

Caractérisation des coordonnées et de la vitesse de la pointe du stylo à partir des signaux électromyographiques de l'avant bras

[Characterization of pen-tip coordinates and velocity using electromyographic signals of the forearm muscles]

Inès CHIHI, Afef ABDELKRIM, and Mohamed BENREJEB

LA.R.A. Automatique, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis,
BP37, le Belvédère, 1002 Tunis, Tunisie

Copyright © 2013 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Handwriting is considered as one of the most delicate and complex human activities. This habit requires a certain level of evolution of the language, the control of the graphic space and a certain degree of affective and praxis development. The production of a meaningful and readable writing involves a variety of motor commands generated by the brain and sent to the muscles to define, with an extreme precision, the motion of each joint at a given time. In this paper, two models characterizing the handwriting process are proposed. Using the activities of the forearm muscles, called the ElectroMyoGraphic signals (EMG), the first model is based on the coordinates of the pen-tip moving on (x,y) plan and the second model is defined from the velocity of the pen-tip. The parameters' estimation of both models is determined from the Recursive Least Square algorithm (RLS). The comparison of responses of two proposed structures shows the interest of the velocity to model the complex biological process. Indeed, the model based on the velocity shows best results then the model bases on the coordinates of the pen-tip.

KEYWORDS: ElectroMyoGraphic signals, the coordinates of the pen tip, (x,y) plane, velocity of the pen tip, Recursive Least Square algorithm (RLS).

RESUME: L'écriture à la main est considérée parmi les activités motrices les plus délicates et complexes. Cette habitude motrice nécessite un certain niveau d'évolution du langage, une maîtrise de l'espace graphique et un certain degré de développement moteur, praxique et affectif. La production d'un écrit sensé est lisible fait intervenir une variétés de commandes motrices générées par le cerveau et envoyées aux muscles afin de définir d'une façon extrêmement précise le mouvement de chaque articulation à un instant donné. Dans cet article deux modèles caractérisant le processus d'écriture à la main sont proposés. En utilisant les activités musculaires de l'avant bras, appelées les signaux ElectroMyoGraphiques (EMG), le premier modèle est basé sur les coordonnées de la pointe du stylo en mouvement dans le plan (x,y) et le deuxième est défini à partir de la vitesse de la pointe du stylo. L'estimation des paramètres des deux modèles est déterminée à partir de l'algorithme des Moindres Carrées Récurifs (MCR). La comparaison des réponses des deux structures proposées est également proposée dans ce papier. Cette comparaison nous conduit à conclure l'intérêt de la vitesse de l'écriture manuscrite dans la modélisation de ce processus biologique complexe. En effet le modèle basé sur la vitesse montre de meilleurs résultats par rapport à celui basé sur les coordonnées de la pointe du stylo.

MOTS-CLEFS: Signaux ElectroMyoGraphiques, coordonnées de la pointe du stylo, plan (x,y) , vitesse, estimation des paramètres, Moindres Carrées Récurifs.

1 INTRODUCTION

La production de traces graphiques est considérée comme une manifestation physique d'un processus cognitif complexe. En effet, le cerveau traite l'information de localisation de la pointe du stylo, envoyée par les yeux. Cette information est analysée et évaluée par un système de contrôle intelligent, afin d'envoyer un ordre aux muscles de l'avant bras pour faire bouger la main vers la nouvelle position désirée. En première analyse, Van Der Gon a élaboré un modèle mathématique caractérisant ce phénomène, [1]. Une version électronique est ensuite proposée par Mc Donald qui a considéré le système de l'écriture manuscrite comme une masse se déplaçant dans un milieu visqueux, [2]. Le mouvement de cette masse est décrit par une équation différentielle linéaire du second ordre. Un modèle régi par un système de deux équations différentielles non linéaires du second ordre a été élaboré par Yasuhara qui a intégré l'effet de la force de frottement entre la pointe du stylo et la surface d'écriture, [3]. Il a ensuite identifié et décomposé un système d'écriture rapide, [4]. A partir de ce modèle Iguyer a élaboré deux approches, une pour l'extraction des pulsations de commande, [5], et l'autre pour la reconnaissance de l'écriture arabe cursive, [6].

Edelman et Flash ont élaboré en 1987 un modèle basé sur l'étude des trajectoires de la main, [7]. Une approche de modélisation linéaire obtenue à partir de données expérimentales a été proposée par Sano en 2003, [8].

En utilisant des approches non conventionnelles, des modèles sont proposés pour la caractérisation du processus de l'écriture manuscrite, [9], [10]. Ces modèles sont basés sur les concepts des réseaux de neurones artificiels, de la logique floue, des algorithmes génétiques, etc., [11] et [12].

D'autres modèles utilisant la vitesse ont été présentés dans [13], [14] et [15].

L'écriture est, fondamentalement, une activité et caractéristique individuelle, de la même manière que la voix et le visage d'une personne. Elle reflète l'état psychique et physique du scripteur, [16] et [17].

La vitesse de l'écriture manuscrite d'un même scripteur varie selon son âge, son attitude, son humeur (énervé, pressé, etc), la surface d'écriture, etc. Elle est considérée parmi les propriétés individuelles qui dépendent de plusieurs facteurs à savoir le sexe du scripteur, le niveau culturel, la profession, la manière de tenir le stylo, etc, [17].

Les modèles proposés dans la littérature pour la modélisation du processus à la main, ont contribué à des caractérisations plus ou moins valides d'un nombre limité de formes manuscrites. Pour surmonter ces difficultés, nos travaux de recherches portent sur la modélisation et l'identification ce processus biologique afin de proposer un modèle généralisé caractérisant plusieurs types de traces graphiques générées par un seul ou plusieurs scripteurs. Pour mener à ces études, il est nécessaire de définir une structure mathématique permettant de refléter le mieux possible le comportement réel du processus étudié en prenant en considération les différentes caractéristiques et contraintes en rapport avec ce processus (vitesse, variétés de formes et de personnes, etc).

Dans le cadre de la modélisation du système d'écriture à la main, une approche expérimentale proposée en 2003 par Sano, [8]. Cette approche a permis l'élaboration d'une base d'exemples constituée des coordonnées (x, y) relatives aux déplacements de la pointe du stylo sur le plan de l'écriture, d'un ensemble de lettres arabes et de formes géométriques simples et des enregistrements relatifs aux activités musculaires de deux muscles de l'avant bras intervenants lors de la production des traces graphiques, appelées signaux ElectroMyoGraphiques (EMG). Dans ce cas, les modèles caractérisant l'écriture manuscrite sont déterminés à partir des mesures de type entrée/sortie représentant les seules informations exploitables sur le processus à étudier

A partir des enregistrements expérimentaux, et en utilisant l'algorithme d'identification des Moindres Carrées Récursifs (MCR), nous proposons dans ce papier deux structures mathématiques de caractérisation du processus d'écriture à la main. En effet, la première structure est basée sur les coordonnées de la pointe du stylo. La deuxième structure proposée est définie à partir de la vitesse de la pointe du stylo afin de reproduire différentes formes manuscrites générées par plusieurs scripteurs.

2 MATERIELS

Les déplacements verticaux de la pointe du stylo sont générés par les mouvements de flexion extension des doigts alors que les déplacements horizontaux sont générés par les mouvements d'abduction-adduction du poignet. Les composantes spatiales de la pointe de stylo correspondent aux mouvements des composantes biomécaniques mises en jeu lors de l'écriture, [3].

Les muscles de l'avant bras, intervenant dans l'acte de l'écriture à la main, sont situés directement sous la peau, ce qui permet l'utilisation des électrodes de surface pour enregistrer les signaux EMG. Afin de caractériser ce processus biologique,

Sano a proposé dans [8] une approche expérimentale permettant d'enregistrer en même temps les coordonnées de quelques traces graphiques dans le plan (x,y) et des signaux électromyographiques de l'avant bras, intervenant lors de la production de l'écriture. Ces signaux sont obtenus à partir des électrodes de surface, servant à calculer les activités musculaire deux muscles de l'avant bras, à savoir l'« abductor pollicis longus » et l'« extensor capri ulnaris » .

La figure 1 illustre le montage expérimental et matériel utilisé pour la réalisation de cette approche. Cette approche nécessite un ordinateur permettant d'enregistrer les positions x et y et la pression de la pointe de stylo sur le plan d'écriture.

Ces enregistrements sont obtenus en utilisant une table numérique de la marque « WACOM, KT-0405-RN » comme plan d'écriture, un enregistreur de données, du type « TEAC, AR- C2EMG1 ». La production des traces graphiques est réalisée par plusieurs scripteurs, hommes et femmes, âgés entre 22 et 23 ans. Ces scripteurs confortablement assis, utilisent un crayon optique pour mémoriser dans l'ordinateur les coordonnées des points de la trajectoire d'écriture à une fréquence fixe et les signaux EMG mesurés par des électrodes de surface qui déposées sur l'avant bras du scripteur. La marque des électrodes qui ont servis à cette expérience est « MEDICOTEST, Blue Sensor N-00-S », [8].

La figure 2 indique le positionnement des électrodes sur le bras du scripteur, les électrodes, indiquées par « ch 1 » sont relatives au premier muscle et celles relatives au deuxième muscle sont indiquées par « ch 2 ».

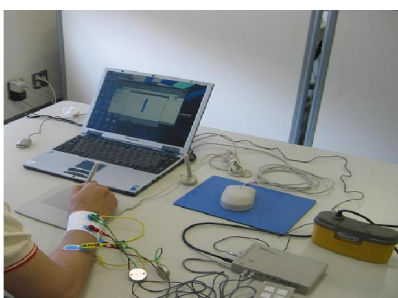


Fig. 1. Montage expérimental

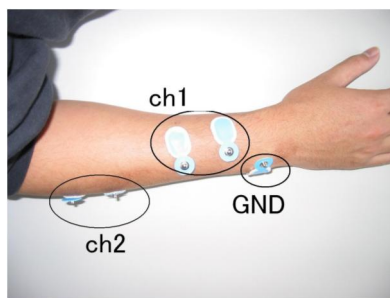


Fig. 2. Positions des électrodes sur le bras du scripteur

L'étude expérimentale, présentée, est réalisée à l'université de Hiroshima City. Ces scripteurs ont écrit plusieurs lettres arabes, et dessiné huit formes géométriques de base, tableau 1.

Tableau 1. Formes géométriques élémentaires choisies pour l'expérimentation

Numéro	Nom de la forme	Représentation de la forme	Numéro	Nom de la forme	Représentation de la forme
1	Ligne horizontale (1) (gauche/droite/gauche)		5	Cercle (1) (vers la droite)	
2	Ligne horizontale (2) (droite/ gauche / droite)		6	Cercle (2) (vers la gauche)	
3	Ligne verticale (1) (gauche/droite/gauche)		7	Triangle (1) (vers la droite)	
4	Ligne verticale (2) (droite/ gauche / droite)		8	Triangle (2) (vers la gauche)	

Les signaux EMG présentent des phénomènes transitoires ou de segments bruités et d'autres signaux perturbateurs d'origines électroniques ou physiques provenant des diverses sources comme les phénomènes électromagnétiques du secteur et les bruits parasites liés aux électrodes et aux incertitudes des mesures [18]. Ceci nécessite l'introduction des approches de traitement de signaux biomédicaux pour obtenir un signal facile à étudier qui est le signal ElectroMyoGraphique Intégré (IEMG).

Dans la figure 3 sont consignées des exemples des signaux EMG et IEMG enregistrés pour les deux muscles choisis, ainsi que les mesures de déplacements de la pointe du stylo (déplacements suivant x et y) pour différentes lettres et formes choisies, [8].

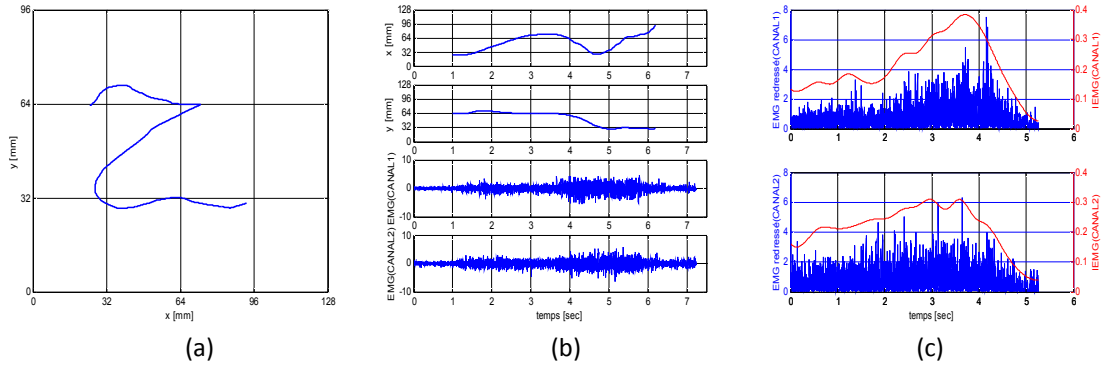


Fig. 3. La lettre « HA »
(a) Forme, (b) Déplacements selon x et y , signaux EMG et (c) Signaux IEMG

3 METHODE D'IDENTIFICATION PAR L'ALGORITHME DES MOINDRES CARRES RECURSIFS (MCR)

L'implantation des algorithmes d'identification non récursifs en temps réel est quasiment impossible dans le cas des systèmes ayant une puissance de calcul et une capacité de stockage de données limitées (microprocesseur, DSP, etc.).

L'estimateur des MCR est une solution des problèmes posés dans l'identification non paramétrique. Il offre, à chaque instant, un traitement séquentiel de données expérimentales disponibles, évoluant au fur et à mesure que le système évolue, [19], [20] et [21].

L'algorithme d'identification des moindres carrés récursifs permet d'obtenir les équations (1) jusqu'à (3).

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + P(k) \sum_{i=n+1}^k y(i) \Psi(i) \quad (1)$$

$$P(k) = P(k-1) - \frac{P(k-1) \Psi(k) \Psi^T(k) P(k-1)}{1 + \Psi^T(k) P(k-1) \Psi(k)} \quad (2)$$

$$\xi(k) = y(k) - \hat{\theta}(k-1) \Psi(k) \quad (3)$$

$\hat{\theta}(k)$ est le vecteur des paramètres
 Ψ est la matrice d'observation
 ξ est le vecteur d'erreur de prédiction

La convergence de cet algorithme dépend des conditions portant sur l'erreur de prédiction et sur la variation des paramètres estimés à chaque pas d'itération, [22] et [23].

4 MODELISATION DU PROCESSUS D'ECRIURE A LA MAIN

L'identification consiste en la détermination, à partir de mesures sur les couples entrées/sorties, des paramètres d'un modèle mathématique, de telle sorte qu'il arrive à reproduire partiellement ou totalement le comportement du système réel dans le domaine de fonctionnement pour lequel il a été établi.

Dans notre cas, les seules informations disponibles sur le processus d'écriture à la main, sont les mesures expérimentales, collectées à partir de l'approche présentée dans la partie (2). L'identification expérimentale qui est basée sur l'analyse expérimentale ou sur un ensemble de mesures relevées sur le système au cours de son fonctionnement, est la meilleure méthode utilisée pour l'élaboration d'un modèle mathématique traduisant le comportement du processus étudié.

4.1 MODELE BASE SUR LES COORDONNEES DE LA POINTE DU STYLO

L'identification des processus nécessite un choix pertinent de la structure mathématique. Afin de caractériser le processus d'écriture à la main en générant le déplacement de la pointe du stylo, x et y selon l'axe des abscisses et l'axe des ordonnées, les entrées du modèle proposé sont les signaux IEMG1 et IEMG2 et les sorties, x et y, à des instants retardés.

4.1.1 RESULTATS DE L'IDENTIFICATION DU MODELE PROPOSE, BASE SUR LES COORDONNEES

La structure proposée est linéaire, du quatrième ordre. Les entrées de ce modèle sont les signaux IEMG aux instants k, (k-1), (k-2), (k-3), (k-4) et les positions x et y retardées jusqu'à l'instant (k-4). Les signaux de sorties de ce modèle sont les positions x et y à l'instant k, équations (4).

$$\begin{aligned}
 x_e(k) &= \sum_{i=1}^4 \hat{a}_{ix} y_e(k-i) + \sum_{i=1}^4 \hat{b}_{ix} x_e(k-i) + \sum_{i=1}^5 \hat{c}_{ix} e_1(k-i+1) + \sum_{i=1}^5 \hat{d}_{ix} e_2(k-i+1) \\
 y_e(k) &= \sum_{i=1}^4 \hat{a}_{iy} x_e(k-i) + \sum_{i=1}^4 \hat{b}_{iy} y_e(k-i) + \sum_{i=1}^5 \hat{c}_{iy} e_1(k-i+1) + \sum_{i=1}^5 \hat{d}_{iy} e_2(k-i+1)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

avec :

- x_e, y_e : la position estimée relative à x et y, respectivement,
- $\hat{a}_{ix}, \hat{b}_{ix}, \hat{c}_{ix}, \hat{d}_{ix}$: les paramètres relatifs au modèle caractérisant la position x_e ,
- $\hat{a}_{iy}, \hat{b}_{iy}, \hat{c}_{iy}, \hat{d}_{iy}$: les paramètres relatifs au modèle caractérisant la position y_e ,
- k : le temps discret.

L'estimateur des moindres carrés récursifs permet de déterminer les paramètres à estimer d'une manière récursive. En effet, la simple mise en œuvre pratique, le temps de calcul relativement faible, ainsi que la capacité réduite de stockage et de traitement des données, nous amène à proposer cet estimateur pour la caractérisation du processus étudié. Les entées du modèle proposé sont les entrées et les sorties à des instants passés du système étudié, les sorties sont déterminées à des instants futurs, [20].

Le modèle proposé est caractérisé par deux vecteurs paramètres θ_x et θ_y relatives aux entrées estimées x_e et y_e , respectivement, ainsi que des matrices d'observation ψ_x et ψ_y , (relatives à x_e et y_e , respectivement), équations (5) et (6).

$$x_e = \psi_x^T \hat{\theta}_x + \varepsilon_x \tag{5}$$

$$y_e = \psi_y^T \hat{\theta}_y + \varepsilon_y \tag{6}$$

Notons que ε_x et ε_y sont les erreurs entre la réponse réelle et celle générée par le modèle proposé.

L'algorithme MCR, avec un facteur d'oubli fixé à une valeur égale à 0.95, est appliqué au système d'équations (4) traduisant le comportement du processus d'écriture à la main. Nous obtenons différentes réponses de la structure proposée pour différents scripteurs et différentes formes et lettres, figure II. 20.

Les données relatives aux sorties qui ont déjà servi à l'identification sont représentées par un trait pointillé, et la réponse du modèle est représentée par un trait rouge plein.

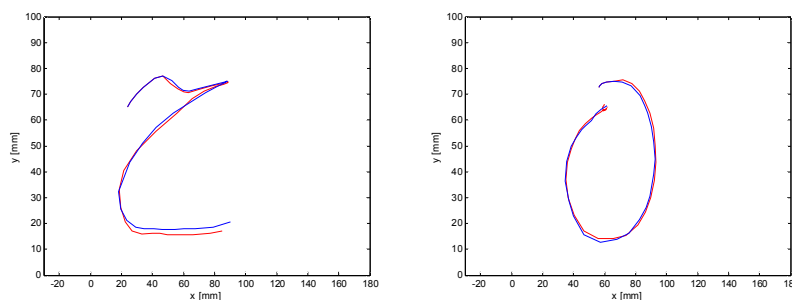


Fig. 4. Comparaison des réponses du modèle proposé et les données expérimentales

Les courbes présentées par la figure 4, montrent une concordance satisfaisante entre les réponses du modèle proposé et les données expérimentales.

Les modèles caractérisant les traces graphiques produites par la même personne ne présentent pas une différence importante entre les paramètres.

La figure 5 illustre l'évolution de quelques paramètres du modèle proposé, $(\hat{a}_{ix}, \hat{b}_{ix}, \hat{c}_{ix}, \hat{d}_{ix})$ et $(\hat{a}_{iy}, \hat{b}_{iy}, \hat{c}_{iy}, \hat{d}_{iy})$ et leur convergence vers une valeur constante. Pour chaque paramètre, la dernière valeur calculée par l'algorithme d'identification est considérée dans l'élaboration des modèles.

Le modèle élaboré est un modèle linéaire du quatrième ordre, à deux entrées et deux sorties. Il génère les traces graphiques à partir des signaux IEMG1 et IEMG2 ainsi que les positions x et y à des instants retardés.

Les allures des paramètres de ce modèle montrent que ces derniers convergent vers des valeurs constantes, ce qui nous amène à proposer des paramètres non variables dans le temps.

4.1.2 VALIDATION ET DISCUSSION

L'identification des processus est achevée par une étape de validation de la structure mathématique proposée. Cette structure n'est valable, en toute rigueur que pour l'expérience à partir de laquelle le modèle a été élaboré. Une vérification du modèle mathématique proposé est nécessaire afin de confirmer la compatibilité de ce dernier avec l'utilisation que l'on en fera.

Cette étape, consiste à proposer des tests qui aident à retenir ou à rejeter la structure élaborée. Lors d'un échec de la validation du modèle proposé, le choix de ce dernier doit être mis en question.

Dans ce sens, une étape de validation est nécessaire pour achever l'identification du processus d'écriture à la main. Cette étape consiste à:

- Vérifier la structure mathématique proposée dans le cas monoscripteur :

C'est-à-dire tester un modèle (1), élaborée pour un scripteur (1) avec des informations sur les entrées/sorties d'un autre exemple de la trace graphique caractérisée par le modèle (1) et écrite par le même scripteur (1).

- Vérifier la structure dans le cas multiscruteurs :

Dans ce cas, nous injectons à un modèle élaboré par un scripteur (1) les données relatives à un scripteur (2) ayant écrit le même type de la forme modélisée.

Des tests permettant de retenir ou de rejeter cette structure proposée pour la caractérisation de ce processus biologique sont présentés dans ce qui suit.

Le tableau 2 présente une différence entre les paramètres relatifs aux modèles représentant différents exemples de la lettre « HA », générés par deux scripteurs.

Une seule personne est caractérisée par une orientation préférentielle bien déterminée, surtout en gardant les mêmes conditions expérimentales (personne confortablement assise, même stylo, même plan d'écriture, etc.). Cependant, nous remarquons que les exemples (2) et (3) relatifs à la lettres « HA » et générés par le scripteur (2) ne sont pas identiques.

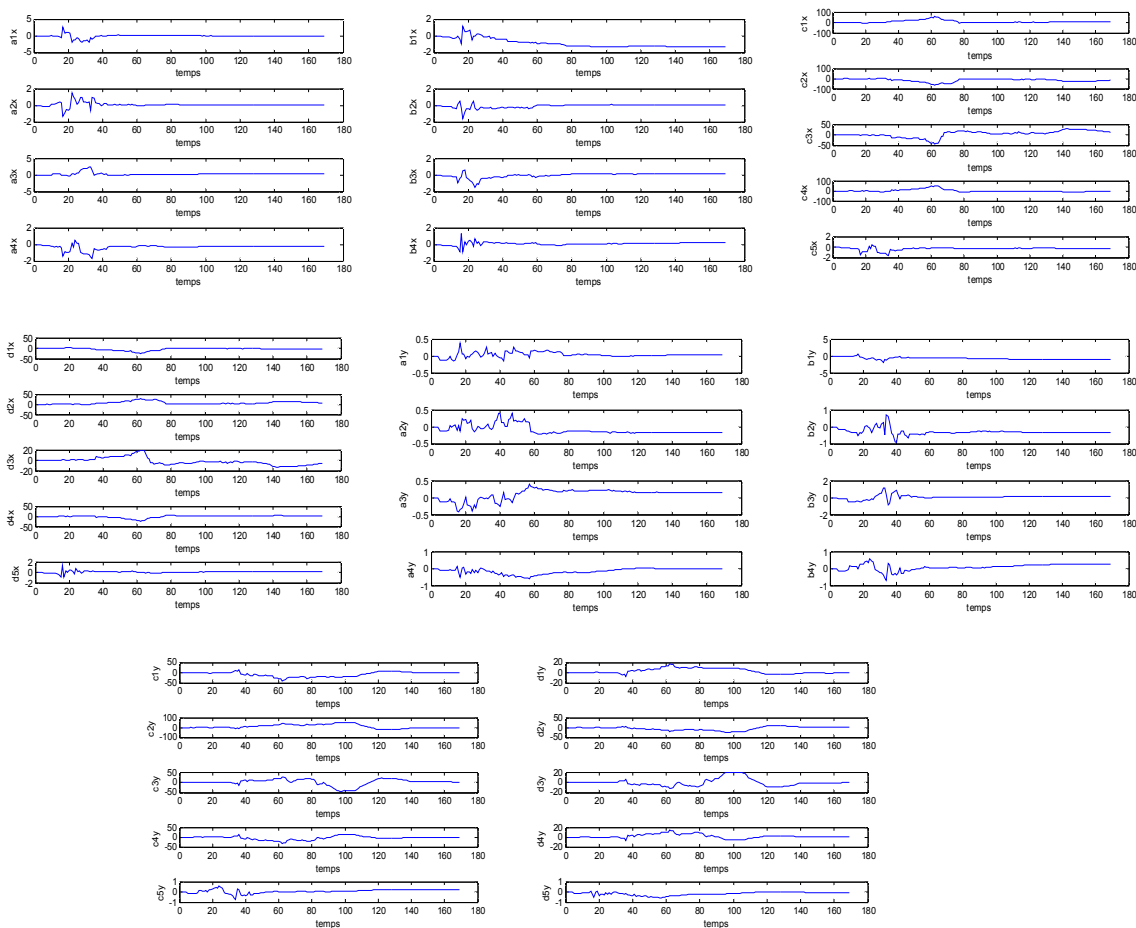





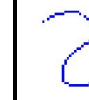


Fig. 5. Evolution des paramètres $(\hat{a}_{ix}, \hat{b}_{ix}, \hat{c}_{ix}, \hat{d}_{ix})$ et $(\hat{a}_{iy}, \hat{b}_{iy}, \hat{c}_{iy}, \hat{d}_{iy})$ relatifs à la forme triangle

Une concordance peu importante est observée entre les paramètres de l'exemple (1), généré par le scripteur (1), et les deux autres écrits par le scripteur (2). Ces deux candidats ont deux orientations préférentielles différentes, les exemples (2) et (3), sont inclinés vers la droite, contrairement au premier exemple qui admet une orientation verticale. Ce qui explique la correspondance peu importante entre les paramètres de deux exemples traduisant les lettres générées par deux candidats différents.

Tableau 2. Paramètres relatifs à différents modèles de la lettre « HA » obtenus par identification pour deux scripteurs

	Paramètres relatifs à la position x			Paramètres relatifs à la position y		
Lettre	HA					
Exemples	Scripteur1	Scripteur2		Scripteur1	Scripteur2	
	exemple1	exemple2	exemple3	exemple1	exemple2	exemple3
Formes						
a_{1yx}	-1.0693	-0.0535	-0.1354	0.0668	-0.1118	-0.0767
a_{2xy}	0.2679	-0.087	0.4467	-0.0241	0.0509	0.1149
a_{3yx}	-3.1452	0.109	-0.3757	-0.0801	-0.052	-0.2008
a_{4yx}	2.0757	-0.079	0.0509	0.0487	0.0048	0.1578
b_{1yx}	1.1714	-1.534	-1.3088	-1.4273	-1.2751	-1.2396
b_{2yx}	-0.0867	0.4394	0.202	0.2184	0.1557	0.1116
b_{3yx}	-0.3597	-0.3006	-0.4615	0.127	-0.1899	-0.2397
b_{4yx}	1.1837	0.4032	0.5846	0.0775	0.3164	0.3412
c_{1yx}	3.0087	-2.5627	-1.9846	0.1450	0.0076	0.0487
c_{2yx}	2.6063	-0.4163	-0.436	0.0269	0.2032	0.1965
c_{3yx}	1.9364	1.211	1.616	-0.0033	-0.0453	-0.0162
c_{4yx}	-2.2827	-2.6607	-0.4256	-0.1724	-0.3644	-0.1289
d_{1yx}	1.0422	2.3007	0.9808	0.2777	0.7652	0.5086
d_{2yx}	-0.1366	-0.7213	-0.3615	-0.1604	-0.377	-0.6141
d_{3yx}	0.9194	0.7898	0.5489	0.1513	-0.041	0.6329
d_{4yx}	-2.6307	-3.3565	-2.0611	-0.3042	-0.3746	-2.9071

En utilisant le principe de validation qu'on a expliqué, les résultats illustrés par la figure 6 montre une certaine correspondance peu satisfaisante entre la réponse du modèle et les sorties relatives aux données expérimentales, dans le cas d'une validation monoscripteur. Des résultats peu satisfaisants sont également observés dans le cas multiscriteurs, figure 7. En résumé, partant uniquement des enregistrements électromyographiques de l'avant bras et des coordonnées de la pointe du stylo. La modélisation et l'identification de la structure proposée pour la caractérisation du processus d'écriture à la main, basée sur l'algorithme MCR a permis de proposer un modèle mathématique, linéaire et d'ordre quatre

L'analyse et les tests de validation du modèle proposé ont montré:

- une erreur très faible, voire négligeable, entre la réponse réelle et la réponse estimée du modèle élaboré pour des données à partir desquelles l'algorithme a été mis en œuvre,
- un écart plus au moins important dans le cas d'utilisation de nouvelles données pour le même scripteur et pour la même lettre ou forme dessinée,
- une erreur non négligeable dans le cas d'utilisation de nouvelles données pour un autre scripteur et pour la même forme ou lettre dessinée.

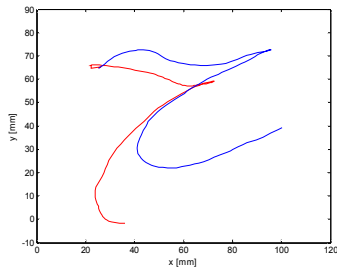


Fig. 6. Validation monoscripteur : Paramètres de l'exemple (2) → modèle de l'exemple (3)

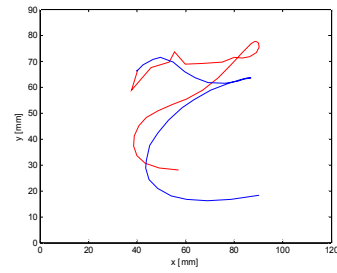


Fig. 7. Validation multiscripteurs : Paramètres de l'exemple (3) → modèle de l'exemple (1)

4.2 MODELE BASE SUR LA VITESSE DE LA POINTE DU STYLO

La synthèse du modèle direct, basé sur le calcul de la vitesse de la pointe du stylo lors de son déplacement dans le plan (x,y) , est élaborée à partir de deux signaux ElectroMyoGraphiques Intégrés de l'avant bras, IEMG1 et IEMG2. L'équation (7) définit la vitesse de la pointe du stylo.

$$\|V(k)\| = \sqrt{V_x(k)^2 + V_y(k)^2} \quad (7)$$

V_x et V_y sont les vitesses selon les axes des x et y , respectivement.

4.2.1 RESULTATS DE L'IDENTIFICATION DU MODELE PROPOSE, BASE SUR LA VITESSE

Le modèle proposé est exprimé par les équations (8).

$$\begin{aligned} V_{xe}(k) &= \sum_{i=1}^4 -[\hat{a}_{ixx} V_{ye}(k-i) + \hat{b}_{ivy} V_{xe}(k-i)] + [\hat{c}_{ixx} e_1(k-i+1) + \hat{d}_{ixx} e_2(k-i+1)] \\ V_{ye}(k) &= \sum_{i=1}^4 -[\hat{a}_{iyy} V_{xe}(k-i) + \hat{b}_{ixy} V_{ye}(k-i)] + [\hat{c}_{iyy} e_1(k-i+1) + \hat{d}_{iyy} e_2(k-i+1)] \end{aligned} \quad (8)$$

\hat{a}_{ixx} , \hat{b}_{ixx} , \hat{c}_{ixx} , \hat{d}_{ixx} , \hat{a}_{iyy} , \hat{b}_{iyy} , \hat{c}_{iyy} , \hat{d}_{iyy} sont les paramètres relatifs aux vitesses estimées V_{xe} et V_{ye} respectivement.

e_1 et e_2 sont les signaux IEMG1 et IEMG2, respectivement.

L'évolution des paramètres, illustrée par la figure 8, montre que ces paramètres convergent rapidement vers des valeurs constantes.

La figure 9 montre quelques exemples de comparaison entre la trajectoire réelle de la pointe du stylo et celle reconstituée par le modèle direct proposé. Une conformité importante est observée entre ces deux trajectoires pour les mouvements simples, les formes géométriques et les lettres arabes.

La ligne discontinue, bleue, représente les données enregistrées de la base et la ligne continue, rouge, représente la réponse du modèle basé sur le calcul de la vitesse.

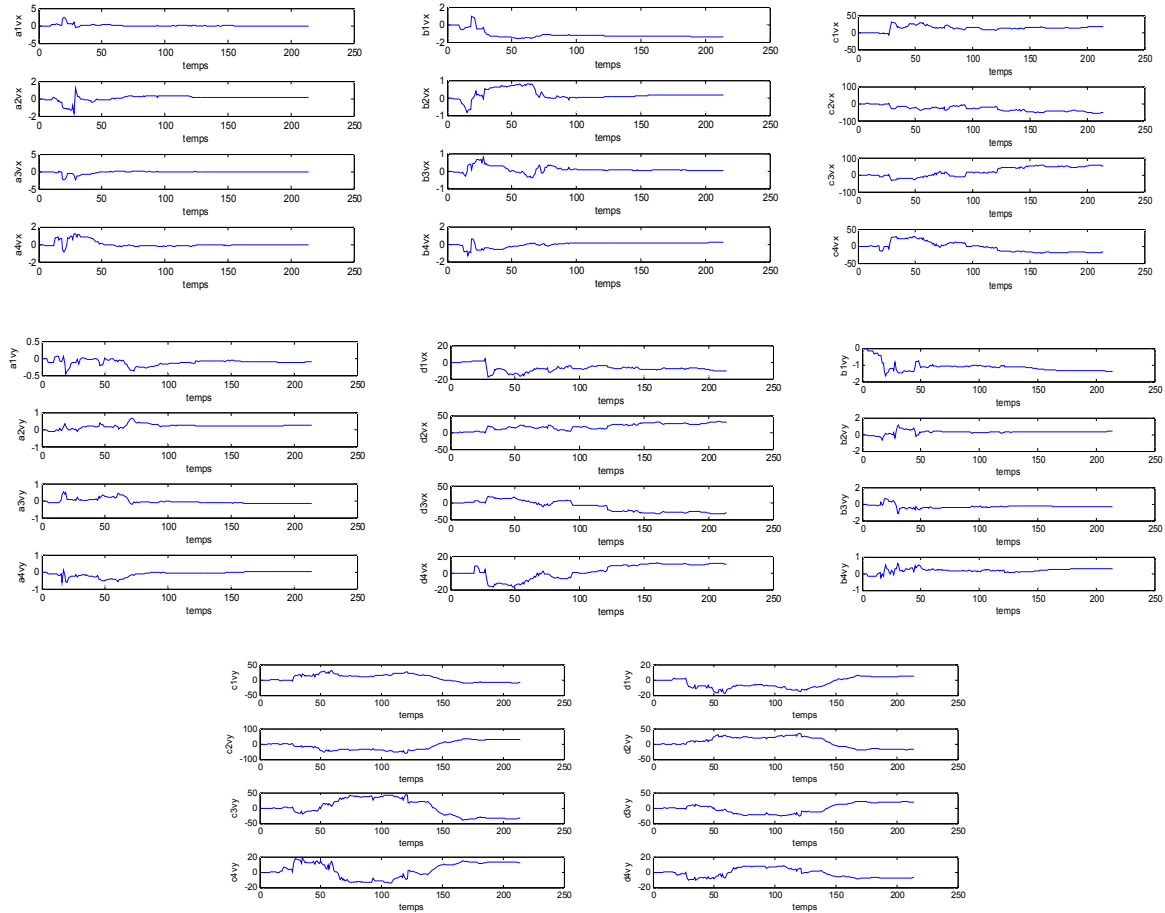


Fig. 8. Evolution des paramètres (\hat{a}_{1vx} , \hat{b}_{1vx} , \hat{c}_{1vx} , \hat{d}_{1vx} , \hat{a}_{1vy} , \hat{b}_{1vy} , \hat{c}_{1vy} , \hat{d}_{1vy}) relatifs à la lettre « HA »

4.2.2 VALIDATION ET DISCUSSION

Dans le cadre de validation du modèle mathématique proposé, deux types de validation sont présentés dans cette partie. La première est proposée pour le cas monscripteur et une deuxième pour le cas multiscriteurs.

La validation monscripteur consiste à intégrer les données d'un modèle caractérisant une lettre ou forme géométrique dans un autre modèle présentant un autre exemple de la trace graphique écrite par la même personne.

La deuxième étape de validation est proposée pour le cas multiscriteurs, elle consiste à appliquer les entrées relatives aux données expérimentales d'une lettre arabe ou d'une forme géométrique de base, à un modèle caractérisant le même type de trace graphique pour un scripteur différents.

Le tableau 3 illustre les paramètres relatifs à la lettre arabe « HA », écrite par deux scripteurs.

Les résultats de validation monscripteur et multiscriteurs, sont montrés par les figures 10 et 11.

La validation de la structure proposée, dans le cas monscripteur et multiscriteurs, montre une correspondance entre les trajectoires réelles et celles reconstruite à partir du modèle proposé.

En comparant ces résultats avec ceux obtenus par validation du modèle basée sur les positions, nous remarquons que l'erreur entre la sortie du modèle et celle enregistrée. Cette amélioration pourrait être due à la vitesse de l'écriture manuscrite, considérée, d'une part, comme un moyen de distinction entre les écritures de différentes personnes et d'autre part de différents états psychiques d'une même personne.

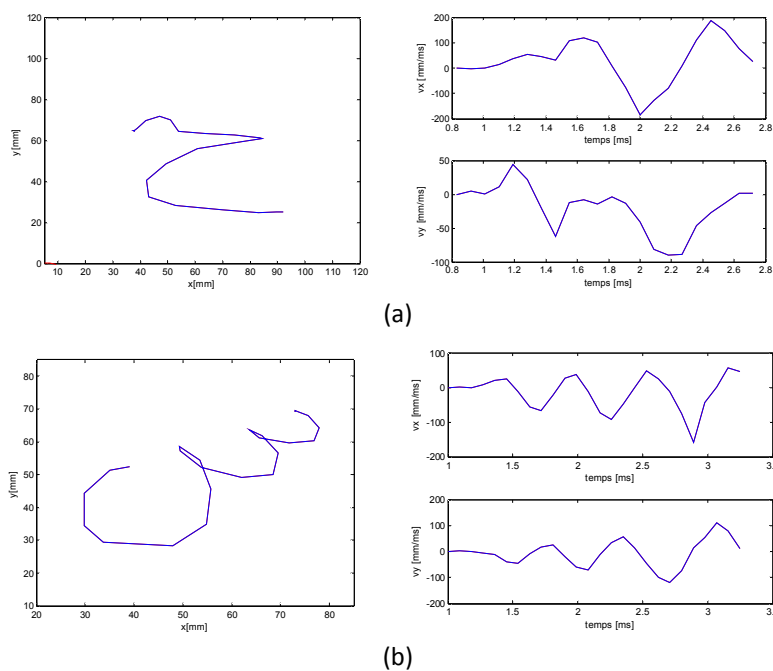


Fig. 9. Réponses du modèle proposé basé sur la vitesse de la pointe du stylo (forme et vitesses selon les axes x et y)

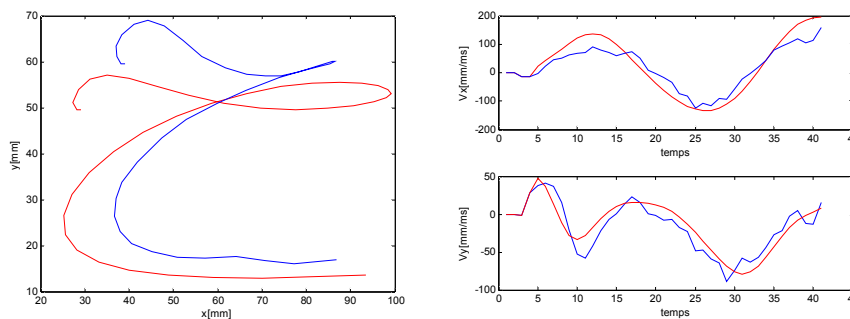


Fig. 10. Résultats de validation dans le cas monoscripteur (forme, vitesses selon les axes x et y)

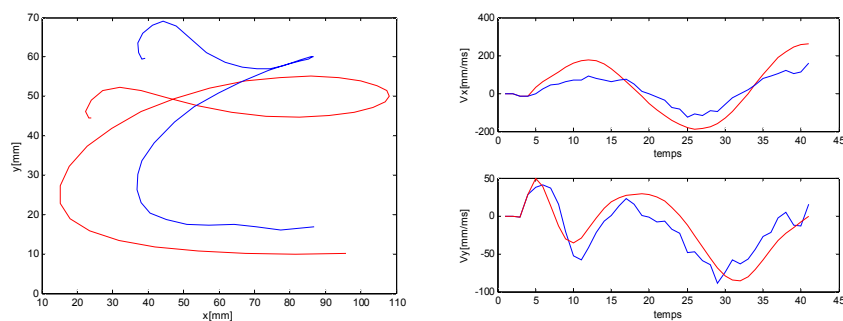








Fig. 11. Résultats de validation dans le cas multiscripteurs (forme, vitesses selon les axes x et y)

Tableau 3. Paramètres relatifs à différents modèles de la lettre « HA » obtenus par identification pour deux scripteurs (modèle direct)

	Paramètres relatifs à la position x			Paramètres relatifs à la position y		
Lettre	HA					
Exemples	Scripteur1	Scripteur2		Scripteur1	Scripteur2	
	exemple1	exemple2	exemple3	exemple1	exemple2	exemple3
Formes						
a_{1yx}	0.1184	0.0310	0.0615	-0.7490	-1.0811	0.9257
a_{2yx}	-0.3816	0.0255	-0.1192	-0.2997	1.3020	-1.2438
a_{3yx}	0.0721	-0.0633	-0.0554	1.9701	2.0120	1.3596
a_{4yx}	1.0778	0.1612	0.1216	-0.8389	-1.8569	-0.0450
b_{1yx}	1.1534	2.1280	-1.7652	-1.3206	-0.9389	-1.9139
b_{2yx}	-0.9776	2.0594	0.6710	0.5402	-0.3174	0.8692
b_{3yx}	0.2781	-0.6558	0.2085	-0.5141	-0.1619	-0.2143
b_{4yx}	-1.5650	-0.6502	-0.1159	0.4383	0.5832	0.2561
c_{1yx}	-1.0938	-0.7995	0.7932	3.6287	1.8997	2.3732
c_{2yx}	-1.2707	0.9445	2.2539	-11.0354	-4.2695	-5.6656
c_{3yx}	4.6653	1.7699	2.4364	4.3254	3.2910	5.3856
c_{4yx}	-1.1018	0.2716	-1.0172	-1.4171	-1.4450	-1.9553
d_{1yx}	-0.0732	-0.4455	-0.4919	1.3134	6.9266	-1.0667
d_{2yx}	1.0902	0.9567	1.3458	-0.8896	-1.4966	0.4276
d_{3yx}	1.8816	-0.8145	-1.6401	1.3555	0.9244	-4.2803
d_{4yx}	-0.4668	1.8674	0.8371	3.5058	0.5038	1.0552

5 CONCLUSION

L'exploitation de l'algorithme d'identification des moindres carrés récursifs a permis d'estimer les paramètres des structures mathématiques proposées pour la caractérisation du processus d'écriture à la main. Ces modèles sont élaborés en exploitant des enregistrements, obtenus à partir d'une base expérimentale qu'on a présenté. Cette base permet d'enregistrer les activités musculaires de l'avant bras et les coordonnées de la pointe du stylo selon les axes x et y . En effet le premier modèle proposé dans ce chapitre est fondé sur la relation entre ces enregistrements. En utilisant les vitesses de l'écriture, un modèle direct et un autre inverse sont également proposés.

Les résultats de tests et de validations de ces structures sont satisfaisants dans le cas d'un modèle élaboré pour des données à partir desquelles l'algorithme a été mis en œuvre. Un écart est toujours constaté dans le cas d'utilisation de nouvelles données avec les paramètres d'un scripteur différent pour la même lettre ou forme. L'intégration de nouvelles données avec les paramètres d'un scripteur différent pour la même trace graphique montre une erreur acceptable entre la réponse du modèle et celle désirée. Les modèles basés sur les vitesses de la pointe du stylo présentent un ordre inférieur par

rapport à celui fondé sur les coordonnées de la trace graphique manuscrites. Ils présentent également des résultats affinés même pour les graphes les plus compliqués (lettre « SIN », lettre « HA », etc).

L'approche de modélisation et d'identification paramétrique proposée dans ce chapitre caractérisant le processus d'écriture manuscrite s'est relevée concluante. Cependant il est intéressant d'améliorer les modèles mathématiques proposés afin de représenter plusieurs types de traces graphiques produites par un seul ou plusieurs scripteurs. La solution de ce problème est abordée dans le chapitre suivant, consacré à la représentation multimodèles pour la modélisation du processus d'écriture à la main.

REFERENCES

- [1] D. Van Der Gon, J.P Thuring et J. Strackee «A handwriting simulator», *Physics in Medical Biology*, pp. 407-414, 1962.
- [2] J.S. Mac Donald, «Experimental studies of handwriting signals», Ph. D Dissertation, Mass. Inst. Tech., Cambridge, 1964.
- [3] M. Yasuhara, «Experimental studies of handwriting process», *Rep. Univ. Electro-Comm.*, vol. 25 no 2, pp. 233-254, Japon, 1975.
- [4] M. Yasuhara, «Identification and decomposition of fast handwriting process», *IEEE Transactions on Circ. And Syst.*, vol. 30, no 11, pp. 828-832, 1983.
- [5] Y. Iguider et M. Yasuhara, «Extracting control pulses of handwriting movement, *Trans. of the Soc». Inst. and Cent., Eng.*, vol. 31, no 8, pp. 1175-1184, 1995, (Japon, 1995).
- [6] Y. Iguider, M. Yasuhara, «An active recognition pulses of handwriting isolated Arabic characters», *Trans, of the Soc. Inst. And Cont., Eng.*, Vol. 32, N°8, pp. 1267-1276, 1996, (Japon, 1996).
- [7] S. Edelman et T. Flash, «A model of handwriting», *Biological Cybernetics*, Volume 57, pp. 25-36, Springer Verlag, 1987.
- [8] S. Manabu, T. Kosaku et Y. Murata, «Modeling of Human Handwriting Motion by Electromyographic Signals on Forearm Muscles», *CCCT'03*, 2003, (Orlando-Florida, 2003).
- [9] M. Benrejeb, F. Bouslama, M. Ayadi et M. Sano, «Studying and modelling handwriting process», *ACIDCA'2000, Vision and Pattern Recognition*, pp. 124-129, 2000, (Monastir, 2000).
- [10] M. Benrejeb, A. El Abed-Abdelkrim, S. Bel Hadj Ali et M.Gasmi, «A neuro-fuzzy internal model controller for handwriting process», *CESA*, 2003, (Lille, 2003).
- [11] A. Abdelkrim, « Contribution à la modélisation du processus d'écriture à la main par approches relevant le calcul évolutif », Thèse de Doctorat, ENIT, Tunis, 2005.
- [12] M. Benrejeb, M. Sano et A. El Abed-Abdelkrim, « Conventional and non conventional models of the handwriting process: differential, neural and neuro-fuzzy approaches », *TIWSS'01*, pp. 46-50, 2001, (Tokyo, 2001).
- [13] M.A. Alimi, «Contribution au développement d'une théorie de génération de mouvements simples et rapides. Application au manuscrit», Thèse de Doctorat, Université de Montréal, 1995, (Canada, 1995).
- [14] R. Plamondon, « A kinematics theory of rapid human movements ». Part I : Movement representation and generation, *Biological Cybernetics*, vol. 72, pp. 295-307, 1995.
- [15] R. Plamondon, « A kinematics theory of rapid human movements », Part II: Movement time and control, *Biological Cybernetics*, vol. 72, pp. 309-320, 1995.
- [16] N. S. Bernstein, «The co-ordination and regulation of movements», Pergamon Press, Oxford, 1967
- [17] I. Sallagoïty, « Dynamique de coordination spontanée de l'écriture », Thèse de Doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2004.
- [18] F. de Coulon, « In Théorie et traitement des signaux », Presses Polytechniques Romandes, vol. 6, Lausanne, 1984.
- [19] R. en Abdennour, P. Borne, M. Ksouri et F. M'salhi, « Identification et commande numérique des procédés industriels », Edition Technip, 2001.
- [20] I. D. Landau, « Identification et commande des systèmes », Hermès, Paris, 1993.
- [21] M.Gerves et T.Kailath, «An innovation approach to least-squares estimation-part VI: Discrete-time innovations representations and recursive estimation». *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 18, no 6, pp. 720-727, Décembre, 1973.
- [22] P. Borne, G. Dauphin-Tanguy, J-P. Richard, F. Rotella et I. Zambettakis, « Modélisation et identification des processus », Tome 1, Technip, Paris, 1992.
- [23] P. Borne, G. Dauphin-Tanguy, J-P. Richard, F. Rotella et I. Zambettakis, « Modélisation et identification des processus », Tome 2, Technip, Paris, 1992.
- [24] T. Tutunji, M. Molhim et E. Turki, « Mechatronic systems identification using an impulse response recursive algorithm, *Simulation Modelling Practice and Theory* », vol. 15, pp 970-988, 2007.