

Identification et commande numérique des procédés industriels en utilisant LabVIEW: Réalisation pratique

R. Taleb, A. Benyamina, F. Chabni, A. Mekrelouf et A. Namoune*

Laboratoire Génie Electrique et Energies Renouvelables, LGEER
Département d'Electrotechnique, Université Hassiba Benbouali
de Chlef Hay Salem, Route Nationale N°19, 02000 Chlef, Algérie

(reçu le 20 Avril 2017 - accepté le 25 Juin 2017)

Résumé - *L'objectif de ce travail est d'apporter des contributions à une méthodologie intégrée pour l'identification et la commande des procédés industriels en temps réel. La première ambition de proposer une réalisation d'un outil d'identification et de commande numérique, puis faire appliquer la commande PI, PID, RS, RST, RSTM et floue sur un système de pompage d'eau et un moteur à courant continu. Nous avons proposé une méthode qui conduit rapidement au calcul d'un régulateur robuste pour un large nombre d'applications réelles en suivant les trois étapes fondamentales: acquisition des données E/S, identification du modèle, calcul du régulateur.*

Abstract - *The objective of this work is to make contributions to an integrated methodology for the identification and real time control of industrial processes. The first aims to propose a realization of a tool for identification and control and then enforce the PI controller, PID, RS, RST, RSTM and fuzzy on a water pumping system and a DC motor. We proposed a method which leads quickly calculates a robust regulator for a large number of real applications by following three basic steps: acquisition of I/O data, identification of the model calculation of the regulator.*

Mots Clés: Commande robuste - Identification des systèmes - Synthèse de régulateurs - LabVIEW - Procédés industrielles.

1. INTRODUCTION

Le contrôle a une place fondamentale dans les systèmes industriels et les avantages qui dérivent ses utilisations sont énormes [1, 2]. Nous citons parmi autres l'amélioration de la qualité des produits, la réduction de la consommation d'énergie, la réduction de la pollution et la minimisation des coûts de production.

La disponibilité des techniques de commande avancées issues de la communauté de l'automatique, et les avantages que leur mise en œuvre peut apporter, poussent les ingénieurs confrontés aux problèmes de commande à faire recours à des outils pour la régulation toujours plus performants.

La commande des systèmes par ordinateur est largement diffusée dans le milieu industriel. A chaque boucle de régulation, ou presque, correspond une loi de commande implémentée sur microcontrôleur, automate programmable industriel (PLC), ordinateur ou autre dispositif numérique.

L'identification est une opération qui consiste à déterminer les paramètres du modèle dynamique d'un système à partir de mesures réalisées à l'entrée et à la sortie de ce système [3-6].

C'est la connaissance du modèle qui permet de concevoir et de mettre en œuvre la commande du système qui est soumis à des signaux tests (en entrée), donne une réponse (dynamique et statique en sortie) la plus proche possible du système réel. Un processus identifié sera caractérisé par la structure du modèle.

* namoune.abdelhadi@gmail.com

L'objectif de notre travail est de développer un outil d'identification et commande numérique des procédés industriels (simulateur de pompe d'eau et moteur MCC) en temps réel en utilisant LabVIEW.

2. PRESENTATION DU SIMULATEUR DE POMPAGE D'EAU

Le banc d'essai réalisé est un simulateur d'un système de pompage d'eau présenté dans la figure 1.

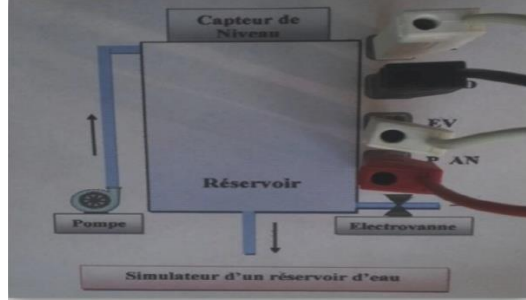


Fig. 1: Simulateur du système de pompage d'eau

Le simulateur contient quatre connexions:

- LT: Sortie analogique du capteur de niveau (1 volt / 1 mètre).
- GND: La masse du montage.
- EV: Electrovanne de commande du débit de fuite de type TOR.
- P_AN: Signal de commande de la pompe de remplissage (0-10 V).

Le système a un comportement de premier ordre de la fonction de transfert suivante:

$$T(s) = \frac{1}{4,7s + 1} \quad (1)$$

Le système précédent peut représenter sous le schéma fonctionnel décrit dans la figure 2.

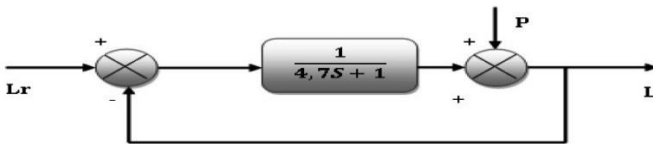


Fig. 2: Schéma bloc de la régulation en cascade de niveau

Avec,

- L_r : niveau de référence.
- L : niveau mesuré.
- P : perturbation d'électrovanne.

3. MODELE ECHANTILLONNE DU SYSTEME DE POMPAGE D'EAU

Le modèle échantillonné s'obtient:

- Par discrétisation du modèle continu.
- Directement par identification du procédé.

On discrétise la fonction de transfert contenu avec une période d'échantillonnage $T_s = 0.1s$ et un bloquer d'ordre zéro, on obtient:

$$T(z) = \frac{0.02105 z^{-1}}{1 - 0.9789 z^{-1}} \quad (2)$$

Pour l'identification, on utilise deux méthodes, non récursives et récursives.

3.1 Identification non récursive

Nous avons utilisé l'outil SCID_DT-LOG (voir annexe) pour l'acquisition des signaux E/S et les sauvegarder sans un fichier data, puis le faire traiter à l'aide d'outil SCID_ID-NR. Le signal d'excitation est un signal binaire pseudo aléatoire avec une amplitude de 62% de la consigne maximale (Figure 3).

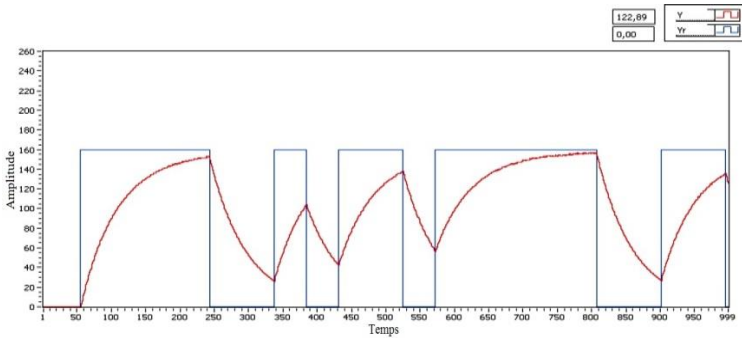


Fig. 3: Repense du système excité par un signal SBPA

Nous avons utilisé la méthode d'identification des moindres carrés [7-9] simples pour le modèle ARX (Equations 3 et 4, figure 4) et la méthode des moindres carrés étendus pour le modèle ARMAX (Equations 5, 6 et 7, figure 5).

$$A(z^{-1}) = 1 - 0.9814 z^{-1} \quad (3)$$

$$B(z^{-1}) = 0 + 0.014 z^{-1} \quad (4)$$

$$A(z^{-1}) = 1 - 0.9814 z^{-1} \quad (5)$$

$$B(z^{-1}) = 0 + 0.018 z^{-1} \quad (6)$$

$$C(z^{-1}) = 1 - 0.385 z^{-1} \quad (7)$$

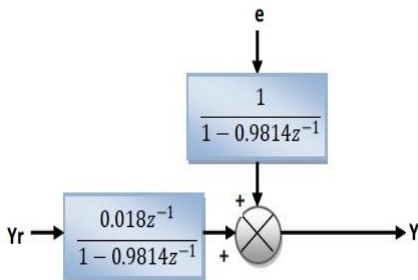


Fig. 4: Schéma bloc du Modèle ARX identifié

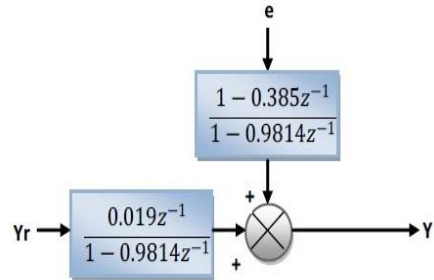


Fig. 5: Schéma bloc du Modèle ARMAX identifié

3.2 Identification récursive

On a utilisé l’outil SCID_ID-R pour l’identification récursif des paramètres du procédé SCID_ID-R permet d’une identification récursive d’un modèle ARX ou ARMAX (figures 6 et 7).

L’outil d’identification a donné de très bons résultats, avec une comparaison entre les modèles identifiés et le modèle discrétisé. On remarque qu’il y a une petite différence due au limitation des CAN et CNA et à l’effet non linéaire du procédé. Avec la méthode d’identification récursive, on constate que les paramètres convergent vers des valeurs finies parce que le système est invariant dans le temps.

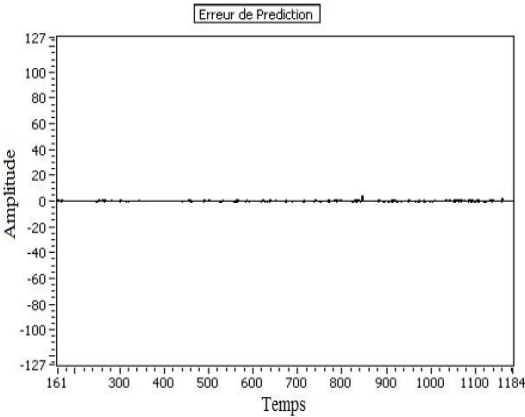


Fig. 6: Erreur de prédiction entre le modèle réel et le modèle estimé

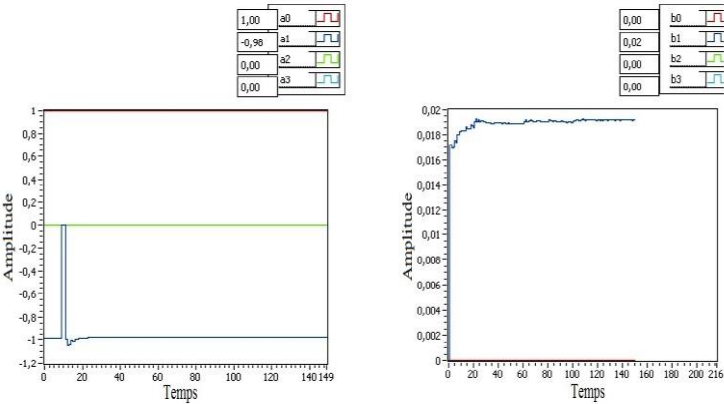


Fig. 7: Identification récursif des paramètres du modèle avec SCID_ID-R

4. COMMANDE DE PROCEDE

Le comportement du procédé en boucle ouverte a une erreur statique nulle, mais il ne rejette pas les perturbations et en boucle fermé, il y a une très grande différence entre la consigne et la mesure alors il est obligatoire d’introduire un régulateur dans la boucle fermée du système (figure 8).

Les spécifications pour la commande d’un système sont souvent liées aux caractéristiques de la réponse indicielle. Le temps de réponse t_r est le temps nécessaire pour attendre 5% de la consigne spécifiée. Le dépassement maximal M_p est la valeur

maximale que le système peut attendre divisée par la valeur de régime (souvent exprimée en pourcentage).

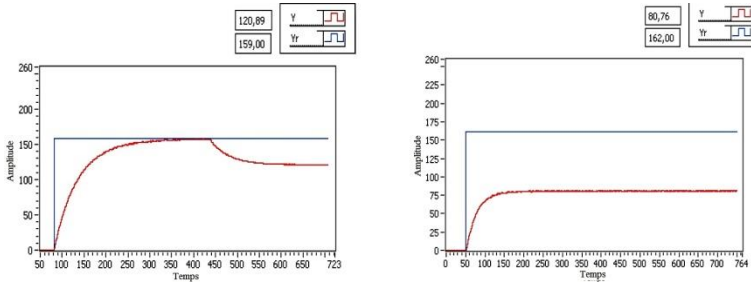


Fig. 8: Comportement du système en boucle ouverte (à gauche) et fermée (à droite)

Le polynôme caractéristique désiré est obtenu à l'aide de l'outil SCID_CH, on choisit seulement le temps de réponse t_r , le dépassement M_p et la période d'échantillonnage t_s (figure 9).

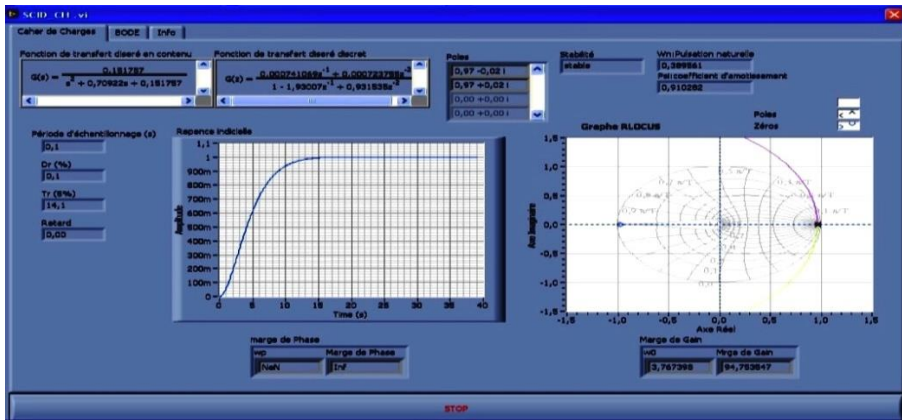


Fig. 9: Spécifications des performances dans l'outil SCID_CH

On souhaite que le système ait un temps de repense le plus court possible avec un rejet des perturbations de type échelon. On a choisit un temps de réponse $t_r = 14.1s$ et un dépassement $M_p = 0.1\%$. Le polynôme caractéristique désiré est:

$$P(z^{-1}) = 1 - 1.93007 z^{-1} + 0.93153 z^{-2} \quad (8)$$

4.1 Calcul des régulateurs

Le calcul des paramètres des régulateurs se fait à l'aide des outils SCID_PID-RST et SCID_RST suivant l'équation 8.

4.1.1 Régulateur PI numérique

Il est impossible d'obtenir le cahier des charges président avec un régulateur PI, donc on le change avec un temps de réponse $t_r = 14.1s$ et un dépassement $M_p = 5\%$, donc le polynôme caractéristique désiré est:

$$P(z^{-1}) = 1 - 1.92z^{-1} + 0.93z^{-2} \quad (9)$$

avec: $K_p = 2.91$ et $T_i = 0.032$ min.

4.1.2 Régulateur polynomial RS

$$R(z^{-1}) = 2.85167 - 2.77056z^{-1} \quad (10)$$

$$S(z^{-1}) = 1 - z^{-1} \quad (11)$$

4.1.3 Régulateur polynomial RST

$$R(z^{-1}) = 2.85167 - 2.77056z^{-1} \quad (12)$$

$$S(z^{-1}) = 1 - z^{-1} \quad (13)$$

$$T(z^{-1}) = 0.0811111 \quad (14)$$

4.1.4 Régulateur polynomial RST avec modèle de référence (RSTM)

Pour la régulation, on a choisi les mêmes performances que le régulateur RST précédent, et on désire un comportement plus rapide pour la poursuite avec un temps de réponse $t_r = 10s$ et un dépassement $M_p = 0\%$. Donc le modèle de référence désiré est:

$$\frac{B_m}{A_m} = \frac{0.0012091 z^{-1} + 0.00116946 z^{-1}}{1 - 1.90246 + 0.904837 z^{-1}} \quad (15)$$

Les polynômes R, S et T sont:

$$R(z^{-1}) = 2.85167 - 2.77056z^{-1} \quad (16)$$

$$S(z^{-1}) = 1 - z^{-1} \quad (17)$$

$$T(z^{-1}) = 55.5556 - 107.226z^{-1} + 51.7517z^{-2} \quad (18)$$

4.1.5 Régulateur PID numérique

Le calcul des paramètres du régulateur PID est fait par la méthode PID1 équivalent d'un RST, avec $K_p = 2.77$, $T_i = 0.0569$ min, $T_d = 0$ et $N = 0$.

4.1.6 Régulateur Flou (FLC)

Il y a des cas où il est impossible d'identifier le procédé lorsque ce dernier procède à des non linéarités ou varie au cours du temps, donc on utilise des régulateurs modernes comme les régulateurs flous (FLC) [10, 12].

Dans notre travail, nous avons choisi trois ensembles flous pour les deux variables d'entrée (E et dE) et pour la variable de sortie, ces ensembles sont: Grand Négatif, Environ Zéro et Grand Positif.

Le **Tableau 1** montre la Matrice d'inférence utilisée. Les gains GE, GdE et GS sont choisis par la méthode essais erreurs (GE = 1, GdE = 2 et GS = 7).

Tableau 1: Matrice d'inférence

E	dE	NG	EZ	PG
NG		NG	NG	EZ
EZ		NG	EZ	NG
PG		EZ	PG	PG

4.2 Résultats expérimentaux

Les commandes en temps réel sont faites par les outils, SCID_RST-RT et SCID_PID_RT (figure 10).

Dans des conditions de fonctionnement nominales, on peut remarquer que la consigne de niveau est bien suivie par la sortie du système en contre-réaction avec le PI, mais avec un dépassement de 5% et un temps de réponse lent du à la limitation du PI, d'un point de vue régulation, le système a bien rejeté la perturbation d'ouverture d'une électrovanne.

Avec le régulateur RS, on obtient presque les mêmes performances que le régulateur PI, mais avec un temps de réponse plus rapide.

Les régulateurs RST et RSTM donnent presque les mêmes performances, seulement que le RSTM donne un meilleur temps de réponse. Le régulateur flou donne des meilleures performances, un temps de réponse très rapide et un excellent rejet de perturbation.

En conclusion, les régulateurs RSTM et FLC sont les meilleurs choix pour réaliser une commande performante. Dans le **Tableau 2**, nous résumons les résultats de réalisation obtenus pour les six régulateurs.

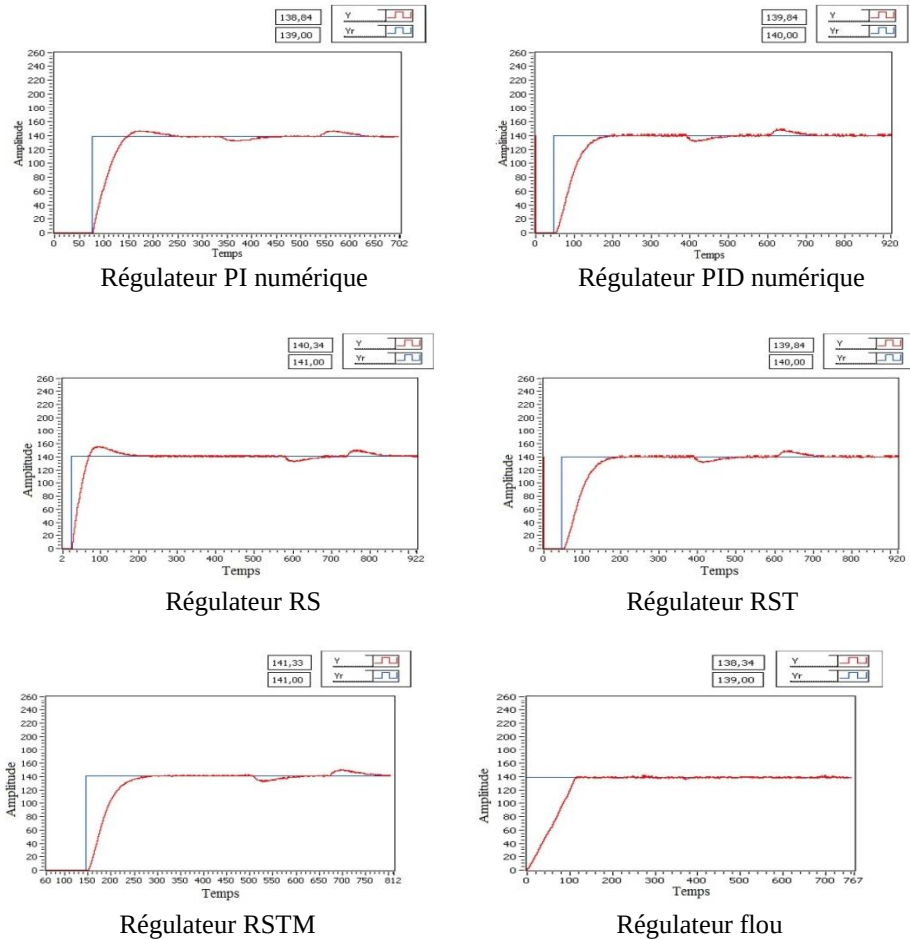


Fig. 10: Comportement du procédé avec des régulateurs numériques

Tableau 2: Comparaison entre PI, PID, RS, RST, RSTM et FLC

	PI	PID	RS	RST	RSTM	FLC
Temps mis pour atteindre la valeur finale (s)	16.5	13	15	13	12	11
Dépassement (%)	10	0	14	0	0	0
Coût d'exécution	faible	faible	faible	moyen	moyen	Elevé
Robustesse à la variation des paramètres du modèle	faible	faible	faible	faible	faible	grande

5. COMMANDE DE LA VITESSE D’UN MOTEUR A COURANT CONTINU (MCC)

Le moteur à courant continu (figure 11) joue un rôle crucial dans la recherche scientifique dans les laboratoires en raison de leur simplicité et leur faible coût. La propriété fondamentale du moteur à courant continu est que la vitesse peut être ajustée.

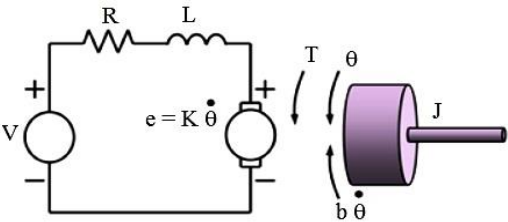


Fig. 11: Schéma d’un entraînement avec un MCC à aimant permanent

5.1 Modèle mathématique du MCiC

Equations électriques [13]

$$V = R_i + L \frac{di}{dt} + e b \tag{19}$$

Equations mécaniques [13]

$$J \ddot{\theta} = T_{em} - b \dot{\theta} - C_r \tag{20}$$

$$e = K_e i \tag{21}$$

$$T_{em} = K_t \tag{22}$$

Fonction de transfert

$$T(s) = \frac{\dot{\theta}}{V} = \frac{K}{(j.s + b)(L.s + R) + K^2} \tag{23}$$

5.2 Commande du MCC en temps réel

Le moteur est commandé par un hacheur série et le logiciel SCID en temps réel (figure 12).

La tension de sortie d'un hacheur et la forme du courant de MCC sont représentés par la figure 13.

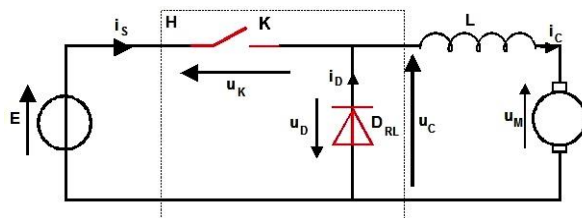


Fig. 12: Commande d'une MCC avec un hacheur série

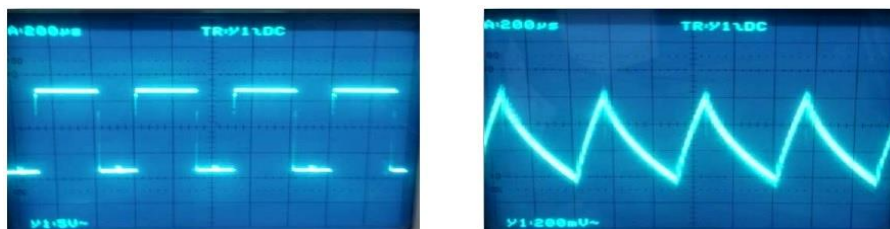


Fig. 13: Tension de charge du hacheur série (à gauche) et forme du courant de MCC (à droite)

Le moteur utilisé est un moteur à courant continu à aimant permanent, a une tension d'alimentation de 16V connecté à une génératrice tachymétrique (figure 14). La figure 15 présente le comportement du moteur en boucle ouverte et fermé.

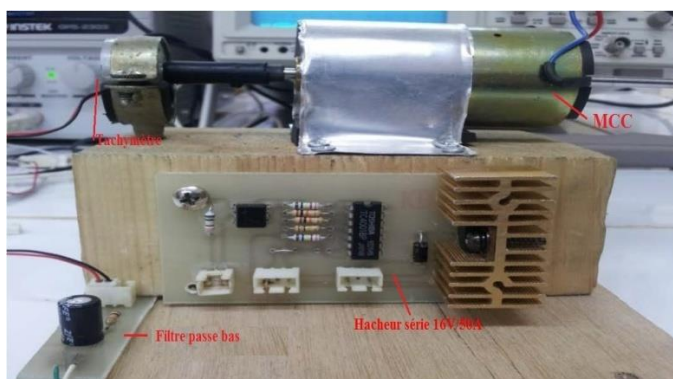


Fig. 14: Banc d'essai de commande du MCC

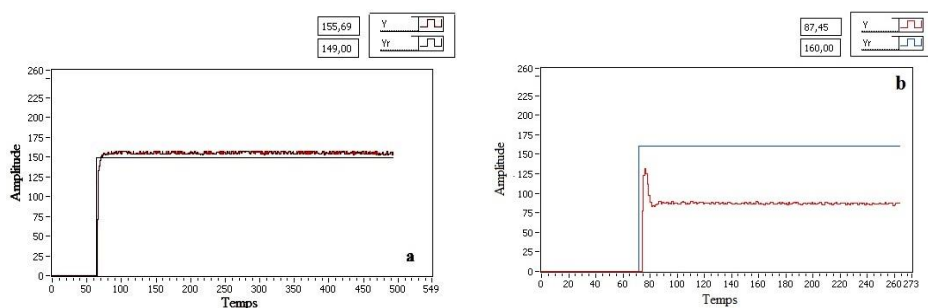


Fig. 15: Comportement du moteur en boucle ouverte (à gauche) et fermé (à droite)

5.3 Commande de vitesse avec PID numérique et flou

- avec régulateur PID numérique: La régulation était avec des paramètres déterminés de manière expérimentale par la méthode de Ziegler-Nichols ($K_p = 2.4$, $T_i = 0.00133$ et $T_d = 0.000333$).
- avec régulateur flou: Nous avons utilisé le même régulateur flou de premier procédé mais avec des gains défient ($GE=0.1$, $GdE = 0.2$ et $GS = 1$).

La figure 16 présente le comportement du moteur avec PID numérique et flou.

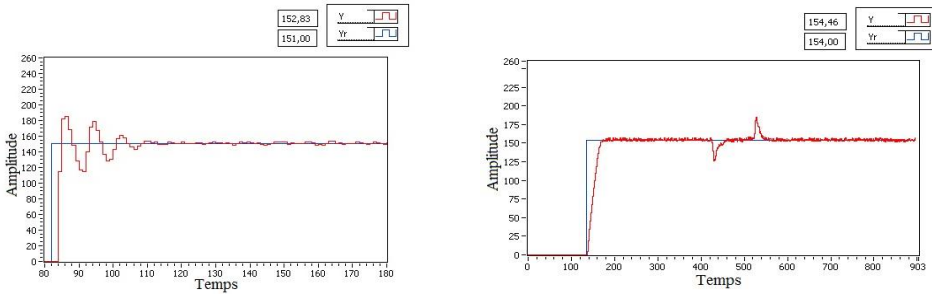


Fig. 16: Comportement du moteur avec PID numérique (à gauche) et flou (à droite)

On peut remarquer que la consigne est bien suivie par la vitesse mesuré du moteur avec la régulation PID mais avec certain déplacement et des oscillations. Par contre le régulateur FLC offre de très bonnes performances, un faible temps de repense un dépassement nulle malgré la non linéarité du système.

6. CONCLUSION

Le travail présenté dans cet article a concerné la définition et la mise en oeuvre d'une méthodologie intégrée pour l'identification et la commande d'une classe d'applications industrielles. Nous avons appliqué les méthodes d'identification et de commande sur le système de pompage d'eau à l'aide de l'outil SCID pour pouvoir analyser le comportement et comparer les résultats.

Les résultats trouvés ont confirmé l'efficacité de la logique floue. En effet, le régulateur flou donne des meilleures performances, un temps de réponse très rapide et un excellent rejet de perturbation. Pour le moteur à courant continu (MCC), nous avons constaté un problème de limitation de la commande linéaire face au comportement variant et non linéaire.

Nous avons résolu ce problème à l'aide des commandes modernes basées sur l'intelligence artificiel, l'utilisation d'un régulateur flou a donné des très bons résultats.

7. ANNEXE (DESCRIPTIONS DU PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'OUTIL DEVELOPPE)

L'outil d'identification et de régulation en temps réel réalisé est constitué d'une carte d'interface (SCID USB_DAO) pour l'acquisition et la génération des signaux de commande et un outil SCID de traitement en temps réel installée sur un micro-ordinateur. Le schéma synoptique de la structure de l'outil conçue est donné par la figure 17.



Fig. 17: Schéma synoptique du l'outil SCID

Il est impossible de commander directement un pré-actionneur par un micro-ordinateur. A cela, nous avons besoin d'une carte d'interface. La carte d'acquisition USB_DAQ contient Huit entrées analogiques, deux sorties analogiques-MLI, huit entrées logiques, deux entrées compteur et huit sorties logiques. La carte se connecte à l'ordinateur via une liaison USB.

La carte fonctionne comme esclave avec un microordinateur maître (figure 18). SCID USB DAQ est une carte dont l'élément principal est un micro-contrôleur de type Pic18F4550 capable d'acquérir huit entrées analogiques et huit entrées numériques, ainsi que la génération de deux signaux analogiques ou MLI et huit signaux de commande TOR. Cette carte polyvalente est capable de gérer diverses applications. La communication de cette carte avec le PC se fait à travers une liaison USB, l'alimentation de la carte se fait directement via la liaison USB ou à travers une source externe.

L'outil SCID (System Control and Identification) est développé avec le langage de programmation LaBVIEW [14, 15] dans le but est de faire une identification et commande numérique (figure 19).

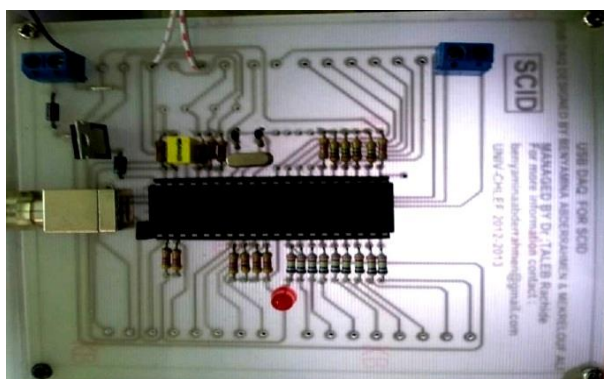


Fig. 18: Carte d'acquisition SCID USB_DAQ

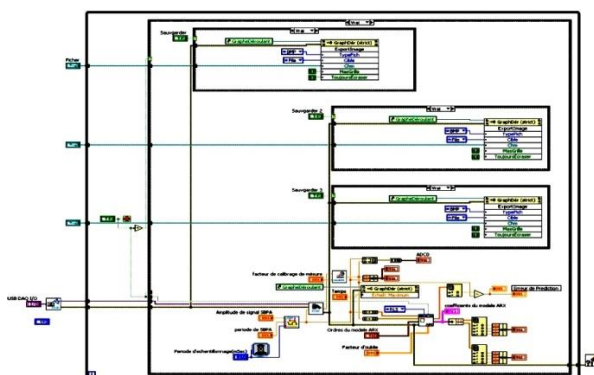


Fig. 19: Fenêtre diagramme LaBVIEW du programme SCID DAQ

L'outil SCID contient plusieurs interfaces, parmi ces interfaces, on cite:

- SCID_DAC: Cette interface est dédiée à l’acquisition et en visualisation des signaux d’entrées de la carte USB-DAQ (figure 20).
- SCID_RST: Cette interface est dédiée au calcul des régulateurs RST (figure 21).
- SCID_CH: Cette interface est dédiée au calcul du modèle discret désiré du cahier des charges (figure 22).

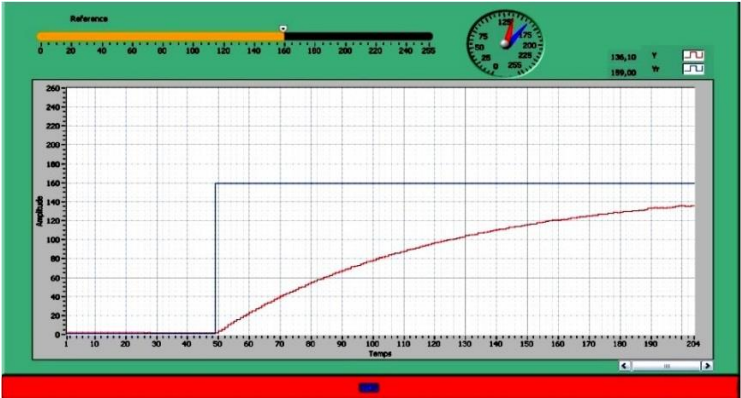


Fig. 20: Interface SCID_Daq

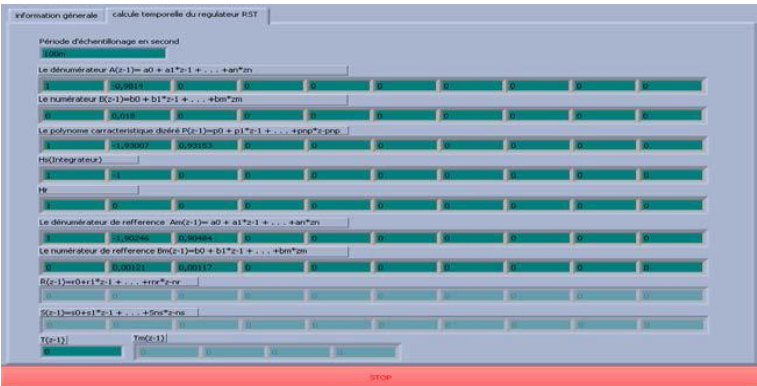


Fig. 21: Interface SCID_RST

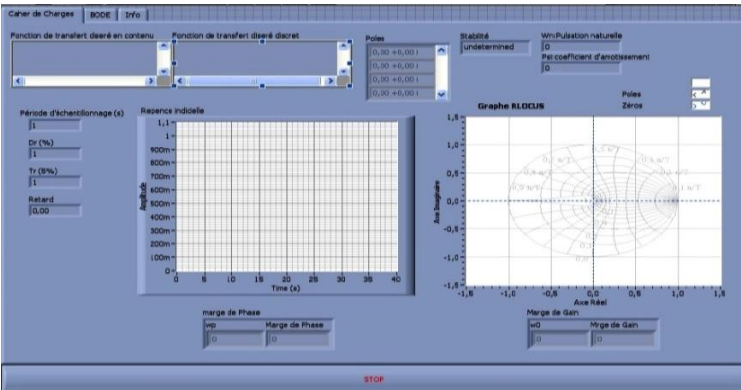


Fig. 22: Interface SCID_CH

REFERENCES

- [1] A. Chaves, M. Rice, S. Dunlap and J. Pecarina, '*Improving the Cyber Resilience of Industrial Control Systems*', International Journal of Critical Infrastructure Protection, vol. 17, pp. 30 - 48, 2017.
- [2] A. Drumea, '*Control of Industrial Systems using Android-Based Devices*', Proceedings of the 36th International Spring Seminar on Electronics Technology, Alba Iulia, pp. 405 - 408, 2013.
- [3] A. Jisaksson, '*Some Aspects of Industrial System Identification*', IFAC Proceedings, Vol. 46, N°32, pp. 153 - 159, 2013.
- [4] D. Bunjaku and M. Stankovski, '*The System Identification in Industrial Control: Case Study on the Differential Wheeled Mobile Robot*', 13th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA), Ohrid, pp. 94 - 99, 2017.
- [5] A.P. Estrada-Vargas, J.J. Lesage and E. López-Mellado, '*Identification of Industrial Automation Systems: Building Compact and Expressive Petri Net Models from Observable Behaviour*', American Control Conference (ACC), Montreal, QC, pp. 6095 - 6101, 2012.
- [6] S. Li, W. Liu, D. Xin and S. Qiao, '*An automatic Identification Tracking System Applied to Motion Analysis of Industrial Field*', International Conference on Electric Information and Control Engineering, Wuhan, pp. 1151 - 1154, 2011.
- [7] Y. Gao and D. Wang, '*Least Squares Identification Method for Differential Equations of Gene Regulatory Networks*', Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference, Nanjing, pp. 6764 - 6768, 2014.
- [8] Y. Ghoul, K.I. Taarit and M. Ksouri, '*Online Identification of Continuous-Time Systems with Multiple-Input Time Delays From Sampled Data Using Sequential Nonlinear Least Square Method From Sampled Data*', 17th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), Sousse, pp. 265 - 269, 2016.
- [9] H. Lu, Y. Wang, Y. Yuan, J. Zheng, J. Hu and X. Qin, '*Online Identification for Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Recursive Fixed Memory Least Square Method Under Steady State*', 36th Chinese Control Conference (CCC), Dalian, China, pp. 4824 - 4829, 2017.
- [10] A. Bhaskar and U.R. Babu, '*FLC-FPGA Based Digital Controller for Boost PFC SMPS without Current Measurement*', IEEE Annual India Conference, INDICON, Bangalore, pp. 1 - 6, 2016.
- [11] P.K. Khanke and S.D. Jain, '*Comparative Analysis of Speed Control of BLDC Motor Using PI, Simple FLC and Fuzzy - PI Controller*', International Conference on Energy Systems and Applications, Pune, pp. 296 - 301, 2015.
- [12] R.S. Rebeiro and M.N. Uddin, '*Performance Comparison of a PI and an FLC Based Tuned PI with Adaptive Hysteresis Controllers for IPMSM Drive*', International Conference on Electrical & Computer Engineering, ICECE 2010, Dhaka, pp. 470 - 473, 2010.
- [13] W.J. Tang, Z.T. Liu and Q. Wang, '*DC Motor Speed Control Based on System Identification and PID Auto Tuning*', 36th Chinese Control Conference (CCC), Dalian, China, pp. 6420 - 6423, 2017.

- [14] N. Hinov and T. Hranov, '*Development of LabVIEW Models for Resonant Power Converters*', PCIM Europe 2017, International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg, Germany, pp. 1- 4, 2017.
- [15] T. Makowski and K. Kluszyński, '*Dynamic Model of Hybrid Electromagnetic Launcher for Simulations in LabVIEW Environment*', International Symposium on Electrical Machines (SME), Naleczow, Poland, 18-21 June, pp. 1 - 6, 2017.