

# Utilisation du contrôleur à hystérésis à trois niveaux pour le flux statorique dans la commande DTC neuronale d'un moteur asynchrone de forte puissance

Habib Benbouhenni \*

Laboratoire d'Automatique et d'Analyse des Systèmes, LAAS  
Ecole Nationale Polytechnique d'Oran Maurice Audin, ENPO-MA  
B.P. 1524, El M'Naouer, 31000, Oran, Algérie

(reçu le 16 Mai 2019 - accepté le 28 Juin 2019)

**Résumé** - Dans cet article, une comparaison entre les performances des deux stratégies de commande directe du couple (DTC) d'un moteur asynchrone (1 MW) à base des réseaux de neurones, la stratégie classique de DTC et la stratégie proposée de DTC à contrôleur du flux à trois niveaux. En régime permanent, pour des grandeurs de références, les ondulations du courant, du flux statorique et du couple seront évaluées et comparées. En régime transitoire, le but attendu est d'évaluer la stratégie qui donne la meilleure réponse dynamique. Cette étude est faite pour des critères imposés, c'est-à-dire pour une même fréquence de commutation, même capteur de vitesse, donc la commande directe du couple est en boucle de vitesse fermée. La charge et la vitesse sont à valeurs nominales.

**Abstract** - In this article, a comparison between the performances of the two direct torque control (DTC) strategies of an asynchronous motor (1 MW) based on neural networks. The classical strategy of the DTC control and the strategy proposed DTC control to three-level flux controller. In steady state, for reference quantities, the ripples of the current, the stator flux and the torque will be evaluated the strategy that gives the best dynamic response. This study is done for imposed a criterion that is to say for the same switching frequency, same speed sensor, so the direct control of the torque is closed loop speed. Load and speed are nominal.

**Keywords:** DTC - Induction motor - Neural networks - Flux controller.

## 1. INTRODUCTION

La machine asynchrone, de part sa construction est la machine la plus robuste et la moins chère du marché [1]. L'application de la commande vectorielle introduite par Blaschk en 1972 constitue une révolution pour le contrôle de la machine asynchrone. Cette technique présente l'inconvénient majeur d'être relativement sensible aux variations des paramètres de la machine, c'est pourquoi on a développé les méthodes de contrôle direct du couple (DTC) [2].

La commande DTC des machines asynchrones est initiée dans la deuxième moitié des années 80 par Takahashi *et al.* comme concurrentielle de la méthode classique, basées sur une alimentation par modulation de largeur d'impulsions (MLI) est sur un découplage du flux et du couple moteur par orientation du champ magnétique [3, 4].

Ce type de commande repose sur la détermination 'directe' de la séquence de commande appliquée aux interrupteurs d'un convertisseur statique. Ce choix est généralement basé sur l'utilisation de régulateurs à hystérésis dont la fonction est de contrôler l'état du système, à savoir ici l'amplitude du flux statorique et du couple électromagnétique.

A l'origine, les commandes DTC étaient fortement basées sur le sens physique et une approche relativement empirique de la variation des états (couple, flux) sur un

---

\* habib\_benbouhenni@yahoo.com

intervalle de temps très court (intervalle entre deux commutations). Une optimisation de ces séquences de commutation peut conduire à une diminution des ondulations du couple [5].

Aujourd’hui, plusieurs efforts sont employés pour améliorer la commande DTC pour réduire l’ondulation du couple et fixer la fréquence de commutation de l’onduleur [4].

Le travail est réalisé dans le cadre de cet article propose l’amélioration des performances de commande DTC des machines asynchrones, sont alimentées par un onduleur de tension.

L’objectif est de développer des algorithmes de commande permettant d’apporter des solutions aux problèmes majeurs de cette technique de commande. Comme résultats, la stratégie proposée réduit considérablement l’ondulation du couple et du flux statorique par rapport à la stratégie classique.

### 2. COMMANDE DTC CLASSIQUE

La DTC consiste à calculer les grandeurs de contrôle que sont le flux statorique et le couple électromagnétique à partir des mesures de courants statoriques sans l’utilisation de capteurs mécaniques [6]. Dans la structure CDC, la machine asynchrone commandée par l’onduleur de tension est un système dynamique hybride, dont la partie continue est la machine asynchrone et la partie discrète est l’onduleur de tension.

Cette loi de contrôle représente des performances dynamiques remarquables de même qu’une bonne robustesse vis-à-vis des écarts de paramètres du moteur [7]. La commande directe du couple classique d’une machine asynchrone triphasée peut être schématisée par la figure 1.

Le flux statorique du moteur asynchrone est obtenu à partir de l’équation suivante [8, 9],

$$\Phi_s = \int_0^t (v_s - R_s i_s) dt \tag{1}$$

L’angle  $\theta_s$  et  $C_{em}$  sont calculés à partir de,

$$\theta_s = \arctg \left( \frac{\Phi_{\beta s}}{\Phi_{\alpha s}} \right) \tag{2}$$

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \left( \Phi_{\alpha s} i_{\beta s} - \Phi_{\beta s} i_{\alpha s} \right) \tag{3}$$

La table de commutation des tensions utilisées pour cette technique est donnée par le **Tableau 1**.

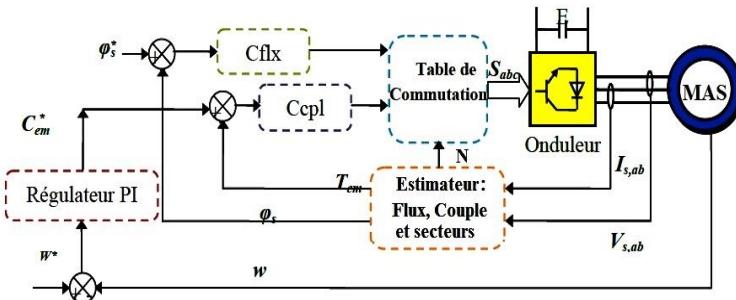


Fig. 1: Schéma structurel du contrôle direct du couple

**Tableau 1:** Table de vérité de DTC classique

N	Cflx	Ccpl	1	2	3	4	5	6
			1	1	2	3	4	5
0	1	2		3	4	5	6	
-1	6	1		2	3	4	5	
0	1	3	4	5	6	1	2	
	0	4	5	6	1	2	3	
	-1	5	6	1	2	3	4	

### 3. COMMANDE DTC AVEC CORRECTEUR DU FLUX A TROIS NIVEAUX

La DTC classique présente des ondulations dans le flux et le couple. Pour cela, on présente dans ce qui suit une nouvelle stratégie de la commande DTC qui minimise les ondulations du couple et du flux [10].

Dans cette partie, l'idée est de changer la table de vérité à partir d'une modification des correcteurs à hystérésis de la DTC. Une correcteur à hystérésis à trois niveaux pour le flux statorique et correcteur à 7 niveaux pour le couple (**Tableau 2**).

**Tableau 2:** Table de vérité de nouvelle stratégie

N	Cflx	Ccpl	1	2	3	4	5	6
			1	3	3	4	5	6
2	2	3		4	5	6	1	
1	1	2		3	4	5	6	
0	0	0		0	0	0	0	
-1	6	1		2	3	4	5	
-2	6	1		2	3	4	5	
-3	1	2		3	4	5	6	
0	3	3	4	5	6	1	2	
	2	2	3	4	5	6	1	
	1	2	3	4	5	6	1	
	0	0	0	0	0	0	0	
	-1	0	0	0	0	0	0	
	-2	5	6	1	2	3	4	
-1	-3	6	1	2	3	4	5	
	3	4	5	6	1	2	3	
	2	3	4	5	6	1	2	
	1	3	4	5	6	1	2	
	0	0	0	0	0	0	0	
	-1	4	5	6	1	2	3	
	-2	4	5	6	1	2	3	
-3	5	6	1	2	3	4		

### 4. COMMANDE DTC NEURONALE (DTC-RNA)

L'application de la technique des réseaux de neurones dans la commande des machines est simple et a permis la résolution de plusieurs problèmes liées au contrôle de ces systèmes [11].

Les réseaux de neurones forment un ensemble de fonctions non linéaires, permettant de construire, par apprentissage, une vaste famille de modèles et de correcteur non linéaires [12].

Dans ce travail sur la DTC-RNA, il est facile d'utiliser cette technique telle qu'on protège la même stratégie que la DTC conventionnelle, mais il a été changé le bloc qui donne les impulsions aux interrupteurs d'onduleur par un contrôleur à base des réseaux de neurones est illustré sur la figure 2.

La mise à jour des poids et des biais de ce réseau de neurones est réalisée par un algorithme de retropropagation nommé l'algorithme de Levenberg-Marquardt (LM) [13, 14].

Pour générer ce contrôleur neuronale par Matlab/Simulink où on a choisi 30 couches cachées et 3 couches de sorties avec les fonctions d'activation respectivement de type 'tansig' et 'purelin'. La structure du réseau de neurones ANN est montrée sur la figure 3, les entrées du sélecteur neuronal sont les états du flux, du couple et le secteur (N) du vecteur flux statorique. Les sorties de ce sélecteur sont les états des interrupteurs d'onduleur à deux niveaux.

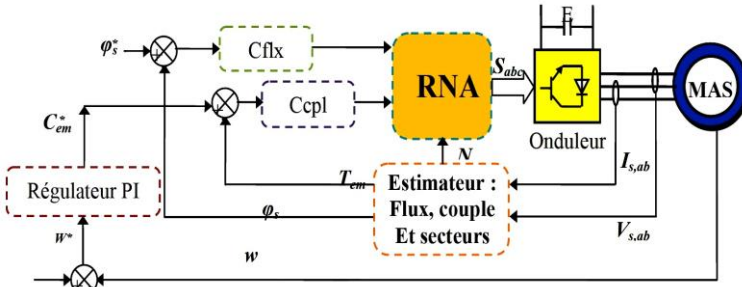


Fig. 2: Schéma de la commande DTC neuronale d'un MAS

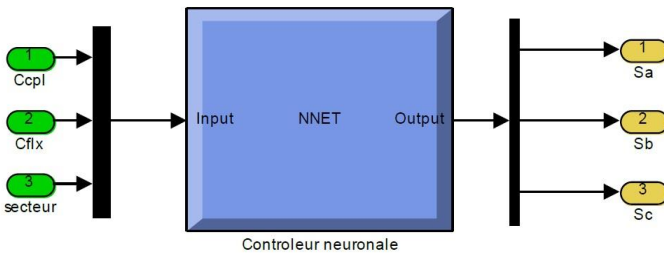


Fig. 3: Architecture du réseau de neurone

La figure 4 illustre l'architecture interne du contrôleur neuronale de stratégie proposée de la commande DTC.

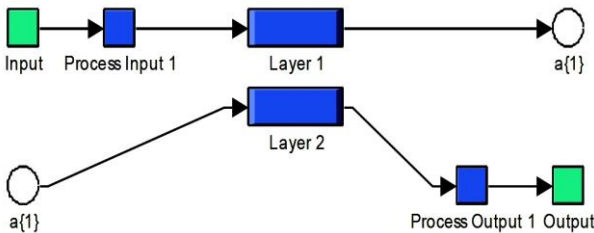


Fig. 4: Structure interne d'un contrôleur neuronale

La figure 5 illustre l'architecture interne de layer 1. La structure interne de Layer 2 est montrée dans la figure 6.

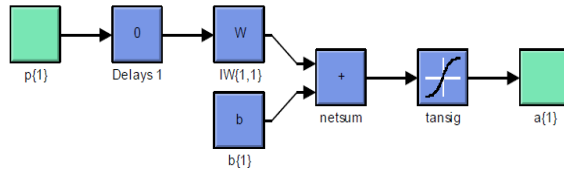


Fig. 5: Structure interne de Layer 1

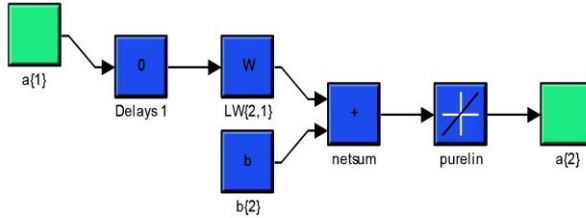


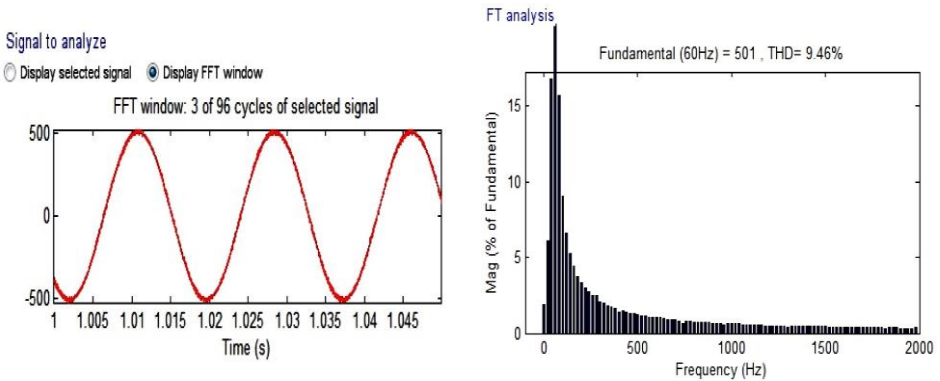
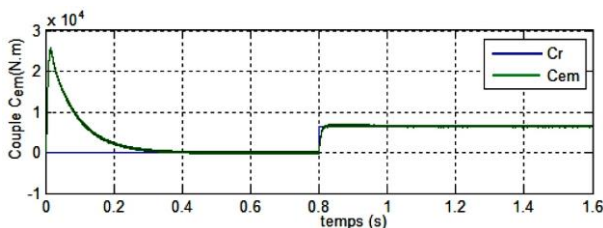
Fig. 6: Structure interne de Layer 2

## 5. RESULTATS DE SIMULATION

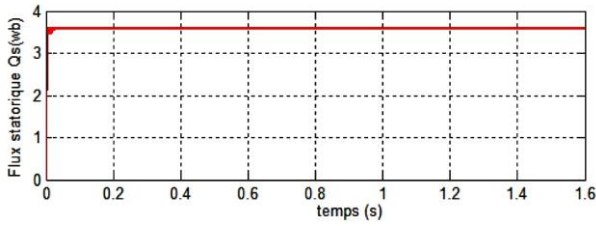
Le comportement de la structure de la commande DTC appliquée à un moteur asynchrone de forte puissance (1 MW) est simulé par Matlab/Simulink. La simulation est effectuée dans les conditions suivantes,

la bande d'hystérésis du comparateur du couple est constaté à  $\pm 0.05$  N.m et celle du comparateur du flux à  $\pm 0.001$  Wb.

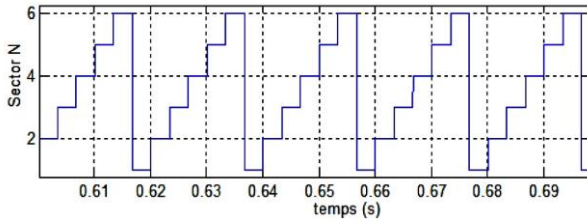
Le couple de référence  $C_{em,ref}$  est récupéré à la sortie d'un correcteur PI et le flux de référence  $\Phi_{s,ref} = 3.6$  Wb.

a- THD de courant statorique ( $I_{as}$ )

b- Couple

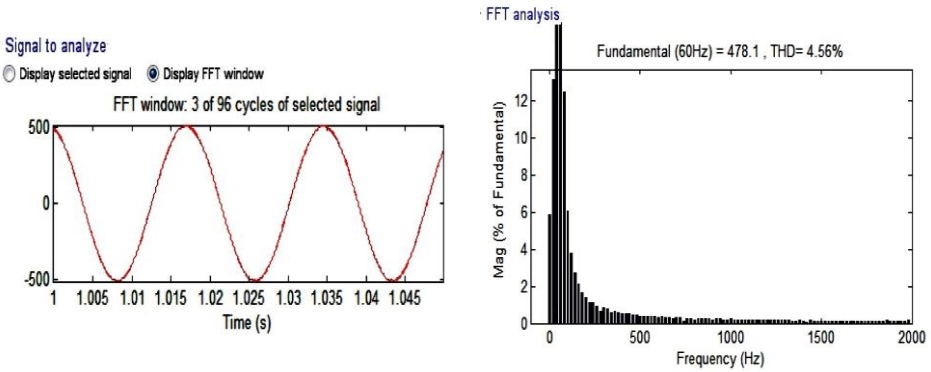


c- Flux statorique

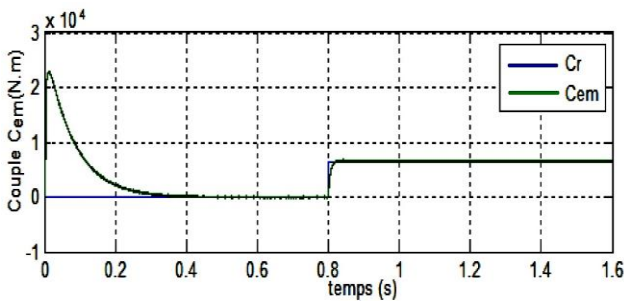


d- Secteur

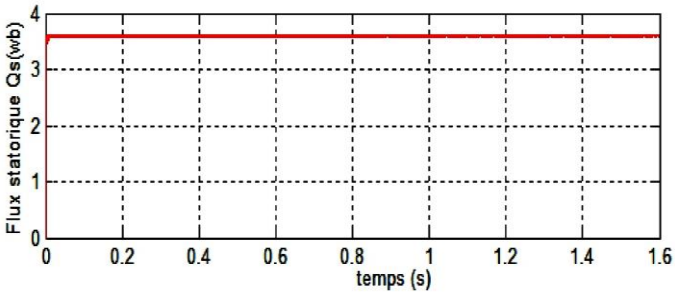
Fig. 7: Performances de stratégie classique basée sur les RNA appliquée à la MAS



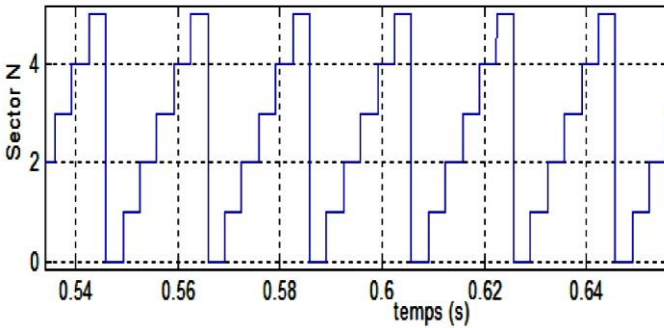
-a- THD de courant statorique ( $I_{as}$ )



-b- Couple.



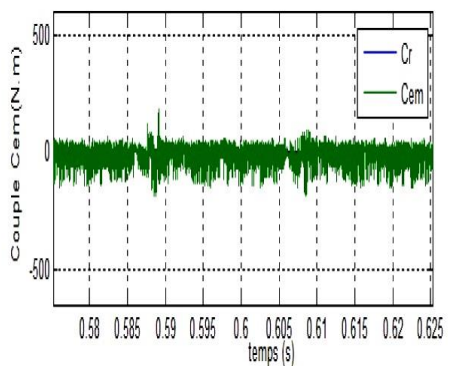
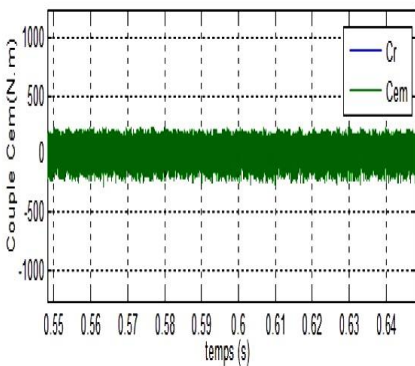
-c- Flux statorique



-d- Secteur

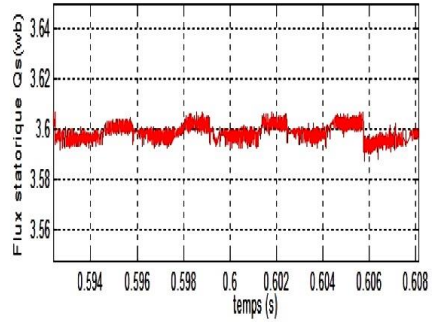
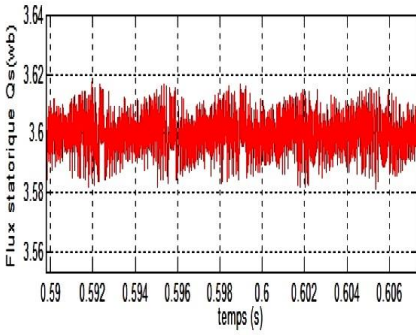
Fig. 8: Performances de stratégie proposée basée sur les RNA appliquée à la MAS

Dans le but de connaître la meilleure stratégie de la commande DTC de la MAS, une étude comparative est indispensable entre les stratégies proposées. La figure suivante présente la comparaison entre la stratégie proposée et la stratégie classique de la commande DTC.



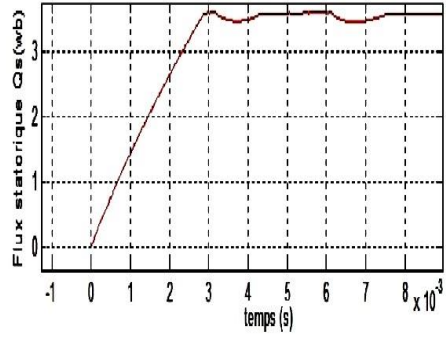
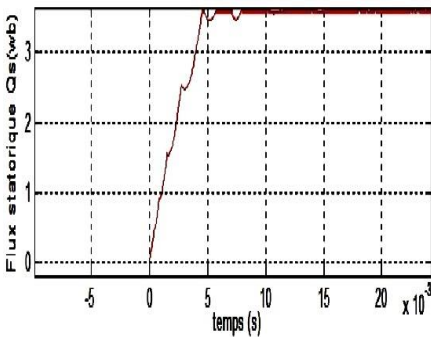
a- Stratégie classique basée sur les RNA b- Stratégie proposée basée sur les RNA

Fig. 9: Zoom du couple



**a-** Stratégie classique basée sur les RNA, **b-** Stratégie proposée basée sur les RNA

Fig. 10: Zoom du flux statorique



**a-** Stratégie classique basée sur les RNA, **b-** Stratégie proposée basée sur les RNA

Fig. 11: Réponse dynamique du flux statorique

Dans le Tableau 3, on a résumé les résultats de simulation obtenus par les deux commandes proposées.

**Tableau 4.** Etude comparative entre les deux commandes proposées

	Stratégie classique	Stratégie proposée
<b>Minimisations des ondulations du couple</b>	bonne	Très bonne
<b>Minimisations des ondulations du flux</b>	Très bonne	Très bonne
<b>Temps de réponse du flux statorique</b>	5 ms	3ms

Ce tableau montre que la stratégie proposée basée sur les RNA de la MAS réduit considérablement les ondulations du flux, et du couple électromagnétique comparativement à celle de la stratégie classique. D'un autre coté, on remarque que le module du flux reste constant pendant la période de simulation.

## 6. CONCLUSION

Dans cet article, on a présenté un nouveau tableau de commutation (stratégie) de la commande directe du couple de la machine asynchrone (1 MW) alimentée par onduleur à deux niveaux basée sur les réseaux de neurones.



Dans le but d'améliorer les performances de la DTC (réductions d'ondulations du couple, du flux, et la valeur de THD du courant statorique), on fait des variations du couple de la charge, les résultats obtenus montrent que la stratégie qui est proposé avec les RNA est très performante.

## REFERENCES

- [1] C. M'Hamed, M. Zerikat, and Y. Bendaha, '*Adaptation des paramètres d'un contrôleur PI par un FLC appliqué à un moteur asynchrone*', 4<sup>th</sup> International Conférence on Computer Integrated Manufacturing, CIP'2007, 03-04 Nov. 2007.
- [2] C. Abdesselem, '*Commande directe du couple du moteur asynchrone - Apport de la logique floue*', Mémoire de Magister, Université de Batna, Batna, 2008.
- [3] H. Chaikhy, M. Khafallah, A. Saad, M. Es-Saadi, et K. Chikh, 'Evaluation des performances des commandes vectorielles de la machine à induction', *Revue de Génie Industriel*, Vol. 6, pp. 23 - 32, 2011.
- [4] L. Youb, and A. Craciunescu, '*Etude comparative entre la commande vectorielle à flux orienté et la commande directe du couple de la machine asynchrone*', U.P.B. Sciences Bulletin, Series C, Vol. 69, N°2, pp. 113 - 128, 2007.
- [5] B. Messaoud, '*Commande par DTC de la machine à induction sans capteur de vitesse. Utilisation du filtre de Kalman pour l'estimation de la vitesse*', Mémoire de Magister, Université de Batna, Batna, 2012.
- [6] A. Benzaïoua, '*Contribution à la commande directe de couple d'une machine asynchrone triphasée*', Thèse de Doctorat, Université du Québec, Chicoutimi, Canada, 2017.
- [7] B. Sebti, '*Commande par DTC d'un moteur asynchrone apport des réseaux de neurones*', Mémoire de Magister, Université de Batna, Batna, 2013.
- [8] B. Habib, T. Rachid, et C. Faycal, '*Etude comparative de deux stratégies de commande DTC neuronale d'une MAS alimentée par onduleur à sept niveaux*', *Acta Electrotehnica*, Vol. 57, N°5, pp. 570 - 578, 2016.
- [9] A. Aïssa, '*Commande sans capteur de vitesse par DTC d'une machine synchrone à aimants permanents dotée d'un observateur d'ordre complet à modes glissants*', Mémoire de Magister, Université de Batna, Batna, 2005.
- [10] H. Benboughenni, '*Comparateur à hystérésis à sept niveaux pour la commande DTC basée sur les techniques de l'intelligence artificielle de la MAS*', *Journal of Advanced Research in Science and Technology*, Vol. 4, N°2, pp. 553 - 569, 2017.
- [11] B.O. Fethi, '*Application des techniques de l'intelligence artificielle (LF-RN) pour le contrôle direct du couple d'une MAS alimentée par des onduleurs multi niveaux*', Mémoire de Magister, Université des Sciences et de la Technologie, Oran, 2013.
- [12] T. Riad, '*Contribution à la commande directe du couple de la machine asynchrone*', Thèse de Doctorat, Université Mentouri, Constantine, 2008.
- [13] H. Benboughenni, '*Nouvelle approche de la commande DTC modifiée par les techniques de l'intelligence artificielle d'une machine asynchrone*', *Journal of Advanced Research in Science and Technology*, Vol. 4, N°2, pp. 509 - 528, 2017.

- [14] D. Youcef, '*Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle*', Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabes, Sidi Bel Abbes, 2015.