In: *Attention and performance.* Amsterdam North-Holland: A.F. Sanders, 1967.

**Wellingham-Jones P.** Mouth-writing by a quadriplegic. *Perceptual and Motor Skills* 1991; 72: 1324-1326.

**Whiting F.** Alternate handwriting styles – one writer or two. *International Journal of Forensic Document Examiners* 1997; 3(2): 167-175.

**Wing AM.** The height of handwriting. *Acta Psychologica* 1980; 46: 141-151.

**Wing AM.** Motor control: mechanisms of motor equivalence in handwriting. *Current Biology* 2000; 10: R245-248.

**Wing, AM, Nimmo-Smith, I.** The variability of cursive handwriting measure defined along a continuum: letter specificity. *Journal of the Forensic Science Society* 1987; 27: 297-306.

**Wing AM, Nimmo-Smith I, Eldridge MA.** The consistency of cursive letter formation as function of position in the word. *Acta Psychologica* 1983; 54: 197-204.

**Wright CE.** Generalized motor programs: re-examining claims of effector independence in writing. *Attention and Performance XIII – Motor representation and control*. USA Erlbaum: Jeannerod M. Hillsdale, 1990; p. 294-320.

**Wright CE.** Evaluating the special role of time in the control of handwriting. *Acta Psychologica* 1993; 82(1-3): 5-52.

**Zesiger P.** *Ecrire: approche cognitive, neuropsychologique et développementale*. Paris: Presses Universitaires de France, 1995.

**Zhang B, Srihari SN.** Analysis of handwriting individuality using word features. 7<sup>th</sup> *International Conference on Document Analysis and Recognition*, Edinburgh, Scotland, 2003.

## Annexes

- Annexe 1 Tableaux de résultats du test de Student effectué pour la comparaison des valeurs de variance (en fonction du nombre de répétitions) à la valeur standard de 100% (■ : valeurs inférieures à la valeur seuil de signification (0.002)) (Expérience 1)
- Annexe 2 Intra-variabilité moyenne (valeurs logarithmiques) de chaque sujet (8 répétitions) et des 12 sujets (dernière ligne) (■ : CR)
- Annexe 3 **Sciacca, E., Velay, J. L., Langlois-Peter, M. B., Gilhodes, J. C., Margot, P.** Study of within-subject handwriting variability under usual and unusual writing conditions. *Proceedings of the 13<sup>th</sup> Conference of the International Graphonomics Society*. JG. Phillips, D. Rogers, RP. Ogeil. Melbourne: Monash University, 2007; 110-113
- Annexe 4 **Sciacca, E., Langlois-Peter, M. B., Gilhodes, J. C., Margot, P., Velay, J. L.** The range of handwriting variability under different writing conditions. *Journal of Forensic Document Examination* 2008; 19 : 5-13
- Annexe 5 **Sciacca, E., Langlois-Peter, M. B., Gilhodes, J. C., Margot, P., Velay, J. L.** Comparing handwriting variability under four postural conditions. *Proceedings of the 14<sup>th</sup> Conference of the International Graphonomics Society*. A. Vinter, JL. Velay. Dijon 2009; 108-111
- Sciacca, E., Langlois-Peter, M. B., Margot, P., Velay, J. L.** Effects of different postural conditions on handwriting variability. *Journal of Forensic Document Examination (non encore disponible, à paraître en 2011)*

## **Annexe 1**

Tableaux de résultats du test de Student effectué pour la comparaison des valeurs de variance (en fonction du nombre de répétitions) à la valeur standard de 100% (■ : valeurs inférieures à la valeur seuil de signification (0.002)) (Expérience 1)

L'EPOQUE MAJ (CR)

	Moyenne	Ec-Type	N	Erreur-T	Valeur de	Valeur t	dl	p	p comparaison au seuil corrigé ■ : p < 0,02
Repet 2	40,8333	18,30963	12	5,285634	100,0000	-11,1941	11	0,000000	0,000000
Repet 3	69,0833	33,27696	12	9,606231	100,0000	-3,2184	11	0,008182	0,008182
Repet 4	74,2500	27,66397	12	7,966901	100,0000	-3,2244	11	0,008095	0,008095
Repet 5	86,0000	25,25866	12	7,291548	100,0000	-1,9200	11	0,081148	0,081148
Repet 6	87,4167	20,09278	12	5,800285	100,0000	-2,1694	11	0,052829	0,052829
Repet 7	86,5833	20,72968	12	5,984144	100,0000	-2,2420	11	0,046535	0,046535
Repet 8	87,5833	22,04730	12	6,364507	100,0000	-1,9509	11	0,076996	0,076996
Repet 9	88,2500	20,00057	12	5,773667	100,0000	-2,0351	11	0,066663	0,066663
Repet 10	92,6667	17,70122	12	5,109903	100,0000	-1,4351	11	0,179069	0,179069
Repet 11	93,1667	16,66151	12	4,809765	100,0000	-1,4207	11	0,183119	0,183119
Repet 12	93,4167	16,18899	12	4,673358	100,0000	-1,4087	11	0,186559	0,186559
Repet 13	93,9167	16,40653	12	4,736157	100,0000	-1,2844	11	0,225377	0,225377
Repet 14	94,8333	17,24072	12	4,976967	100,0000	-1,0381	11	0,321498	0,321498
Repet 15	94,9167	17,06383	12	4,925903	100,0000	-1,0320	11	0,324247	0,324247
Repet 16	96,9167	14,06128	12	4,059143	100,0000	-0,7596	11	0,463461	0,463461
Repet 17	96,8333	14,23717	12	4,109917	100,0000	-0,7705	11	0,457236	0,457236
Repet 18	98,5833	12,35430	12	3,566380	100,0000	-0,3972	11	0,698798	0,698798
Repet 19	99,0000	10,53134	12	3,040136	100,0000	-0,3289	11	0,748384	0,748384
Repet 20	99,0000	9,69536	12	2,798809	100,0000	-0,3573	11	0,727632	0,727632
Repet 21	98,9167	8,79523	12	2,538964	100,0000	-0,4267	11	0,677841	0,677841
Repet 22	99,8333	5,76562	12	1,664392	100,0000	-0,1001	11	0,922038	0,922038
Repet 23	99,2500	6,00189	12	1,732597	100,0000	-0,4329	11	0,673470	0,673470
Repet 24	99,0000	5,95437	12	1,718879	100,0000	-0,5818	11	0,572448	0,572448

## L'EPOQUE MAJ (CNC)

	Moyenne	Ec-Type	N	Erreur-T	Valeur de	Valeur t	df	p	p comparaison au seuil corrigé ■ : p < 0,02
Repet 2	32,2500	21,51162	12	6,209871	100,0000	-10,9100	11	0,000000	0,000000
Repet 3	54,4167	20,93478	12	6,043951	100,0000	-7,5427	11	0,000011	0,000011
Repet 4	61,0633	18,06784	12	5,215737	100,0000	-7,4614	11	0,000013	0,000013
Repet 5	64,6667	18,40619	12	5,313410	100,0000	-6,6498	11	0,000036	0,000036
Repet 6	75,3333	25,09014	12	7,242900	100,0000	-3,4056	11	0,005870	0,005870
Repet 7	87,5000	29,93781	12	8,642303	100,0000	-1,4464	11	0,175959	0,175959
Repet 8	89,0633	26,21748	12	7,568333	100,0000	-1,4424	11	0,177048	0,177048
Repet 9	88,2500	24,64337	12	7,113927	100,0000	-1,6517	11	0,126828	0,126828
Repet 10	88,9167	21,80266	12	6,293886	100,0000	-1,7610	11	0,105979	0,105979
Repet 11	89,1667	20,54633	12	5,931213	100,0000	-1,8265	11	0,095012	0,095012
Repet 12	90,7500	18,00568	12	5,197792	100,0000	-1,7796	11	0,102749	0,102749
Repet 13	93,5000	14,84771	12	4,286165	100,0000	-1,5165	11	0,157590	0,157590
Repet 14	93,4167	13,36840	12	3,856239	100,0000	-1,7072	11	0,115820	0,115820
Repet 15	94,2500	10,33199	12	2,982588	100,0000	-1,9279	11	0,080078	0,080078
Repet 16	95,1667	9,62793	12	2,779343	100,0000	-1,7390	11	0,109901	0,109901
Repet 17	96,5000	9,41469	12	2,717787	100,0000	-1,2878	11	0,224244	0,224244
Repet 18	96,0633	9,25849	12	2,672697	100,0000	-1,4654	11	0,170793	0,170793
Repet 19	96,1667	8,87113	12	2,560875	100,0000	-1,4969	11	0,162555	0,162555
Repet 20	96,5633	9,85770	12	2,845673	100,0000	-1,2007	11	0,255103	0,255103
Repet 21	97,1667	8,56879	12	2,473598	100,0000	-1,1454	11	0,276340	0,276340
Repet 22	98,3333	7,21530	12	2,082879	100,0000	-0,8002	11	0,440549	0,440549
Repet 23	98,1667	6,54819	12	1,890300	100,0000	-0,9699	11	0,352957	0,352957
Repet 24	99,2500	5,94100	12	1,715018	100,0000	-0,4373	11	0,670346	0,670346

## D'OBJETS MAJ (CR)

	Moyenne	Ec-Type	N	Erreur-T	Valeur de	Valeur t	df	p	p comparaison au seuil corrigé ■ : p < 0,02
Repet 2	43,8333	24,09368	12	6,955305	100,0000	-8,07537	11	0,000006	0,000006
Repet 3	63,0633	19,98644	12	5,770167	100,0000	-6,39785	11	0,000051	0,000051
Repet 4	74,5000	27,42428	12	7,916707	100,0000	-3,22104	11	0,008144	0,008144
Repet 5	76,7500	26,85694	12	7,752932	100,0000	-2,99887	11	0,012104	0,012104
Repet 6	82,9167	26,53114	12	7,658881	100,0000	-2,23053	11	0,047483	0,047483
Repet 7	83,0633	21,04739	12	6,075867	100,0000	-2,78424	11	0,017769	0,017769
Repet 8	83,5633	19,23755	12	5,553402	100,0000	-2,95615	11	0,013065	0,013065
Repet 9	88,0000	16,17518	12	4,669372	100,0000	-2,56994	11	0,026053	0,026053
Repet 10	88,5000	16,76848	12	4,840642	100,0000	-2,37572	11	0,036778	0,036778
Repet 11	88,5000	16,89609	12	4,878058	100,0000	-2,35750	11	0,037981	0,037981
Repet 12	89,5633	17,53676	12	5,062426	100,0000	-2,05764	11	0,064125	0,064125
Repet 13	90,3333	15,64570	12	4,516524	100,0000	-2,14029	11	0,055577	0,055577
Repet 14	92,3333	12,84405	12	3,707759	100,0000	-2,06774	11	0,063019	0,063019
Repet 15	93,9167	12,36370	12	3,574867	100,0000	-1,70170	11	0,116871	0,116871
Repet 16	94,2500	11,09566	12	3,203041	100,0000	-1,79517	11	0,100119	0,100119
Repet 17	94,6667	8,70040	12	2,511589	100,0000	-2,12349	11	0,057223	0,057223
Repet 18	95,2500	7,93296	12	2,290048	100,0000	-2,07419	11	0,062320	0,062320
Repet 19	95,4167	7,53728	12	2,175826	100,0000	-2,10648	11	0,068935	0,068935
Repet 20	95,7500	6,49650	12	1,875379	100,0000	-2,26621	11	0,044603	0,044603
Repet 21	96,9167	6,31676	12	1,823493	100,0000	-1,69089	11	0,118960	0,118960
Repet 22	98,0633	4,69929	12	1,356588	100,0000	-1,41288	11	0,185356	0,185356
Repet 23	97,2500	3,88763	12	1,122261	100,0000	-2,45041	11	0,032222	0,032222
Repet 24	96,8333	2,94906	12	0,851321	100,0000	-3,71971	11	0,003383	0,003383

## D'OBJETS MAJ (CNC)

	Moyenne	Ec-Type	N	Erreur-T	Valeur de	Valeur t	dl	p	p comparaison au seuil corrigé ■ : p < 0,02
Repet 2	29,6667	15,89369	12	4,588083	100,0000	-15,3296	11	0,000000	0,000000
Repet 3	48,7500	19,38193	12	5,595080	100,0000	-9,1598	11	0,000002	0,000002
Repet 4	60,5000	25,01091	12	7,220027	100,0000	-5,4709	11	0,000195	0,000195
Repet 5	66,5833	27,31120	12	7,884064	100,0000	-4,2365	11	0,001392	0,001392
Repet 6	73,1667	25,62610	12	7,397618	100,0000	-3,6273	11	0,003975	0,003975
Repet 7	79,8333	25,15708	12	7,262224	100,0000	-2,7769	11	0,018003	0,018003
Repet 8	87,2500	25,44915	12	7,346536	100,0000	-1,7355	11	0,110539	0,110539
Repet 9	91,0000	24,18113	12	6,980492	100,0000	-1,2893	11	0,223743	0,223743
Repet 10	89,5000	23,13400	12	6,678210	100,0000	-1,5723	11	0,144188	0,144188
Repet 11	91,0000	21,72138	12	6,270421	100,0000	-1,4353	11	0,179017	0,179017
Repet 12	91,3333	20,36634	12	5,879256	100,0000	-1,4741	11	0,168487	0,168487
Repet 13	91,4167	20,62416	12	5,953683	100,0000	-1,4417	11	0,177249	0,177249
Repet 14	93,5000	17,71748	12	5,114596	100,0000	-1,2709	11	0,229993	0,229993
Repet 15	95,6667	18,17257	12	5,245970	100,0000	-0,8260	11	0,426340	0,426340
Repet 16	98,8333	14,70827	12	4,245913	100,0000	-0,2748	11	0,788582	0,788582
Repet 17	98,6667	14,46207	12	4,174840	100,0000	-0,3194	11	0,755427	0,755427
Repet 18	97,0833	14,00947	12	4,044185	100,0000	-0,7212	11	0,485833	0,485833
Repet 19	97,5000	13,37909	12	3,862210	100,0000	-0,6473	11	0,530716	0,530716
Repet 20	98,4167	10,07660	12	2,908864	100,0000	-0,5443	11	0,597087	0,597087
Repet 21	98,1667	8,39733	12	2,424100	100,0000	-0,7563	11	0,465362	0,465362
Repet 22	98,4167	7,51312	12	2,168851	100,0000	-0,7300	11	0,480628	0,480628
Repet 23	98,5000	6,15704	12	1,777383	100,0000	-0,8439	11	0,416680	0,416680
Repet 24	100,2500	3,74489	12	1,081000	100,0000	0,2313	11	0,821353	0,821353



l'époque min (CR)

	Moyenne	Ec-Type	N	Erreur-T	Valeur de	Valeur t	df	p	p comparaison au seuil corrigé ■ : p < 0,02
Repet 2	48,7500	28,61698	12	8,261012	100,0000	-6,20384	11	0,000067	0,000067
Repet 3	71,1667	27,73194	12	8,005522	100,0000	-3,60168	11	0,004158	0,004158
Repet 4	72,9167	27,28122	12	7,875411	100,0000	-3,43897	11	0,005535	0,005535
Repet 5	79,1667	26,75081	12	7,722295	100,0000	-2,69782	11	0,020738	0,020738
Repet 6	83,8333	23,08023	12	6,662688	100,0000	-2,42645	11	0,033621	0,033621
Repet 7	83,4167	20,42484	12	5,896145	100,0000	-2,81257	11	0,016891	0,016891
Repet 8	87,9167	20,33563	12	5,870391	100,0000	-2,06836	11	0,064047	0,064047
Repet 9	86,7500	19,06985	12	5,504991	100,0000	-2,40691	11	0,034805	0,034805
Repet 10	88,1667	20,79700	12	6,003576	100,0000	-1,97105	11	0,074399	0,074399
Repet 11	87,6667	19,51379	12	5,633145	100,0000	-2,18942	11	0,051020	0,051020
Repet 12	87,7500	20,06863	12	5,793315	100,0000	-2,11451	11	0,058121	0,058121
Repet 13	86,0000	19,04540	12	5,497933	100,0000	-2,54641	11	0,027168	0,027168
Repet 14	91,2500	16,57010	12	4,783376	100,0000	-1,82925	11	0,094574	0,094574
Repet 15	92,3333	15,63407	12	4,513168	100,0000	-1,69873	11	0,117440	0,117440
Repet 16	93,4167	13,29701	12	3,838518	100,0000	-1,71507	11	0,114328	0,114328
Repet 17	94,7500	11,88678	12	3,431417	100,0000	-1,52998	11	0,154257	0,154257
Repet 18	96,4167	11,34948	12	3,276312	100,0000	-1,09371	11	0,297455	0,297455
Repet 19	99,3333	9,36406	12	2,708945	100,0000	-0,24610	11	0,810138	0,810138
Repet 20	100,3333	8,15011	12	2,352733	100,0000	0,14168	11	0,889895	0,889895
Repet 21	100,1667	8,16682	12	2,357568	100,0000	0,07069	11	0,944910	0,944910
Repet 22	99,0000	7,78940	12	2,242834	100,0000	-0,44586	11	0,664343	0,664343
Repet 23	99,3333	6,65150	12	1,920122	100,0000	-0,34720	11	0,734993	0,734993
Repet 24	98,9167	6,11196	12	1,764371	100,0000	-0,61401	11	0,551699	0,551699

## l'époque min (CNC)

	Moyenne	Ec-Type	N	Erreur-T	Valeur de	Valeurt	dl	p	p comparaison au seuil corrigé ■ : p < 0,02
Repet 2	47,5000	43,83958	12	12,65540	100,0000	-4,14843	11	0,001621	0,001621
Repet 3	68,9167	47,13705	12	13,60729	100,0000	-2,28431	11	0,043207	0,043207
Repet 4	80,4167	37,32768	12	10,77557	100,0000	-1,81738	11	0,096473	0,096473
Repet 5	86,1667	34,65894	12	10,00518	100,0000	-1,38262	11	0,194207	0,194207
Repet 6	88,7500	31,93210	12	9,21800	100,0000	-1,22044	11	0,247816	0,247816
Repet 7	93,3333	29,29577	12	8,45696	100,0000	-0,78831	11	0,447174	0,447174
Repet 8	92,2500	27,05592	12	7,81037	100,0000	-0,99227	11	0,342391	0,342391
Repet 9	91,1667	26,40535	12	7,62257	100,0000	-1,15884	11	0,271060	0,271060
Repet 10	95,1667	24,57210	12	7,09335	100,0000	-0,68139	11	0,509716	0,509716
Repet 11	96,5833	26,96954	12	7,78544	100,0000	-0,43885	11	0,669263	0,669263
Repet 12	94,1667	25,48024	12	7,35551	100,0000	-0,79306	11	0,444514	0,444514
Repet 13	94,6667	21,94760	12	6,33573	100,0000	-0,84179	11	0,417832	0,417832
Repet 14	93,9167	20,26846	12	5,85100	100,0000	-1,03971	11	0,320789	0,320789
Repet 15	96,2500	18,29617	12	5,28165	100,0000	-0,71001	11	0,492478	0,492478
Repet 16	96,3333	16,21634	12	4,68125	100,0000	-0,78327	11	0,450006	0,450006
Repet 17	95,5000	14,63185	12	4,22385	100,0000	-1,06538	11	0,309531	0,309531
Repet 18	96,6667	13,88481	12	4,00820	100,0000	-0,83163	11	0,423304	0,423304
Repet 19	97,0833	12,60922	12	3,63997	100,0000	-0,80129	11	0,439930	0,439930
Repet 20	98,4167	9,30746	12	2,68683	100,0000	-0,58929	11	0,567570	0,567570
Repet 21	98,9167	7,58637	12	2,18971	100,0000	-0,49474	11	0,630517	0,630517
Repet 22	99,6667	6,28611	12	1,81464	100,0000	-0,18369	11	0,857598	0,857598
Repet 23	99,3333	5,12274	12	1,47881	100,0000	-0,45081	11	0,660880	0,660880
Repet 24	99,2500	5,64277	12	1,62893	100,0000	-0,46043	11	0,654179	0,654179

d'objets min (CR)

	Moyenne	Ec-Type	N	Erreur-T	Valeur de	Valeur t	df	p	p comparaison au seuil corrigé ■ : p < 0,02
Repet 2	44,4167	25,31424	12	7,307591	100,0000	-7,60625	11	0,000011	0,000011
Repet 3	57,5833	22,33814	12	6,448465	100,0000	-6,57779	11	0,000040	0,000040
Repet 4	62,5000	22,24451	12	6,421437	100,0000	-5,83981	11	0,000113	0,000113
Repet 5	70,3333	19,68640	12	5,682687	100,0000	-5,22054	11	0,000285	0,000285
Repet 6	72,2500	16,87454	12	4,871259	100,0000	-5,69668	11	0,000139	0,000139
Repet 7	75,2500	19,94595	12	5,757900	100,0000	-4,29844	11	0,001259	0,001259
Repet 8	79,5833	21,23658	12	6,130473	100,0000	-3,33036	11	0,006707	0,006707
Repet 9	81,0833	18,81710	12	5,432029	100,0000	-3,48243	11	0,005126	0,005126
Repet 10	81,8333	21,45114	12	6,192411	100,0000	-2,93370	11	0,013600	0,013600
Repet 11	85,6667	21,94345	12	6,334529	100,0000	-2,26273	11	0,044877	0,044877
Repet 12	87,0000	19,80368	12	5,716801	100,0000	-2,27400	11	0,043998	0,043998
Repet 13	87,1667	18,53171	12	5,349644	100,0000	-2,39891	11	0,035300	0,035300
Repet 14	87,0833	17,62466	12	5,087802	100,0000	-2,53875	11	0,027541	0,027541
Repet 15	86,9167	15,83126	12	4,570091	100,0000	-3,08163	11	0,010441	0,010441
Repet 16	86,4167	16,23385	12	4,686309	100,0000	-2,89851	11	0,014484	0,014484
Repet 17	88,8333	15,91359	12	4,593858	100,0000	-2,43078	11	0,033363	0,033363
Repet 18	90,7500	15,93239	12	4,599284	100,0000	-2,01118	11	0,069459	0,069459
Repet 19	90,8333	15,82193	12	4,567397	100,0000	-2,00698	11	0,069962	0,069962
Repet 20	92,4167	13,81342	12	3,987591	100,0000	-1,90173	11	0,083705	0,083705
Repet 21	92,9167	12,12404	12	3,499910	100,0000	-2,02386	11	0,067964	0,067964
Repet 22	99,0000	5,70486	12	1,646852	100,0000	-0,60722	11	0,556032	0,556032
Repet 23	98,1667	4,74501	12	1,369767	100,0000	-1,33843	11	0,207764	0,207764
Repet 24	97,9167	3,91868	12	1,131226	100,0000	-1,84166	11	0,092626	0,092626

d'objets min (CNC)

	Moyenne	Ec-Type	N	Erreur-T	Valeur de	Valeur t	dl	p	p comparaison au seuil corrigé ■ : p < 0,02
Repet 2	37,0000	31,86620	12	9,198979	100,0000	-6,84869	11	0,000028	0,000028
Repet 3	59,6667	32,84767	12	9,482307	100,0000	-4,25354	11	0,001358	0,001358
Repet 4	71,3333	26,92864	12	7,773628	100,0000	-3,68768	11	0,003578	0,003578
Repet 5	74,5000	26,70546	12	7,709203	100,0000	-3,30773	11	0,006982	0,006982
Repet 6	80,6667	24,28368	12	7,010094	100,0000	-2,75793	11	0,018625	0,018625
Repet 7	85,3333	28,52219	12	8,233646	100,0000	-1,78131	11	0,102458	0,102458
Repet 8	86,0000	25,32336	12	7,310225	100,0000	-1,91513	11	0,081827	0,081827
Repet 9	87,2500	26,28212	12	7,586995	100,0000	-1,68051	11	0,121001	0,121001
Repet 10	86,2500	25,89884	12	7,476352	100,0000	-1,83913	11	0,093020	0,093020
Repet 11	86,3333	24,35470	12	7,030597	100,0000	-1,94388	11	0,077925	0,077925
Repet 12	86,8333	23,15495	12	6,684257	100,0000	-1,96980	11	0,074557	0,074557
Repet 13	87,0000	21,30728	12	6,150881	100,0000	-2,11352	11	0,058221	0,058221
Repet 14	89,1667	20,08542	12	5,798162	100,0000	-1,86841	11	0,088551	0,088551
Repet 15	88,8333	19,16831	12	5,533415	100,0000	-2,01804	11	0,068647	0,068647
Repet 16	91,5000	17,41734	12	5,027952	100,0000	-1,69055	11	0,119028	0,119028
Repet 17	95,1667	16,20232	12	4,677207	100,0000	-1,03338	11	0,323611	0,323611
Repet 18	95,1667	14,72681	12	4,251262	100,0000	-1,13692	11	0,279733	0,279733
Repet 19	96,8333	13,20363	12	3,811532	100,0000	-0,83081	11	0,423746	0,423746
Repet 20	98,8333	8,06602	12	2,328458	100,0000	-0,50105	11	0,626213	0,626213
Repet 21	99,5000	8,14081	12	2,350048	100,0000	-0,21276	11	0,835404	0,835404
Repet 22	100,8333	6,07279	12	1,753064	100,0000	0,47536	11	0,643831	0,643831
Repet 23	100,7500	5,15443	12	1,487957	100,0000	0,50405	11	0,624171	0,624171
Repet 24	100,8333	4,28174	12	1,236033	100,0000	0,67420	11	0,514103	0,514103

## **Annexe 2**

Intra-variabilité moyenne (valeurs logarithmiques) de chaque sujet (8 répétitions) et des 12 sujets (dernière ligne) (■ : CR) – Expériences 1 & 2

## Expérience 1

	Condition de référence				Condition non conventionnelle			
	MAJUSCULE		minuscule		MAJUSCULE		minuscule	
Sujets	L'EPOQUE	D'OBJETS	l'époque	d'objets	L'EPOQUE	D'OBJETS	l'époque	d'objets
S1	1.5441	1.6021	1.8261	1.9912	1.6021	1.6532	1.7782	2.0000
S2	1.6232	1.6532	1.7634	2.0212	1.7782	1.8261	1.9138	2.1139
S3	1.5441	1.4771	1.5682	1.8129	1.5798	1.5441	1.6532	1.8325
S4	1.6532	1.8451	1.8451	2.1461	2.1139	1.8451	2.0792	2.1139
S5	1.1461	1.3617	1.4624	1.5185	1.3617	1.3617	1.6532	1.8129
S6	1.3617	1.4472	1.6532	1.9294	1.3424	1.3802	1.6532	1.5563
S7	1.3617	1.3424	1.4771	1.4472	1.3424	1.2304	1.4314	1.3617
S8	1.3802	1.4150	1.5315	1.7634	1.3979	1.4150	1.4472	1.6532
S9	1.5563	1.7782	1.9912	1.9494	1.6128	1.7324	1.8976	1.9956
S10	1.3979	1.4771	1.4771	1.8633	1.4314	1.5051	1.7243	1.7782
S11	1.4472	1.8129	1.8062	2.0414	1.6435	1.7482	1.9345	2.0492
S12	1.6990	1.7324	1.7924	1.6812	1.8513	2.0755	1.8513	1.9395
<b>IntraV moy.</b>	<b>1.4762</b>	<b>1.5787</b>	<b>1.6828</b>	<b>1.8471</b>	<b>1.5881</b>	<b>1.6098</b>	<b>1.7514</b>	<b>1.8506</b>

## Expérience 2

a	Condition de référence				Assis Vertical			
	MAJUSCULE		minuscule		MAJUSCULE		minuscule	
Sujets	L'EPOQUE	D'OBJETS	l'époque	d'objets	L'EPOQUE	D'OBJETS	l'époque	d'objets
S1	1.398	1.568	1.653	2.041	1.462	1.462	1.663	1.968
S2	1.279	1.322	1.398	1.380	1.643	1.322	1.740	1.362
S3	1.230	1.362	1.255	1.342	1.230	1.398	1.462	1.748
S4	1.568	1.681	1.851	1.763	1.748	1.748	1.613	1.959
S5	1.301	1.255	1.602	1.940	1.204	1.204	1.623	1.602
S6	1.398	1.556	1.898	1.806	1.301	1.415	1.672	1.892
S7	1.544	1.544	1.568	2.025	1.322	1.380	1.342	1.964
S8	1.342	1.613	1.934	2.086	1.279	1.505	1.602	1.863
S9	1.279	1.230	1.431	1.633	1.279	1.362	1.176	1.544
S10	1.544	1.568	1.919	1.826	1.663	1.623	1.813	2.068
S11	1.491	1.477	1.580	1.643	1.505	1.756	1.924	1.740
S12	1.763	1.748	1.929	1.944	1.580	1.568	1.839	1.851
<b>IntraV moy.</b>	<b>1.428</b>	<b>1.494</b>	<b>1.668</b>	<b>1.786</b>	<b>1.435</b>	<b>1.479</b>	<b>1.623</b>	<b>1.797</b>

b	Debout Horizontal				Debout Vertical			
	MAJUSCULE		minuscule		MAJUSCULE		minuscule	
Sujets	L'EPOQUE	D'OBJETS	l'époque	d'objets	L'EPOQUE	D'OBJETS	l'époque	d'objets
S1	1.380	1.477	1.708	1.820	1.531	1.519	1.771	1.875
S2	1.114	1.431	1.255	1.230	1.477	1.708	1.544	1.898
S3	1.431	1.322	1.491	1.672	1.041	1.362	1.301	1.643
S4	1.462	1.580	1.544	1.699	1.556	1.672	1.740	1.919
S5	1.580	1.362	1.431	1.869	1.322	1.415	1.643	1.556
S6	1.462	1.771	1.732	1.799	1.591	1.602	1.732	1.820
S7	1.322	1.447	1.591	1.602	1.477	1.431	1.568	1.869
S8	1.568	1.663	1.886	1.978	1.447	1.301	1.613	1.633
S9	1.415	1.114	1.398	1.462	1.301	1.176	1.362	1.785
S10	1.415	1.672	1.531	1.929	1.708	1.672	1.672	1.833
S11	1.447	1.716	1.255	1.580	1.591	1.716	1.568	2.053
S12	1.362	1.663	1.839	1.716	1.681	1.699	2.009	1.732
<b>IntraV moy.</b>	<b>1.413</b>	<b>1.518</b>	<b>1.555</b>	<b>1.696</b>	<b>1.477</b>	<b>1.523</b>	<b>1.627</b>	<b>1.801</b>

c	A genoux Horizontal				A genoux Vertical			
	MAJUSCULE		minuscule		MAJUSCULE		minuscule	
	L'EPOQUE	D'OBJETS	l'époque	d'objets	L'EPOQUE	D'OBJETS	l'époque	d'objets
S1	1.322	1.322	1.681	1.987	1.431	1.447	1.591	1.934
S2	1.146	1.279	1.322	1.255	1.114	1.204	1.230	1.380
S3	1.279	1.114	1.322	1.362	1.301	1.362	1.447	1.785
S4	1.342	1.748	1.580	2.124	1.342	1.799	1.556	1.954
S5	1.230	1.301	1.531	1.568	1.716	1.898	1.944	2.090
S6	1.362	1.462	1.623	1.602	1.568	1.613	1.591	1.968
S7	1.146	1.505	1.681	1.681	1.973	1.940	1.929	2.064
S8	1.415	1.255	1.763	1.643	1.568	1.748	1.591	1.833
S9	1.505	1.041	1.301	1.462	1.991	1.633	1.908	1.763
S10	1.826	1.663	1.799	1.968	1.908	1.898	2.009	2.260
S11	1.591	1.602	1.978	1.778	1.903	2.053	2.305	2.294
S12	1.633	1.792	1.964	1.875	1.833	1.633	2.107	1.881
<b>IntraV moy.</b>	<b>1.400</b>	<b>1.424</b>	<b>1.629</b>	<b>1.692</b>	<b>1.637</b>	<b>1.686</b>	<b>1.768</b>	<b>1.934</b>

d	Couché Horizontal				Couché Vertical			
	MAJUSCULE		minuscule		MAJUSCULE		minuscule	
	L'EPOQUE	D'OBJETS	l'époque	d'objets	L'EPOQUE	D'OBJETS	l'époque	d'objets
S1	1.568	1.708	1.833	1.851	1.633	1.964	1.959	2.057
S2	1.114	1.431	1.255	1.230	1.477	1.708	1.544	1.898
S3	1.380	1.362	1.301	1.724	1.556	1.505	1.845	1.732
S4	1.602	1.740	1.820	2.179	1.724	1.813	1.978	2.220
S5	1.568	1.505	1.519	1.771	1.556	1.633	2.037	1.964
S6	1.301	1.613	1.681	1.699	1.544	1.663	1.690	1.813
S7	1.447	1.279	1.580	2.097	1.799	1.863	1.799	2.097
S8	1.279	1.322	1.699	1.799	1.380	1.491	1.857	1.580
S9	1.230	1.176	1.398	1.663	1.724	1.462	1.748	1.778
S10	1.763	1.591	1.491	1.892	1.857	1.771	1.968	1.914
S11	1.633	1.690	1.748	1.914	1.633	1.778	1.643	1.903
S12	1.591	1.699	1.690	1.886	1.940	1.954	1.982	1.799
<b>IntraV moy.</b>	<b>1.456</b>	<b>1.510</b>	<b>1.585</b>	<b>1.809</b>	<b>1.652</b>	<b>1.717</b>	<b>1.838</b>	<b>1.896</b>



### **Annexe 3**

**Sciacca, E., Velay, J. L., Langlois-Peter, M. B., Gilhodes, J. C., Margot, P.** Study of within-subject handwriting variability under usual and unusual writing conditions. *Proceedings of the 13<sup>th</sup> Conference of the International Graphonomics Society* 2007; 110-113

# Study of Within-Subject Handwriting Variability under Usual and Unusual Writing Conditions

Emmanuelle SCIACCA <sup>a, c</sup>, Jean-Luc VELAY <sup>b</sup>, Marie-Blanche LANGLOIS-PETER <sup>a</sup>, Jean-Claude GILHODES <sup>b</sup> and Pierre MARGOT <sup>c</sup>

<sup>a</sup> *Laboratoire de Police Scientifique de Marseille, INPS*

*97. bd. Camille Flammarion*

*13248, Marseille cedex 04, FRANCE*

<sup>b</sup> *Institut de Neurosciences Cognitives de la Méditerranée, CNRS*

*31. ch. Joseph Aiguier*

*13402, Marseille cedex 20, FRANCE*

<sup>c</sup> *Institut de Police Scientifique de Lausanne, Ecole des Sciences Criminelles*

*1015, Lausanne Dorigny, SUISSE*

Emmanuelle.Sciacca@unil.ch, Jean-Luc.Velay@incm.cnrs-mrs.fr.

**Abstract.** In spite of its evident stereotypy, our handwriting is characterized by some intrinsic variability of form: we never write twice exactly in the same manner. The limited within-subject variability that can be observed under usual conditions (UC), sitting and writing on a horizontal support, might be different under unusual conditions (UnC), for instance in an uncomfortable position. This could generate difficulties in attributing handwriting traces acquired in different situations to the same person. In this experiment, we asked the same subjects to write under two very different conditions (UC vs UnC), in order to compare their performance. We determined, under each condition, the number of repetitions necessary to correctly estimate the within-subject variability. Each participant was required to write two words 64 times (32 in upper and 32 in lower case), under UC and UnC (writing on the floor while being on their knees). Tests were carried out with a pen tablet. Written traces were normalized for space and time, and then averaged. The variance was calculated point by point. Preliminary results (3 subjects) showed that, in UC and in UnC, the within-subject variability reached a comparable ceiling and did not change any more beyond 4 to 6 repetitions of the same word (upper or lower case). The experiment is currently carried out with more subjects.

## 1. Introduction

Handwriting examinations made by forensic laboratories may sometimes concern writings carried out in an uncomfortable position and/or on an unusual support. However when the specialist is confronted with questioned writings carried out under unusual conditions (UnC), he/she most of the time only has comparison handwriting carried out under usual conditions (UC). The most frequent UC consists in a writer sitting and writing on a horizontal support located at a standard height (a table). Under such usual conditions, handwriting varies to a certain extent but that does not give any indication of the extent of variation of handwriting under UnC. If the within-subject variability increases, does it still remain significantly lower than the between-subjects variability or does it reach a threshold value that identification of a writer becomes impossible? It is thus important to quantify and compare the extent of both within- and between-subjects handwriting variability, under UC and UnC.

The possible changes of within-subject variability generated by UnC are little considered in forensic science and neuroscience. Forensic scientists, which are more interested in the written trace than in handwriting movements, have mainly described within-subject variability under UC (Hilton, 1983; Kapoor et al., 1985; Eldridge et al., 1984; Huber & Headrick, 1999). Almost the sole aspect of UnC present in the forensic literature is the influence of writing instruments (Osborn, 1929; Mathyer, 1969; Hilton, 1984; Masson, 1985). Basically, these works agree that there is a handwriting consistency whatever the instrument used. The observed differences are either attributed to natural variations of the writer, or to the nature of the instrument which allows or not a reproduction of the writing details, but does not have an influence on the mode of formation of letters (thickness and flexibility of the tip, reaction of the ink on the paper). With regards to the effects of the position of the support or of the body on the graphic trace, those are sometimes evoked, but rarely described (Totty, 1981; Taylor & Hnilica, 1991; Dreger, 1997; Found & Rogers, 1999; Antohie, 2003).

In neuroscience, mainly the kinematic aspects of the writing movements have been studied. The studies were aimed at highlighting invariants, considered as the expression of graphic motor programs (Viviani & Terzuolo, 1980; Van Galen, 1991). The concept of motor equivalence, i.e. the fact that the writing movement is independent of the effector used, is an illustration of that point. Several works were devoted to this invariant characteristic (Bernstein, 1967; Merton, 1972; Raibert, 1977; Wright, 1990; Meulenbroek et al., 1996), but none has quantified it in a precise and objective way, as underlined by Wann and Nimmo-Smith (1990), and Zesiger (1995).

The main goal of this study is to quantify the within-subject variability of writing form, under UC and UnC and to compare within- and between-subjects variability. For that purpose, two steps are necessary. The

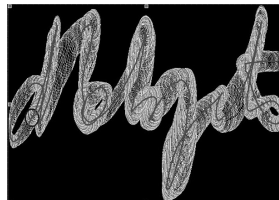
first one is the subject of the present study. Its aim is to determine the number of repetitions necessary to correctly estimate the within-subject variance. It is carried out on a limited number of subjects, in two very different writing conditions on two words. It implies numerous measurements. The second step will be achieved with a greater number of subjects, more conditions and words (a full sentence), and will use the number of repetitions established in the first step, in order to compare within- and between-subjects variances.

## 2. Methods

Three subjects were asked to write two words 64 times (32 in upper and 32 in lower case), under two very different conditions: sitting in front of a table (UC) and staying on their knees on the ground (UnC). We observed the evolution of the variance in function of the number of repetitions, in order to know the number of repetitions beyond which the variance does not change significantly.

**2.1. experimental conditions.** Subjects wrote with an inking pen, on a paper sheet put on a pen tablet (Wacom, Intuos 3). The trajectory (written trace + “in air” displacement) was digitized with a frequency of 100 Hz. Two words were chosen for the experiment: "l'époque" and "d'objets". These words are taken from a "test-sentence" specially designed to contain all the letters of the alphabet, except letter x. Constituted by 8 words from 4 to 6 letters, it contains a large number of diacritical (e.g. apostrophes) and punctuation (e.g. commas) marks, which are known to require very little attention by the writer and reflect the mostly unconscious part of the action of writing (Hilton, 1957). The whole sentence was prepared to be used for the second part of the study. The choice of these two words was partly guided by the hypothesis we made, according to which variability ought to be expressed in an overall uniform way through all the words.

**2.2. data processing.** For each word (7 letters long), the number of points describing the graphic trajectory depends on both the size and duration of writing. They have to be normalized in space, bringing them back to an identical size, and in time, bringing them back to a same number of points in order to quantify the variance. 1500 points were chosen as an adequate and representative number. This allowed to interpolate all the trajectories to make them comparable. Although normalizing in time maximises uncertainty around the middle of the word and thus tends to distort the letters located in the centre of the word (Schomaker and Thomassen, 1986), the obtained mean traces were still recognizable (fig.1). Once normalized in space and time, words were coded by 1500 pairs of (x, y) coordinates. For N repetitions of the same word, it was then possible to calculate the average and variance on x and y, for each of 1500 points. This results in a mean writing trace together with its dispersion, which could be represented by confidence ellipses around the average points (fig. 1). The mean surface of the 1500 ellipses is therefore a measurement of the within-subject variability for a given number of repetitions (N), a given word and under given writing conditions.



**Figure 1:** Mean trace of the word “d’objets” with the confidence ellipses (UC)

## 3. Results

Preliminary results, from three subjects, have currently been processed. For each subject and under each writing condition, we have considered that the theoretical variance was reached for the last repetitions. We thus computed the mean variance between repetitions 24 and 32, for each writer (Table 1).

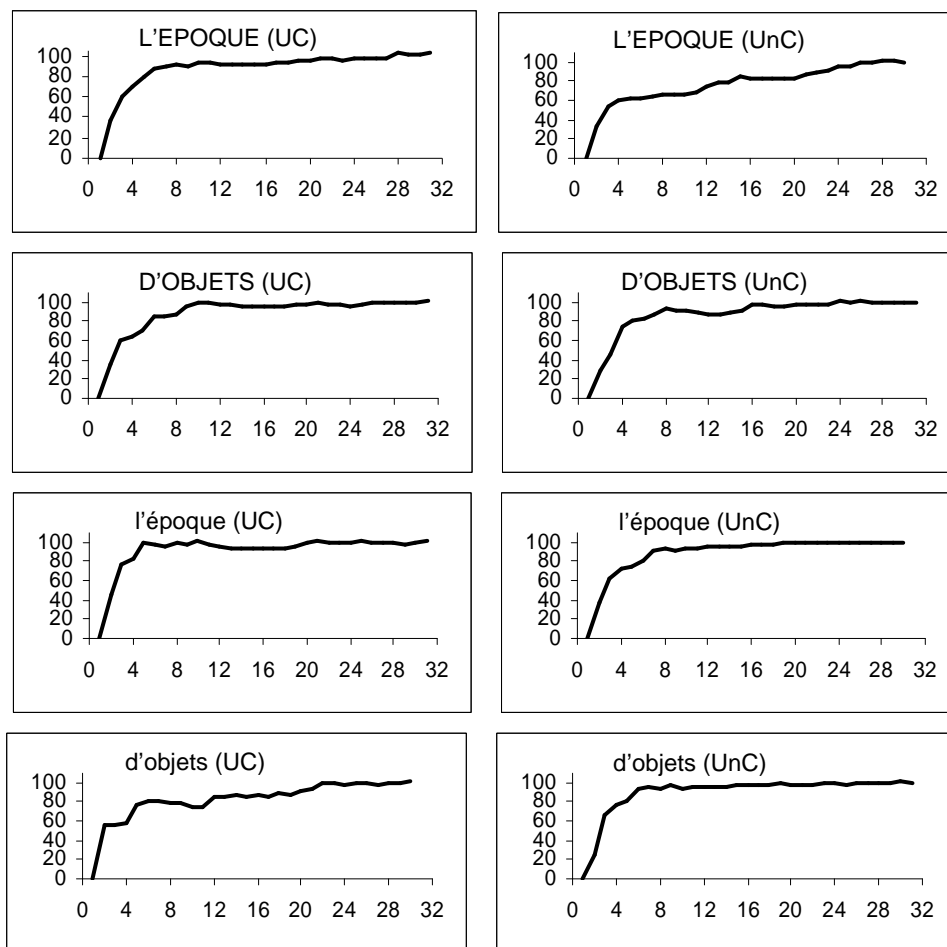
**Table 1:** Mean variances in each condition and for the 3 participants

	Usual Conditions				Unusual Conditions			
	UPPER CASE		Lower case		UPPER CASE		Lower case	
Subjects	L'EPOQUE	D'OBJETS	l'époque	d'objets	L'EPOQUE	D'OBJETS	l'époque	d'objets
S1	42	45	58	105	60	67	82	130
S2	35	40	67	98	40	45	60	100
S3	35	30	37	65	38	35	45	68

**3.1. UC and UnC.** For every word, the mean variance reached under UnC was slightly superior as that reached under UC. This suggests that the diverse conditions of writing studied (different body postures) have a limited influence on handwriting variability.

**3.2. upper and lower case words.** The variability was higher in lower case (75) than in upper case words (40). Furthermore, while variabilities of upper case words were in the same range (40), variabilities of lower case words were different for the two words (around 60 for "l'époque" and 90 for "d'objets"). This suggests that variability is not expressed in a homogeneous way for all words.

**3.3. number of repetitions.** For normalization purposes, the 32 measures of variances in each subject were converted into percent of their mean final value (between repetitions 24 and 32). The individual curves (in percentage) were then averaged between the 3 subjects (fig. 2). As a whole, the number of repetitions required to reach the ceiling was in the same range under UnC than under UC. 4 to 6 repetitions were sufficient to reach 80% of the variability, except for "L'EPOQUE" under UnC, for which 13 repetitions were required. No further measurable variation occurred beyond this. A correct estimation of the variance is thus possible with this minimum number of repetitions.



**Figure 2:** Evolution of the variance (percentage) as a function of number of repetitions

#### 4. Discussion

These results are preliminary since they were obtained from three subjects only but the study is currently extended with a larger sample. Nevertheless, the first information they provide is important before testing other conditions (body postures, instrument...). They already provide the number of repetitions required in order to get a correct estimation of the within-subject writing variability. This value could not be set without any prior indication about its range in the diverse situations. A larger number of subjects will permit to verify whether 4 to 6 repetitions are enough under all conditions or if this number should be increased to assess a correct variance for "L'EPOQUE" under UnC. The second information is that within-subject writing variability was almost in the same range although the posture was very different for both conditions studied. This result is in line with previous observations that claim that the act of writing is not influenced by writing conditions, but more subjects are required for a precise statistical analysis. However, the instrument used, the effector and the

size of letters did not vary in our limited study, which could explain the little differences in variability found between conditions. Furthermore, the measurements were focused on the variance and not on the mean written trace. Because variances may be identical around quite different means, it should be interesting to compare also the mean written traces produced under various conditions, in order to check their similarities and differences.

The difference in variability between words written in lower case might be explained by the greater difficulty required to write "d'objets". In fact, though it is a common word, it contains the "bj" association, which probably appears less frequently in the French language than the "po" or "qu" associations of "l'époque". If this explanation holds, much attention should be paid to the words used to study the within- and between-subjects writing variability in lower case.

## 5. Conclusion

This preliminary study has allowed to determine the number of measurements to be carried out for assessing within-subject variability of handwriting under diverse writing conditions. Thanks to this essential information, it should be possible to quantify within-subject variability under more conditions and with more subjects in order to be able to estimate the within-subject/between-subjects variability ratio. If this ratio remains low under diverse conditions, it will constitute a theoretical argument supporting the approach already used by handwriting experts, which consists in comparing questioned handwriting carried out under UnC with comparison material carried out under UC.

## 6. References

- Hilton, O. (1983). How individual are personal writing habits? *Journal of Forensic Sciences*, 28, 683-685.
- Kapoor, T. S., Kapoor, M., & Sharma, G. P. (1985). Study of the form and extent of natural variation in genuine writings with age. *Journal of the Forensic Science Society*, 25, 371-375.
- Eldridge, M. A., Nimmo-Smith, I., Wing, A.M., & Totty, R. N. (1984). The variability of selected features in cursive handwriting: categorical measures. *Journal of the Forensic Science Society*, 24, 179-219.
- Huber, R. A., Headrick, A. M. (1999). Consistency or natural variation. In *Handwriting identification: facts and fundamentals* (pp. 132-134). Boca Raton: CRC Press.
- Osborn, A. S. (1929). *Questioned documents*, 2<sup>nd</sup> ed. (p. 211). Albany, NY, Boyd Printing Co.
- Mathyer, J. (1969). The influence of writing instruments on handwriting and signatures. *Journal of Criminal Law, Criminology and Police Science*, 60 (1), 102-112.
- Hilton, O. (1984). Effects of writing instruments on handwriting details. *Journal of Forensic Sciences*, 29 (1), 80-86.
- Masson, J. F. (1985). Felt tip pen writing: problems of identification. *Journal of Forensic Sciences*, 30 (1), 172-177.
- Totty, R. N. (1981). A case of handwriting on an unusual surface. *Journal of the Forensic Science Society*, 21, 349-50.
- Taylor, L. L., & Hnilica, V. (1991). Investigation of death through body writing: a case study. *Journal of Forensic Sciences*, 36 (5), 1607-13.
- Dreger, A. A. (1997). Is it authentic? *Canadian Society of Forensic Science Journal*, 30 (3), 97-104.
- Found, B., & Rogers, D. (1999). Documentation of forensic handwriting comparison and identification method: a modular approach. *Journal of Forensic Document Examination*, 12, 1-68.
- Antohie, C. (2003). The disguise – The intentionate modification of the handwriting. *Forensic Science International*, 136, Supplement 1, 80.
- Viviani, P., & Terzuolo, C. A. (1980). Space-time invariance in learned motor skill. In E. G. Stelmach and J. Requin (Ed.), *Tutorials in motor behavior* (pp. 525-533). Amsterdam, North-Holland.
- Van Galen, G. P. (1991). Handwriting: issues for a psychomotor theory. *Human Movement Science*, 10, 165-191.
- Bernstein, N.A. (1967). *The coordination and regulation of movements*. Oxford: Pergamon Press.
- Merton, P. A. (1972). How we control the contraction of our muscles. *Scientific American*, 226 (May), 30-37.
- Raibert, M. H. (1977). *Motor control and learning by the statespace model*. Technical Report AITR-439, Cambridge: Massachusetts Institute of Technology.
- Wright, C. E. (1990). Generalized motor programs: re-examining claims of effector independence in writing. In M. Jeannerod (Ed.), *Attention and Performance XIII* (pp. 294-320). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Meulenbroek, R. G. J., Rosenbaum, D. A., Thomassen, A. J. W. M., Loukopoulos, L. D., & Vaughan, J. (1996). Adaptation of a reaching model to handwriting: how different effectors can produce the same written output, and other results. *Psychological Research*, 59, 64-74.
- Wann, J. P., & Nimmo-Smith, I. (1990). Evidence against the relative invariance of timing in handwriting. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 42A, 105-119.
- Zesiger, P. (1995). *Ecrire: approche cognitive, neuropsychologique et développementale*. Paris : Presses Universitaires de France.
- Hilton, O. (1957). Comment évaluer les différences d'écritures manuscrites? *Revue Internationale de Police Criminelle*, 105, 48-51.
- Schomaker, L. R. B., & Thomassen, A. J. W. M. (1986). On the use and limitations of averaging handwriting signals. In H. S. R. Kao, G. P. Van Galen, & R. Hoosain (Eds.), *Graphonomics: contemporary research in handwriting* (pp. 225-238). North Holland: Elsevier Science Publishers B. V.

## **Annexe 4**

**Sciacca, E., Langlois-Peter, M. B., Gilhodes, J. C., Margot, P., Velay, J. L.** The range of handwriting variability under different writing conditions. *Journal of Forensic Document Examination* 2008; 19 : 5-13

---

## THE RANGE OF HANDWRITING VARIABILITY UNDER DIFFERENT WRITING CONDITIONS

Emmanuelle Sciacca<sup>1,2</sup>, Marie-Blanche Langlois-Peter<sup>1</sup> (corresponding author), Jean-Claude Gilhodes<sup>3</sup>, Pierre Margot<sup>1</sup>, Jean-Luc Velay<sup>2</sup>

---

*Handwriting is characterized by a certain intrinsic variability. However this within-subject variability (WSV) requires quantification. Under usual conditions (UC), the WSV is likely low compared to the between subject variability (BSV), thus requiring a small number of samples in order to determine the identity of the writer. However, the WSV may be greater under unusual conditions (UnC), for instance in an uncomfortable position, thereby reaching values closer to BSV. This would require the examination of a greater number of samples. Here we aimed to investigate whether individual variability changes with writing conditions and measure the number of samples required to identify a particular writer. Twelve subjects were asked to write two word sets 32 times in upper and 32 times in lower case, under two different conditions: sitting on a chair and writing on a table (UC) and kneeling and writing on the floor (UnC). Words were written on a pen tablet, normalized in space and time and then averaged. We then measured the variance from sample 2 to sample 32 under both conditions, as well as the number of samples necessary to reach a stable value corresponding to the correct variance. Results showed only a slight increase in WSV under UnC. Under both conditions, the variability was correctly assessed with 8 to 10 writing samples. The value of BSV was twice that of WSV for lowercase whereas for uppercase letters the BSV/WSV ratio was equal to 1.*

---

**Reference:** Emmanuelle Sciacca, Marie-Blanche Langlois-Peter, Jean-claude Gilhodes, Pierre Margot, Jean-Luc Velay (2008). The Range of Handwriting Variability under Different Writing Conditions. *J Forensic Document Examination*, Vol. 19, pp. 5-13.

**Keywords:** Handwriting, within subject variability, between subject variability, writing conditions, uppercase, lowercase.

---

<sup>1</sup> Laboratoire de Police Scientifique de Marseille INPS, 97, bd Camille Flammarion 13248 Marseille cedex 04 FRANCE.

marie-blanche.langlois-peter@interieur.gouv.fr

<sup>2</sup> Institut de Neurosciences Cognitives de la Méditerranée, CNRS, Université Aix-Marseille II, Marseille, FRANCE

<sup>3</sup> Institut de Police Scientifique de Lausanne, Ecole des Sciences Criminelles, Lausanne, SUISSE

### 1. Introduction

In spite of its evident stereotypy, handwriting is characterized by some intrinsic variability of form. Although very standardized, handwriting motor programs contain some cerebral and/or muscular noise preventing us from always writing in exactly the same manner. For this reason, examinations made by forensic laboratories require several written examples for comparison, in order to reduce the risk of using a non representative sample

of the suspected writer. A priori, the number of samples required to assess the variability depends on the value of the variability itself. Fortunately, under usual conditions (UC), for a writer sitting on a chair and writing on a horizontal support at a standard height (i.e. a table), the handwriting varies only to a little extent, remains recognizable and can be differentiated from that of another writer. Thus, under UC, the number of samples required would likely be low due to the low within subject variability (WSV) compared to the writing differences existing between different persons, the so-called between subject variability (BSV).

However, handwriting examinations made by forensic laboratories may sometimes concern writings performed in an uncomfortable position and/or on an unusual support. Writing under such conditions might be more difficult and the resulting written form more variable. If the variability of handwriting does increase under UnC, the number of samples necessary to make a decision should equally increase.

The possible change in handwriting generated by UnC has been little considered until now. Forensic scientists have mainly described individual variability under UC (Eldridge et al., 1984; Hilton, 1983; Huber & Headrick, 1999; Kapoor et al., 1985). Almost the sole aspect of UnC considered in the forensic literature has been the influence of writing instruments, with all studies agreeing on a consistency in handwriting whatever the instrument used (Hilton, 1984; Masson, 1985; Mathyer, 1969; Osborn, 1929). When differences with respect to UC were observed, they only concerned writing details (thickness and flexibility of the tip, reaction of the ink on the paper) and not the way the letters were formed. The role of the position of the support or of body posture was sometimes evoked, but rarely described (Antohie, 2003; Dreger, 1997; Found & Rogers, 1999; Taylor & Hnilica, 1991; Totty, 1981).

Both neuroscientists and experimental psychologists have been interested in handwriting variability but have only focused on the unvarying kinematic aspects of writing movements. Indeed, they have tried to reveal writing invariants, considered as the expression of graphic motor programs (Van Galen, 1991; Viviani & Terzuolo, 1980). The concept of motor equivalence, i.e. writing movement being independent of the effector used, illustrates this point. Several works have been devoted to this invariant characteristic

(Bernstein, 1967; Merton, 1972; Meulenbroek et al., 1996; Raibert, 1977; Wright, 1990), but none have quantified the writing variability in a precise and objective way, as underlined by Wann and Nimmo-Smith (1990), and Zesiger (1995).

In the present study, we aimed to quantify the individual variability (WSV) in a usual situation (sitting at a table) and an unusual situation (kneeling on the ground). Subjects were asked to write the same word sets several times and a normalization procedure was applied to calculate the variance for each word set. From a practical point of view, it was important to determine how many samples of handwriting a forensic expert needs in order to reliably estimate the variability on the basis of which the identity of the writer can reasonably be inferred. Since we did not know a priori the number of samples required to estimate the variance, we asked the subjects to write each word set a large number of times (32) in order to obtain a correct estimation.

## 2. Methods

### 2.1. Experimental conditions

Twelve subjects (7 women and 5 men, mean age 31 years) were asked to write one word set under two different conditions (figure 1a,b): either sitting in front of a table (UC) or kneeling on the ground (UnC)

Two sets of French words were written: "l'époque" ("the epoch") and "d'objets" ("of objects"). These 7 letter long sets of words were taken from a "test-sentence" specifically designed to contain all the letters of the alphabet. Subjects wrote with an inking pen on a paper sheet placed on a pen tablet (Wacom, Intuos 3). Handwriting



Figure 1a: The two writing conditions studied: Usual condition





Figure 1b: Unusual condition

was digitized with a frequency of 100 Hz. Since handwriting variability may differ between cases, we asked each subject to write the words in both lower and upper cases. In total, each word was written 128 times (2 conditions x 2 cases x 32 repetitions). The experiment was divided into two parts corresponding to the two postural conditions. Half of the subjects began with the sitting condition (UC) and the others by the kneeling condition (UnC). Within each part, the cases and words were randomly alternated. The whole experiment lasted for one hour with two rest periods. The subjects were paid for their participation.

## 2.2. Data processing

For each word set, since the sampling frequency of the pen tablet was 100 Hz, the number of points describing the graphic trajectory depended on both the size and duration of writing. The larger the size

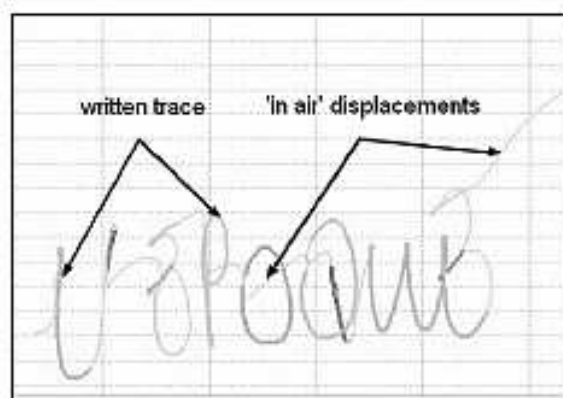


Figure 2: Trajectory of the word "L'EPOQUE" (one trial) under the UC

and/or the slower the speed, the greater the number of points contained in the trace. Consequently, for an identical size and number of points, all the traces had to be normalized respectively in space and time before quantifying the variance. In order to make comparable words of diverse sizes, all words were transformed to be included in the same unitary normalized square. The horizontal and vertical pen coordinates 1 were thus transformed into arbitrary  $(x,y)$  units (with  $0 \leq x \leq 1$  and  $0 \leq y \leq 1$ ). For the time normalization, a total of 1500 points was chosen as an adequate sampling number for the words used. These points included not only the written trace per se, but also the "in air" displacement (fig. 2).

Although normalizing in time maximizes uncertainty around the middle of the word thereby distorting the letters located in the centre of the word (Schomaker & Thomassen, 1986), the obtained mean traces were still recognizable (figure 3). Once normalized in space and time, words were coded as 1500 pairs of  $(x, y)$  coordinates. It was then possible to take the sum of several repetitions of the same word and calculate the mean and variance of each  $x$  and  $y$  coordinate. This resulted in a mean writing trace of 1500 points together with its dispersion indices which could be represented by confidence ellipses around the mean points. The mean trace measured from the 32 repetitions was considered as the average word (fig. 3): this was used to calculate the between subject variability (see section 3.2). The surface of each ellipse was estimated as the

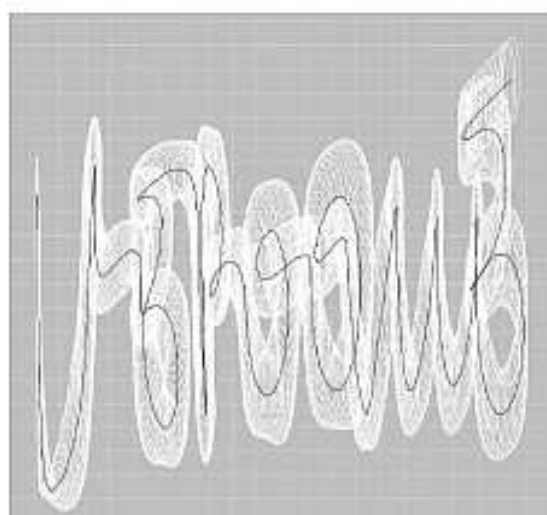


Figure 3: Mean trace (32 trials) of the word "L'EPOQUE" with the corresponding confidence ellipses (UC)

product of the two standard deviations and  $\pi(SD(x) \times SD(y) \times 3.1416)$ . The surfaces were expressed in normalized units ( $\leq 1$ ) however, for avoiding too much decimals, they were multiplied by  $10^4$  and transformed into integers. The mean surface of the 1500 ellipses therefore measured the WSV for a given number of repetitions, a given word and under given writing conditions (Table1).

### 3. Results

#### 3.1. Mean within-subject variability

The variance was iteratively measured after each repetition from the 2<sup>nd</sup> up to the 32<sup>nd</sup>. It increased gradually and reached a plateau after a number of repetitions depending on the subject and condition. Theoretically, the best estimation of the variance of a population would be obtained using a large number of observations. This being the case, the correct theoretical variance would in principle have been reached at the last repetition (the 32<sup>nd</sup>). However, in order to avoid taking only a single value and since the variance appeared not to evolve after around the 10<sup>th</sup> repetition (see fig. 4), we averaged the last values of variance between repetitions 24 and 32. The variances for each subject and under each condition are given in Table 1.

##### 3.1.1. Usual vs. unusual conditions

As a whole, the mean variance reached under UnC (59) was slightly superior to that reached under UC (51). Although this held true for each word set, the

difference failed to reach significance ( $F(1,11) = 3.45$ ,  $p = 0.09$ ). This suggests that the unusual condition of writing studied here (a different body posture) had limited influence on handwriting variability.

##### 3.1.2. Upper vs. lower case words

The mean variability was higher with words written in lower case than those written in upper case (68 vs. 41 respectively,  $F(1,11) = 32.7$ ,  $p < 0.001$ ). No other main effect or interaction reached significance.

##### 3.1.3 Number of repetitions required to estimate the within-subject variability

It was relevant to know how many samples are needed to estimate the WSV in each situation. To do this we had to average 12 individual curves corresponding to the range of variance as a function of sample number. However, since the WSV was very different between subjects (see Table 1) it was first necessary to normalize the values. For each subject and condition, we therefore transformed the 32 measures of variance into percentages of the final variance (100%). As such, we obtained the range of variance between the first and the last repetition for all subjects and conditions. Individual curves (as a percentage) were then averaged between the 12 subjects (fig. 4). As a whole, the number of repetitions required to reach a plateau was in the same range under UnC and UC. Four to eight repetitions were sufficient to reach 80% variability (Table 2)

	Usual Condition				Unusual Condition			
	UPPER CASE		Lower case		UPPER CASE		Lower case	
Subjects	L'EPOQUE	D'OBJETS	l'époque	d'objets	L'EPOQUE	D'OBJETS	l'époque	d'objets
S1	35	40	67	98	40	45	60	100
S2	42	45	58	105	60	67	82	130
S3	35	30	37	65	38	35	45	68
S4	45	70	70	140	130	70	120	130
S5	14	23	29	33	23	23	45	65
S6	23	28	45	85	22	24	45	36
S7	23	22	30	28	22	17	27	23
S8	24	26	34	58	25	26	28	45
S9	36	60	98	89	41	54	79	99
S10	25	30	30	73	27	32	53	60
S11	28	65	64	110	44	56	86	112
S12	50	54	62	48	71	119	71	87
Mean WSV	32	41	52	78	45	47	62	80

Table 1: Mean WSV for each participant (32 repetitions) and for the 12 subjects (last line). WSV are expressed in normalized units (see text).

The Range of Handwriting Variability Under Different Writing Conditions - 9

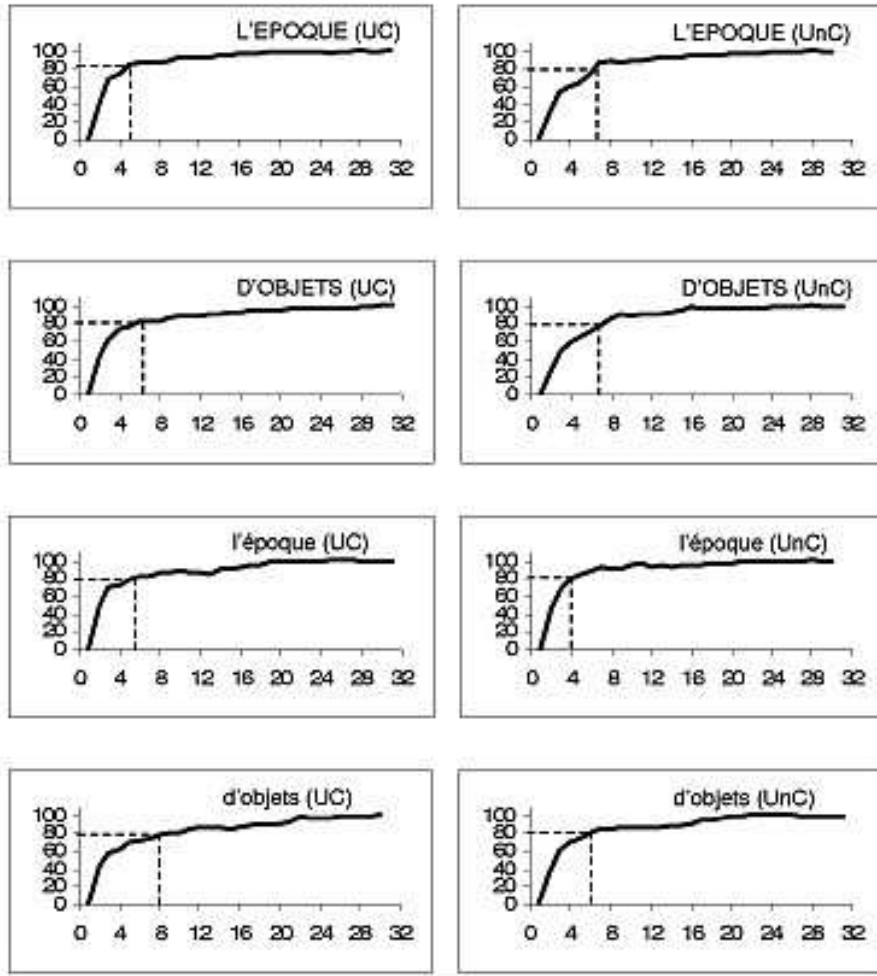


Figure 4: "Variance in percentage" on the Y-axis and "Number of repetitions" on the X-axis

	Usual Condition				Unusual Condition			
	UPPER CASE		lower case		UPPER CASE		lower case	
	L'EPOQUE	D'OBJETS	l'époque	d'objets	L'EPOQUE	D'OBJETS	l'époque	d'objets
Repetitions	5	6	6	8	7	7	4	6

Table 2: Number of repetitions necessary to reach 80% of the final value of variance

	Usual Condition				Unusual Condition			
	UPPER CASE		lower case		UPPER CASE		lower case	
	L'EPOQUE	D'OBJETS	l'époque	d'objets	L'EPOQUE	D'OBJETS	l'époque	d'objets
Mean BSV	34	47	150	199	38	48	174	218

Table 3: Mean BSV under each condition

after which point no further measurable variation occurred. A correct estimation of the variance is thus possible with this minimum number of repetitions.

### 3.2. Mean between-subject variability

In order to calculate the BSV, we used the average traces previously measured from the 32 repetitions (see section 2.2). These curves, each representing the mean individual trace, were in turn averaged across the 12 subjects as though they were a single repetition of the word. The resulting variance was calculated for each word and posture.

The BSV values are given in Table 3. It is relevant to compare the BSV values under all conditions, even if no statistical test is available to validate these comparisons.

The mean BSV reached under UnC was slightly higher than that reached under UC (120 vs. 108 respectively). It was markedly higher for words written in lower case compared to those written in upper case, both under UC (196 vs. 43) and UnC (175 vs. 41).

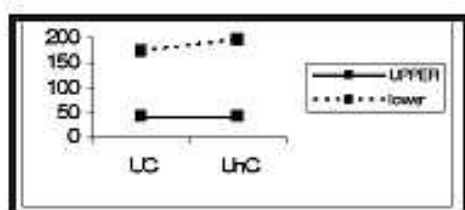


Figure 5: "BSV" on the Y-axis. Range of the BSV as a function of the condition (UC/UnC) and case (upper/lower)

### 3.3. Comparing within and between-subject variability

The BSV was greater than the WSV both under UC (108 vs. 51) and UnC (120 vs. 59). Under both conditions, the BSV/WSV ratio was equal to 2.

For words written in upper case, WSV and BSV were in the same range (41 and 42, BSV/WSV = 0.98), whereas BSV was markedly higher than WSV for words written in lower case (185 vs. 68, BSV/WSV = 2.7). As a whole, both WSV and BSV were greater for words written in lower compared to upper case.

## 4. Discussion

The aims of the present study were twofold: we first wished to find out how many samples are theoretically necessary to identify a given writer, and secondly we wanted to know whether this number

changes under different writing conditions. Although the number of samples of comparison writing is generally constrained by the number of examples available, having the theoretical and empirical arguments to improve precision where possible may prove interesting. The number of samples is linked to the variability: the greater the writing variability, the greater the number of samples required.

To our knowledge, very few studies have specifically focused on handwriting variability and, although it is agreed that handwriting can vary in any given writer, the range of these fluctuations remains largely unknown. The most relevant studies were devoted to ideographic characters which are very different and much more complex than Roman characters (Chinese: Kao, 1983; Li, 2007 or Japanese: Ueda, 2007). As far as Roman characters are concerned, no studies to date have focused on the variability of words, but have instead focused on letters (Eldridge, 1984; Wing, 1987) or segments of letters (Marquis, 2006). In any case, the possible changes in writing variability induced by changes in writing conditions have never been measured. We therefore calculated the WSV when writing a word under usual and unusual postural conditions.

The results show that around 8 repetitions of the same word are required to ensure a reasonable estimation (80%) of the WSV when the writer was sitting. When the writer was kneeling, WSV was almost in the same range and could be estimated with the same number of samples. Thus, handwriting variability did not seem to heavily depend on the writing conditions. This result suggests that when faced with the task of comparing handwriting performed in unusual conditions, forensic experts may work with the same size samples as they do under usual writing conditions.

The between-subject variability is also crucial in handwriting recognition. Recognition is only conceivable if writings from various writers are sufficiently different, in other words if BSV is high. It is thus important to know and consider all conditions that act on BSV. Our results show that BSV is almost constant whatever the writing posture, with a small increase under UnC for lower case words. This suggests that when kneeling, writers tend to modify the way they write to produce a more personalized trace. Paradoxically, identifying writers under these unusual conditions should therefore become easier.

Finally, the ratio between the two variability sources (between- and within-subjects) is a relevant

variable. BSV should be greater than WSV but the theoretical value of the BSV/WSV ratio below which identification would become impossible is currently unknown. In the present study, this ratio was equal to 2, both under usual and unusual writing conditions. In other words, BSV was twice as great as WSV whatever the writing posture. Further confirmation that the ratio is indeed constant across various writing conditions will reinforce the idiosyncratic character of handwriting. Furthermore, this also validates the conventional approach of handwriting experts who often compare examples acquired in conventional writing situations with the handwriting sample under question acquired under different conditions. Interestingly, this ratio varies to some extent with the letter case, becoming close to 1 with upper cases and reaching a value of 2.7 with lower cases. The low values of both within- and between-subjects variability in words written in upper case assign to this type of letter a "more normalized" (less personalized) status, disadvantaging the writer's identification. On the contrary, the low within- and high between-subject variability of words written in lower case confers a "more personalized" characteristic to these letters, and a high discriminatory power in the process of writer identification. This result should be interpreted with caution because of difficulties in testing the differences in BSV using classical statistical tools.

It should be noted, however, that this study, focusing on variance and not on the mean written trace, gives no indication on the variations of form itself. Indeed, identical variances may be observed around quite different means and vice versa. From this point of view, it may be useful to somehow measure the "distance" between the mean written traces produced under various conditions (Ananthakrishnan et al., 2007; Chang & Shin, 2007).

## 5. Conclusion

Although only a preliminary study, the current study has enabled us to estimate the theoretical number of examples required to quantify writing variability. We found that around ten samples are enough to reasonably assess the WSV in future experiments. Nevertheless, the limitations of this study are numerous.

Firstly, the WSV was measured with only four word sets (two word sets in upper- and two in lower cases). The WSV may therefore vary if other words

of different length or containing different letters are used. Furthermore, the method used in the present study to process the handwriting trace included the "in air" pen displacement for the whole word formation. Although limited, these displacements may have an impact on the variability (Rosenblum, 2003). Processing separately those strokes traced on the paper from those in the air would be relevant to establishing whether both types of movements vary to the same extent. Secondly, BSV is the most difficult source of writing variability to deal with: assessing it correctly requires the testing of more subjects than were included in the current experiment and finding statistical tests appropriate to validate the comparisons achieved. Finally, the writing conditions we have compared are not the sole conditions encountered by forensic experts: some other situations may give rise to more variability, in particular when different orientations of the support, different writing tools or greater writing sizes are imposed. We are currently exploring these possibilities.

## 6. References

1. Ananthakrishnan, G., Sen, A., Sundaram, S., & Ramakrishnan, A. G. (2007). Dynamic space warping of sub-strokes for recognition of online handwritten characters. *Proceedings of the 13th Conference of the International Graphonomics Society*, pp. 40-43.
2. Antohic, C. (2003). The disguise – The intentionate modification of the handwriting. *Forensic Science International*, 136, Supplement 1, 80.
3. Bernstein, N.A. (1967). *The coordination and regulation of movements*. Oxford: Pergamon Press.
4. Chang, W. D. & Shin, J. (2007). Dynamic position warping for on-line 2D shape. *Proceedings of the 13th Conference of the International Graphonomics Society*, pp. 36-39.
5. Dreger, A. A. (1997). Is it authentic? *Canadian Society of Forensic Science Journal*, 30 (3), 97-104.

## 12 - 2008 Journal of Forensic Document Examination

---

6. Eldridge, M. A., Nimmo-Smith, I., Wing, A.M., & Totty, R. N. (1984). The variability of selected features in cursive handwriting: categorical measures. *Journal of the Forensic Science Society*, 24, 179-219.
7. Found, B., & Rogers, D. (1999). Documentation of forensic handwriting comparison and identification method: a modular approach. *Journal of Forensic Document Examination*, 12, 1-68.
8. Hilton, O. (1983). How individual are personal writing habits? *Journal of Forensic Sciences*, 28, 683-685.
9. Hilton, O. (1984). Effects of writing instruments on handwriting details. *Journal of Forensic Sciences*, 29 (1), 80-86.
10. Huber, R. A., Headrick, A. M. (1999). Consistency or natural variation. In *Handwriting identification: facts and fundamentals* (pp. 132-134). Boca Raton: CRC Press.
11. Kao, H. S. R. (1983). Progressive motion variability in handwriting tasks. *Acta Psychologica*, 54, 149-159.
12. Kapoor, T. S., Kapoor, M., & Sharma, G. P. (1985). Study of the form and extent of natural variation in genuine writings with age. *Journal of the Forensic Science Society*, 25, 371-375.
13. Li, C. K., Yang, C. T., Poon, N. L., & Fung, W. K. (2007). Significance of sequence of strokes in Chinese handwriting examination. *Journal of Forensic Sciences*, 52(2), 467-472.
14. Marquis R., Taroni, F., Bozza, S. & Schmittbuhl, M. (2006). Quantitative characterization of morphological polymorphism of handwritten character loops. *Forensic Science International*, 164, 211-220.
15. Masson, J. F. (1985). Felt tip pen writing: problems of identification. *Journal of Forensic Sciences*, 30 (1), 172-177.
16. Mathyer, J. (1969). The influence of writing instruments on handwriting and signatures. *Journal of Criminal Law, Criminology and Police Science*, 60 (1), 102-112.
17. Merton, P. A. (1972). How we control the contraction of our muscles. *Scientific American*, 226 (May), 30-37.
18. Meulenbroek, R. G. J., Rosenbaum, D. A., Thomassen, A. J. W. M., Loukopoulos, L. D., & Vaughan, J. (1996). Adaptation of a reaching model to handwriting: how different effectors can produce the same written output, and other results. *Psychological Research*, 59, 64-74.
19. Osborn, A. S. (1929). *Questioned documents*, 2<sup>nd</sup>ed. (p. 211). Albany, NY, Boyd Printing Co.
20. Raibert, M. H. (1977). *Motor control and learning by the statespace model*. Technical Report AITR-439, Cambridge: Massachusetts Institute of Technology.
21. Rosenblum, S., Parush, S., & Weiss, P. L. (2003). The in air phenomenon: temporal and spatial correlates of the handwriting process. *Perceptual and Motor Skills*, 96(3), 933-954.
22. Schomaker, L. R. B., & Thomassen, A. J. W. M. (1986). On the use and limitations of averaging handwriting signals. In H. S. R. Kao, G. P. Van Galen, & R. Hoosain (Eds.), *Graphonomics: contemporary research in handwriting* (pp. 225-238). North Holland: Elsevier Science Publishers B. V.
23. Taylor, L. L., & Hnilica, V. (1991). Investigation of death through body writing: a case study. *Journal of Forensic Sciences*, 36 (5), 1607-13.
24. Totty, R. N. (1981). A case of handwriting on an unusual surface. *Journal of the Forensic Science Society*, 21, 349-50.
25. Ueda, K. & Matsuo, K. (2007). Experimental analysis of variation and individuality of Japanese handwriting, second report: analysis of normal handwriting. *Proceedings of the 13th Conference of the International Graphonomics Society*, pp. 119-122.
26. Van Galen, G. P. (1991). Handwriting: issues

- for a psychomotor theory. *Human Movement Science*, 10, 165-191.
27. Viviani, P., & Terzuolo, C. A. (1980). Space-time invariance in learned motor skill. In E. G. Stelmach and J. Requin (Ed.), *Tutorials in motor behavior* (pp. 525-533). Amsterdam, North-Holland.
28. Wann, J. P., & Nimmo-Smith, I. (1990). Evidence against the relative invariance of timing in handwriting. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 42A, 105-119.
29. Wing, A. M., & Nimmo-Smith, I. (1987). The variability of cursive handwriting measure defined along a continuum: letter specificity. *Journal of the Forensic Science Society*, 27, 297-306.
30. Wright, C. E. (1990). Generalized motor programs: re-examining claims of effector independence in writing. In M. Jeannerod (Ed.), *Attention and Performance XIII* (pp. 294-320). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
31. Zesiger, P. (1995). *Ecrire: approche cognitive, neuropsychologique et développementale*. Paris : Presses Universitaires de France.

## **Annexe 5**

**Sciacca, E., Langlois-Peter, M. B., Gilhodes, J. C., Margot, P., Velay, J. L.** Comparing handwriting variability under four postural conditions. *Proceedings of the 14<sup>th</sup> Conference of the International Graphonomics Society* 2009; 108-111



# Comparing Handwriting Variability under four Postural Conditions

Emmanuelle SCIACCA<sup>a, c</sup>, Marie-Blanche LANGLOIS-PETER<sup>a</sup>, Jean-Claude GILHODES<sup>b</sup>, Pierre MARGOT<sup>c</sup>  
and Jean-Luc VELAY<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Laboratoire de Police Scientifique de Marseille, INPS, 97. bd. Camille Flammarion  
13248, Marseille cedex 04, FRANCE*

<sup>b</sup> *Institut de Neurosciences Cognitives de la Méditerranée, CNRS, 31. ch. Joseph Aiguier  
13402, Marseille cedex 20, FRANCE*

<sup>c</sup> *Institut de Police Scientifique de Lausanne, Ecole des Sciences Criminelles, 1015, Lausanne Dorigny, SUISSE  
Emmanuelle.Sciacca@unil.ch, Jean-Luc.Velay@incm.cnrs-mrs.fr.*

**Abstract.** Forensic document examiners may be confronted with handwriting carried out under unusual conditions (UnC). These atypical circumstances may give rise to more variability of the form of the written word, in particular when different positions of the body or of the support are involved. Here we aimed to investigate whether individual variability changes with special writing conditions. Twelve subjects were asked to write two word sets 8 times in upper and 8 times in lower case, under eight different conditions: sitting and writing on a horizontal (usual condition UC) or vertical support, standing, kneeling and lying (horizontal / vertical surface) (UnC). Words were written on a pen tablet, normalized in space and time and then averaged. We then measured the variance of the 8 words under all conditions. Results showed only a slight increase in variability under the 'lying / vertical' UnC. As a whole, within the four postural conditions tested, handwriting was shown to be very stable.

## 1. Introduction

In spite of its evident stereotypy, handwriting is characterized by some intrinsic variability of form. For this reason, examinations made by forensic laboratories require several written examples for comparison, in order to reduce the risk of using a non representative sample of the suspected writer. A priori, the number of samples required to assess the variability depends on the value of the variability itself. Fortunately, under UC, for a writer sitting on a chair and writing on a horizontal support at a standard height (i.e. a table), the handwriting varies only to a certain extent, remains recognizable and can be differentiated from that of another writer. Thus, under UC, the number of samples required would likely be low due to the low within-subject variability (WSV) compared to the writing differences existing between different persons, the so-called between-subjects variability (BSV).

However, handwriting examinations made by forensic laboratories may concern writings performed in an uncomfortable position and/or on an unusual support. Writing under such conditions might be more difficult and the resulting written form more variable. If the WSV does increase under UnC, the number of samples necessary to make a decision should increase accordingly, making, in the extreme, such comparison pointless. The possible changes in handwriting generated by UnC have only been postulated until now. The role of the position of the support or of body posture was sometimes evoked, but rarely described (Dreger, 1997; Found & Rogers, 1999; Taylor & Hnilica, 1991; Totty, 1981). This study was aimed to determine whether a forensic document examiner would theoretically be able to identify a writer when confronted with peculiar conditions of handwriting.

In a previous study (Sciacca & al., 2009), we compared two writing postures (sitting and kneeling) and we observed that handwriting variability was not affected significantly. We also determined the number of samples of handwriting needed to reliably estimate the handwriting variability and we found that 8 repetitions were sufficient to obtain a correct estimation of the variance. However, the two writing conditions we have compared are not the sole conditions encountered by forensic experts: some other situations may give rise to more variability, in particular when different postures, or writing surfaces tilts, are encountered. This is what we wanted to explore in the present study. We aimed to quantify the individual variability in a usual situation (sitting at a table) and in several unusual postures (standing / kneeling / lying). Furthermore, we wanted to check whether the writing surface tilt (horizontal / vertical) also influences the stability of handwriting. Finally, since we have observed that handwriting variability differed between cases (Sciacca et al., 2009), we asked each subject to write the words in both lower and upper cases.

## 2. Methods

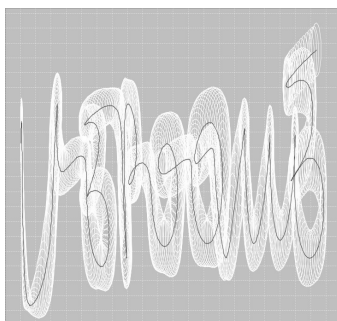
Twelve adult subjects (mean age 31 years) were asked to write two words 16 times (8 in upper and 8 in lower case), under 8 different conditions: sitting and writing on a horizontal (UC) or vertical support, standing, kneeling and lying (horizontal / vertical support) (UnC). We observed the evolution of the variance in function of the condition.

**2.1. experimental conditions.** Two sets of French words were written: "l'époque" ("the epoch") and "d'objets" ("of objects"). Subjects wrote with an inking pen on a paper sheet placed on a pen tablet (Wacom, Intuos 3). Handwriting was digitized with a frequency of 200 Hz. In total, each word was written 128 times (4 postures x 2 tablet tilts x 2 cases x 8 repetitions). For sake of simplicity, the experiment was divided into eight blocks

corresponding to the eight writing conditions (a condition being a given posture of the subject and tilt of the tablet). Each subject began with the sitting condition and continued by the standing / kneeling / lying conditions on the horizontal and vertical support. Within each block, the cases and words were randomly alternated. The whole experiment lasted for one hour with two rest periods.

**2.2. data processing.** All the traces had to be normalized respectively in space and time before quantifying the variance. In order to make comparable words of diverse sizes, all words were transformed to be included in the same unitary normalized square. The horizontal and vertical pen coordinates were thus transformed into arbitrary (x,y) units (with  $0 \leq x \leq 1$  and  $0 \leq y \leq 1$ ). For the time normalization, a total of 1500 points was chosen as an adequate sampling number for the words used. These points included not only the written trace per se, but also the “in air” displacement.

Once normalized in space and time, words were coded as 1500 pairs of (x, y) coordinates. It was then possible to take the sum of several repetitions of the same word and calculate the mean and variance of each x and y coordinate. This resulted in a mean writing trace of 1500 points together with its dispersion indices which could be represented by confidence ellipses around the mean points. The mean trace measured from the 8 repetitions was considered as the average word (fig. 1). Then, this was used to calculate the between subjects variability (see section 3.2). The surface of each ellipse was estimated as the product of the two standard-deviations and pi ( $SD(x) \times SD(y) \times 3.1416$ ). The surfaces were expressed in normalized units ( $\leq 1$ ) however, in order to avoid too many decimals, they were multiplied by  $10^4$  and transformed into integers. The mean surface of the 1500 ellipses therefore measured the WSV for a given number of repetitions, a given word and under given writing conditions.



**Figure 1:** Mean trace (8 trials, single writer ) of the word “L'EPOQUE” with the corresponding confidence ellipses (UC).

### 3. Results

**3.1. Mean within-subject variability.** The mean variances across the 12 subjects under each condition are given in Table 1.

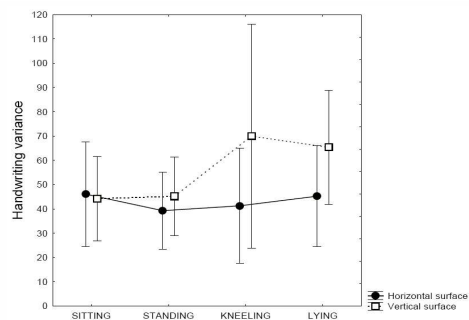
**Table 1:** Mean WSV for the four postures, both tablet tilts and cases. WSV are expressed in normalized units (see text). In bold : mean WSV / condition / case (columns) and mean WSV / posture (lines)

	Mean WSV				
	Horizontal		Vertical		
	UPPER CASE	lower case	UPPER CASE	lower case	
Sitting	31	62	31	58	<b>45</b>
Standing	32	48	34	56	<b>42</b>
Kneeling	30	53	55	86	<b>56</b>
Lying	33	58	52	79	<b>55</b>
	<b>43</b>		<b>56</b>		

**3.1.1. Effect of the writing posture.** As a whole, changing the posture of the writer had an impact on the variance ( $F_{(3, 33)} = 4.16, p=0.0132$ ). The post-hoc tests (HSD Tukey test) showed that only the comparison between 'standing' and 'lying' reached significance ( $p < 0.05$ ). This suggests that the standing and kneeling conditions of writing had some limited influence on handwriting variability.

**3.1.2. Effect of the writing surface tilt.** The mean variability was significantly higher when words were written on a vertical than on a horizontal tablet ( $F_{(1, 11)} = 17.1, p = 0.0017$ ). The posture by tablet tilt interaction was significant ( $F_{(3, 33)} = 6.4, p = 0.0015$ ). In other words, the difference between horizontal and vertical tablet was not identical under all postural conditions (fig. 2). Post-hoc tests showed that changing the tablet tilt gave rise to three

significant comparisons: first, the difference between horizontal and vertical tablet was only significant in the 'lying' position ( $p < 0.05$ ) and second, when the tablet was vertical, the comparisons 'standing' vs. 'lying' and 'kneeling' vs. 'lying' were significant (0.05).



**Figure 2:** Effect of the writing posture and surface tilt

### 3.1.3. Effect of the case

The mean variability was higher in lower than in upper case ( $F_{(1, 11)} = 83.8, p < 0.05$ ). However, the case neither interacted with the writer posture nor with the surface tilt.

**3.2. Mean between-subject variability.** In order to calculate the BSV, we used the average traces previously measured from the 8 repetitions (see section 2.2). These curves, each representing the mean individual trace, were in turn averaged across the 12 subjects as though they were a single repetition of the word. The resulting variance was calculated for each word and posture. The BSV values are given in Table 2. It is relevant to compare the BSV values under all conditions, even if no statistical test is available to validate these comparisons.

**Table 2:** Mean BSV for the four postures, both tablet tilts and cases. BSV are expressed in normalized units (see text). In bold : mean BSV / condition / case (columns) and mean BSV / posture (lines)

	Mean BSV				
	Horizontal		Vertical		
	UPPER CASE	lower case	UPPER CASE	lower case	
Sitting	45	134	40	128	<b>87</b>
Standing	42	150	42	140	<b>93</b>
Kneeling	44	146	49	147	<b>96</b>
Lying	39	137	38	135	<b>87</b>
	<b>92</b>		<b>90</b>		

The mean BSV reached under UnC was in the same range than that reached under UC. As was the case for WSV, it was markedly higher for words written in lower case compared to those written in upper case, both under UC and UnC. As a whole, the BSV was greater than the WSV both under UC and UnC. But when looking at the two different word cases, we observed that for words written in upper case, WSV and BSV were in the same range, whereas BSV was markedly higher than WSV for words written in lower case.

## 4. Discussion

To our knowledge, very limited studies have specifically focused on handwriting variability and, although it is agreed that handwriting can vary for any given writer, the range of these fluctuations remains largely unknown. The most relevant studies were devoted to ideographic characters which are very different and much more complex than Roman characters (Chinese: Kao, 1983; Li, 2007 or Japanese: Ueda, 2007). As far as Roman characters are concerned, no studies to date have focused on the variability of words, but have instead focused on letters (Eldridge, 1984; Wing, 1987) or segments of letters (Marquis, 2006). A recent study was devoted to the impact of postural changes on the dimension of signatures (Equey et al., 2008). However, the possible changes in writing variability induced by changes in writing conditions, independently of the writing size, have never been measured. We therefore calculated the WSV when writing a word under various postural conditions.

Our previous results showed that the WSV did not significantly vary when the writer was sitting or kneeling and the writing surface was horizontal (Sciacca & al., 2007). In these same conditions, the observation is confirmed here. More generally, across the four postures tested, handwriting variability did not heavily depend on the writing posture

when the writing surface was horizontal. This is somewhat different when the surface is vertical. In that case, writing in a lying position induced a clear increase in writing variability. This condition is very uncommon and the combination of the constraints it imposed may have created a particularly uncomfortable writing condition. This was reported by several subjects after the experiment. As a whole, the results of the previous and the present studies showed that, in the range of postures studied, handwriting variability is weakly dependent on the posture of the writer. This tends to validate the conventional approach of handwriting experts who often compare traces acquired under some writing conditions with handwriting samples acquired under different or unknown conditions. These experimental results mean that they are theoretically allowed to do this using samples of comparable size.

It should be noted however that this study, focusing on variance and not on the mean written trace, gives no indication on the variations of form itself. Indeed, identical variances may be observed around quite different means and vice versa. From this point of view, it may be useful to somehow measure the “distance” between the mean written traces produced under various conditions (Ananthakrishnan et al., 2007; Chang & Shin, 2007).

The BSV is also crucial in handwriting recognition. Recognition is only conceivable if writings from various writers are sufficiently different, in other words if BSV is high. It is thus important to know and consider all conditions that act on BSV. Our results show that BSV is almost constant whatever the writing posture, and generally greater than WSV as it should be, otherwise identification would become impossible.

Interestingly, the ratio between the two variability sources (within- and between-subjects) varies to some extent with the letter case. BSV was around 1.5 times greater than WSV with upper cases and up to 2.2 times greater with lower cases. This was the case for all conditions, whatever the writing posture or the tablet position, except under the ‘lying / vertical tablet’ condition because of the high values of WSV. The low values of both within- and between-subjects variability in words written in upper case assign to this type of letter a “more normalized” (less personalized) status, disadvantaging the writer's identification. On the contrary, the low within- and high between-subject variability of words written in lower case confers a “more personalized” characteristic to these letters, and a high discriminatory power in the process of writer identification.

The WSV is stable and does not vary significantly with most common writing conditions. This reinforces the fact that handwriting comparison can be made using similar types of writing even if they may or may not have been written in a comparable position to that of the questioned writing. This study needs to be extended with more subjects in order to better estimate the BSV.

## References

- Ananthakrishnan, G., Sen, A., Sundaram, S., & Ramakrishnan, A. G. (2007). Dynamic space warping of sub-strokes for recognition of online handwritten characters. *Proceedings of the 13<sup>th</sup> Conference of the International Graphonomics Society*, pp. 40-43.
- Chang, W. D. & Shin, J. (2007). Dynamic position warping for on-line 2D shape. *Proceedings of the 13<sup>th</sup> Conference of the International Graphonomics Society*, pp. 36-39.
- Dreger, A. A. (1997). Is it authentic? *Canadian Society of Forensic Science Journal*, 30 (3), 97-104.
- Eldridge, M. A., Nimmo-Smith, I., Wing, A.M., & Totty, R. N. (1984). The variability of selected features in cursive handwriting: categorical measures. *Journal of the Forensic Science Society*, 24, 179-219.
- Equey, C., Marquis, R., Mazzella, W. (2008). Influence of writing posture on the dimensions of signatures. *Journal of the American Society of Questioned Document Examiners*, 10, 53-59.
- Found, B., & Rogers, D. (1999). Documentation of forensic handwriting comparison and identification method: a modular approach. *Journal of Forensic Document Examination*, 12, 1-68.
- Kao, H. S. R. (1983). Progressive motion variability in handwriting tasks. *Acta Psychologica*, 54, 149-159.
- Li, C. K., Yang, C. T., Poon, N. L., & Fung, W. K. (2007). Significance of sequence of strokes in Chinese handwriting examination. *Journal of Forensic Sciences*, 52(2), 467-472.
- Marquis R., Taroni, F., Bozza, S. & Schmittbuhl, M. (2006). Quantitative characterization of morphological polymorphism of handwritten character loops. *Forensic Science International*, 164, 211-220.
- Rosenblum, S., Parush, S., & Weiss, P. L. (2003). The in air phenomenon: temporal and spatial correlates of the handwriting process. *Perceptual and Motor Skills*, 96(3), 933-954.
- Sciaccia, E., Velay, J. L., Langlois-Peter, M. B., Gilhodes, J. C., Margot, P. (2007). Study of within-subject handwriting variability under usual and unusual writing conditions. *Proceedings of the 13<sup>th</sup> Conference of the International Graphonomics Society*, pp. 110-113.
- Sciaccia, E., Langlois-Peter, M. B., Gilhodes, J. C., Margot, P., Velay, J. L. (2009). The range of handwriting variability under different writing conditions. *Journal of Forensic Document Examination*, 19, 5-13.
- Taylor, L. L., & Hnilica, V. (1991). Investigation of death through body writing: a case study. *Journal of Forensic Sciences*, 36 (5), 1607-13.
- Totty, R. N. (1981). A case of handwriting on an unusual surface. *Journal of the Forensic Science Society*, 21, 349-50.
- Ueda, K. & Matsuo, K. (2007). Experimental analysis of variation and individuality of Japanese handwriting, second report: analysis of normal handwriting. *Proceedings of the 13<sup>th</sup> Conference of the International Graphonomics Society*, pp. 119-122.
- Wing, A. M. & Nimmo-Smith, I. (1987). The variability of cursive handwriting measure defined along a continuum: letter specificity. *Journal of the Forensic Science Society*, 27, 297-306.