

Comparateur à hysteresis à sept niveaux pour la commande DTC basée sur les techniques de l'intelligence artificielle de la MAS

Habib BENBOUHENNI^{1*}

¹Département de Génie Électrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Oran, Algeria

Résumé. Cet article décrit une techniques de l'intelligence artificielle, la logique floue et les réseaux de neurones qui sera introduite dans la commande DTC deux niveaux de la machine asynchrone. D'un autre coté, nous avons proposées deux tableaux de commutation (cas du correcteur du couple à 7 niveaux et correcteur du flux à 3 niveaux), afin de réduit d'ondulations du couple et du flux. Les résultats obtenus par des essais effectués en simulation numériques. Comme résultats la stratégie 2 avec et sans les techniques de l'intelligence artificielle donne les meilleurs résultats par rapport à les autres stratégies.

Mots clés: *Machine asynchrone, Onduleur à deux niveaux, DTC, THD, Réseaux de neurones, PI-flou.*

1. Introduction

Les entraînements à vitesse variable employant des moteurs asynchrones ont pris ces dernières années une importance considérable dans de nombreuses applications industrielles. La machine asynchrone est appréciée par sa robustesse, son faible coût d'achat et son entretien quasi-nul, ainsi que sa puissance massique. Cependant ces avantages ont longtemps été inhibés par la complexité de la commande. De nombreuses stratégies de commande ont été développées pour en faire un actionneur qui outrepassé toutes les autres machines. Le développement, des processeurs numériques de signaux de plus en plus performants a rendu possible l'implantation à moindres coûts des lois de commandes sophistiquées (la commande vectorielle, la commande DTC, etc...) [1].

Les méthodes de contrôle directe du couple des machines asynchrones sont apparues dans la deuxième moitié des années 1980 comme concurrentielles des méthodes classiques, basées sur une alimentation par modulation de largeur d'impulsion (MLI) et sur un découpage du flux et du couple moteur par orientation du champ magnétique [2], cette loi de contrôle présente des performances dynamiques remarquables de même qu'une bonne robustesse vis à vis des écarts de paramètres du moteur [3]. Elle semble notamment bien adaptée aux applications de traction ou véhicule électrique [2].

En effet, la commande DTC à partir de références externes, tel le couple et le flux, ne recherche pas, comme dans les commandes classiques (vectorielles ou scalaires) les tensions à appliquer à la machine, mais recherche « le meilleur » état de commutation de l'onduleur pour satisfaire les exigences de l'utilisateur [4].

Dans ce travail, notre principal objectif est de proposer des nouveaux tableaux de commutation de la commande DTC classique, compatibles avec un onduleur de tension à deux niveaux, et d'exploiter les outils d'intelligences artificielles à savoir : la logique floue et les réseaux de neurones artificiels sur la commande DTC.

* Corresponding author.

E-mail: habib0264@gmail.com (BENBOUHENNI H.).

Address: BP 50B Ouled Fares, Chlef, Algeria.

Cet article est consacré au principe du contrôle direct du couple d'une MAS alimentée par un onduleur à deux niveaux. Une synthèse des différents tableaux (stratégies) de commutation de DTC sont présentées et analysées. Ensuite, nous présentons une nouvelle approche de la commande directe du couple basée sur les techniques d'intelligences artificielles, qui permet d'améliorer la commande DTC classique de la machine asynchrone alimentée par un onduleur à deux niveaux.

Comme résultats la stratégie 2 proposé (tableau 2) avec et sans techniques d'intelligences artificielles donné les meilleures performances de la MAS par rapport à la stratégie 1 proposé et la stratégie classique.

2. Principe de DTC classique

Depuis que M. Depenbrock et I. Takahashi ont proposé la commande DTC de la machine asynchrone dans la moitié des années 80, elle est devenue de plus en plus populaire. La commande DTC permet de calculer les grandeurs de contrôle que sont le flux statorique et le couple électromagnétique à partir des seules grandeurs liées au stator et ceci sans l'intervention de capteurs mécaniques.

Le principe de commande consiste à maintenir le flux statorique dans une fourchette. Le synoptique de la commande DTC est représenté dans la Fig.1 [5].

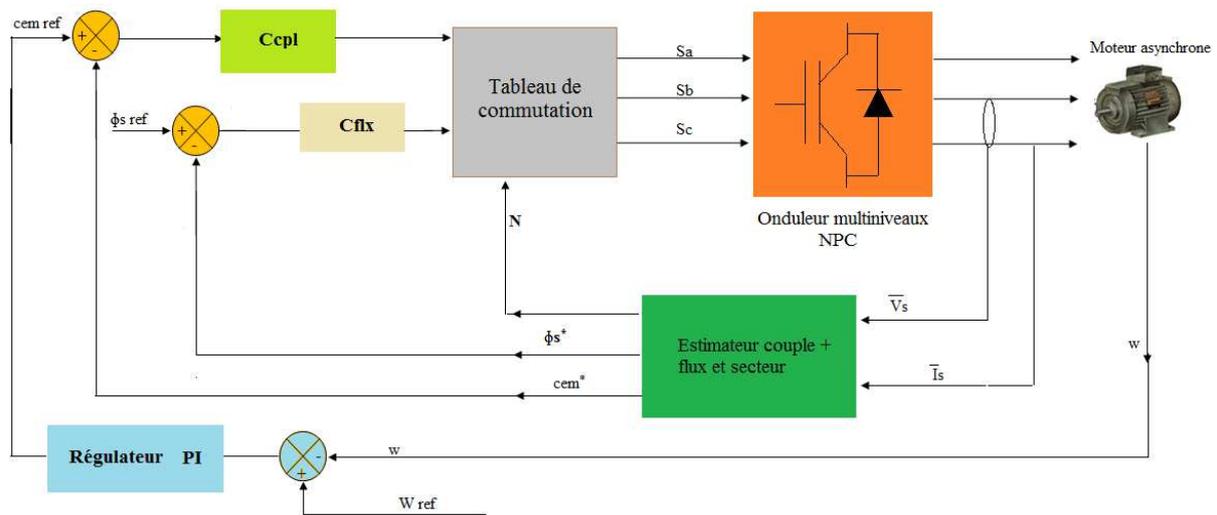


Fig. 1 : Structure de base de la commande directe du couple.

La commande DTC d'un moteur asynchrone est basée sur la détermination directe de la séquence de commandes appliquées aux interrupteurs d'un onduleur de tension. Cette stratégie est basée généralement sur l'utilisation des comparateurs à hystérésis dont le rôle est de contrôler les amplitudes du flux statorique et du couple électromagnétique.

$$\begin{cases} \Phi_{s\alpha} = \int_0^t (v_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) dt \\ \Phi_{s\beta} = \int_0^t (v_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) dt \end{cases} \quad (1)$$

La DTC est déduit en se basant sur les deux approximations décrites par les formules (2) et (3):

$$\Phi_{s\alpha}^{(k+1)} \approx \Phi_{s\alpha}^{(k)} + v_s T_e \rightarrow \Delta\Phi_s^{(k)} = v_s T_e \quad (2)$$

Le module du flux statorique s'écrit:

$$\Phi_s = \sqrt{\Phi_{\alpha s}^2 + \Phi_{\beta s}^2} \tag{3}$$

La zone N_i dans laquelle se situe le vecteur Φ_s est déterminée à partir des composantes $\Phi_{\alpha s}$ et $\Phi_{\beta s}$. L'angle θ_s , est égal à [6, 7]:

$$\theta_s = \arctg\left(\frac{\Phi_{\beta s}}{\Phi_{\alpha s}}\right) \tag{4}$$

Le couple électromagnétique C_{em} est calculé à partir de:

$$c_{em} = \frac{3}{2} P [\Phi_{\alpha s} i_{\beta s} - \Phi_{\beta s} i_{\alpha s}] \tag{5}$$

Un onduleur de tension triphasé à MLI permet d'atteindre sept positions distinctes dans le plan de phase, correspondant aux huit séquences de tension de l'onduleur. Ces positions sont illustrées dans la Fig. 2 [8]

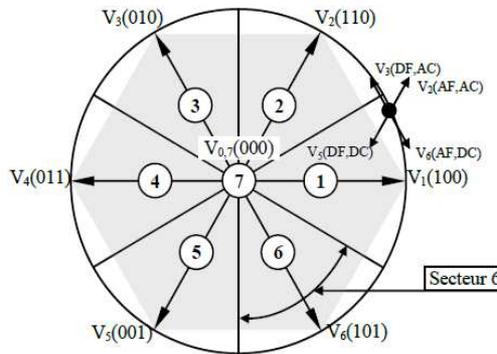


Fig. 2 : Différents vecteurs de tensions statoriques délivrées par l'onduleur à deux niveaux.

Avec:

AF: Augmenter le flux

DF: Diminuer le flux.

AC: Augmenter le couple

DC: Diminuer le couple.

Par ailleurs, le tableau 1 présente les séquences correspondant à chaque position, sachant que l'erreur entre le flux de référence et le flux estimé est introduite dans un comparateur à hystérésis à deux niveaux, qui délivre 1 si cette erreur est positive et 0 si elle est négative. De même, l'erreur entre le couple de référence et le couple estimé est introduite dans un comparateur à hystérésis à trois niveaux, et qui délivre 1 si elle est positive, 0 si elle est nulle, et -1 si elle est négative. L'utilisation des trois états précédents pour régler le couple à été proposée pour essayer de minimiser la fréquence de commutation moyenne, car la dynamique du couple est, en général, plus rapide que celle du flux [8].

Tableau 1 Table de vérité de la commande DTC classique

N		1	2	3	4	5	6
Cflx	Ccpl						
1	1	2	3	4	5	6	1
	0	0	7	0	7	0	7
	-1	6	1	2	3	4	5
0	1	3	4	5	6	1	2
	0	7	0	7	0	7	0
	-1	5	6	1	2	3	4

Avec: Ccpl = 1: Augmenter le couple
 Ccpl = -1: Maintenir le couple
 Cflx = -1: Augmenté le flux

Ccpl = 0: Réduire le couple
 Cflx = 0: Réduire le flux

Dans l'objectif de réduire les ondulations du couple électromagnétique et du flux statorique. Nous avons proposées deux tableaux (Deux stratégies) de commutation (Cas du correcteur du couple à 7 niveaux et correcteur du flux à 3 niveaux avec 6 secteurs). Les Tableaux de commande est construite en fonction de l'état des variables Cflx et Ccpl, et de la zone N de position du Φ_s . Elle se présentés donc sous la forme suivante :

Tableau 2 Table de vérité de stratégie 1

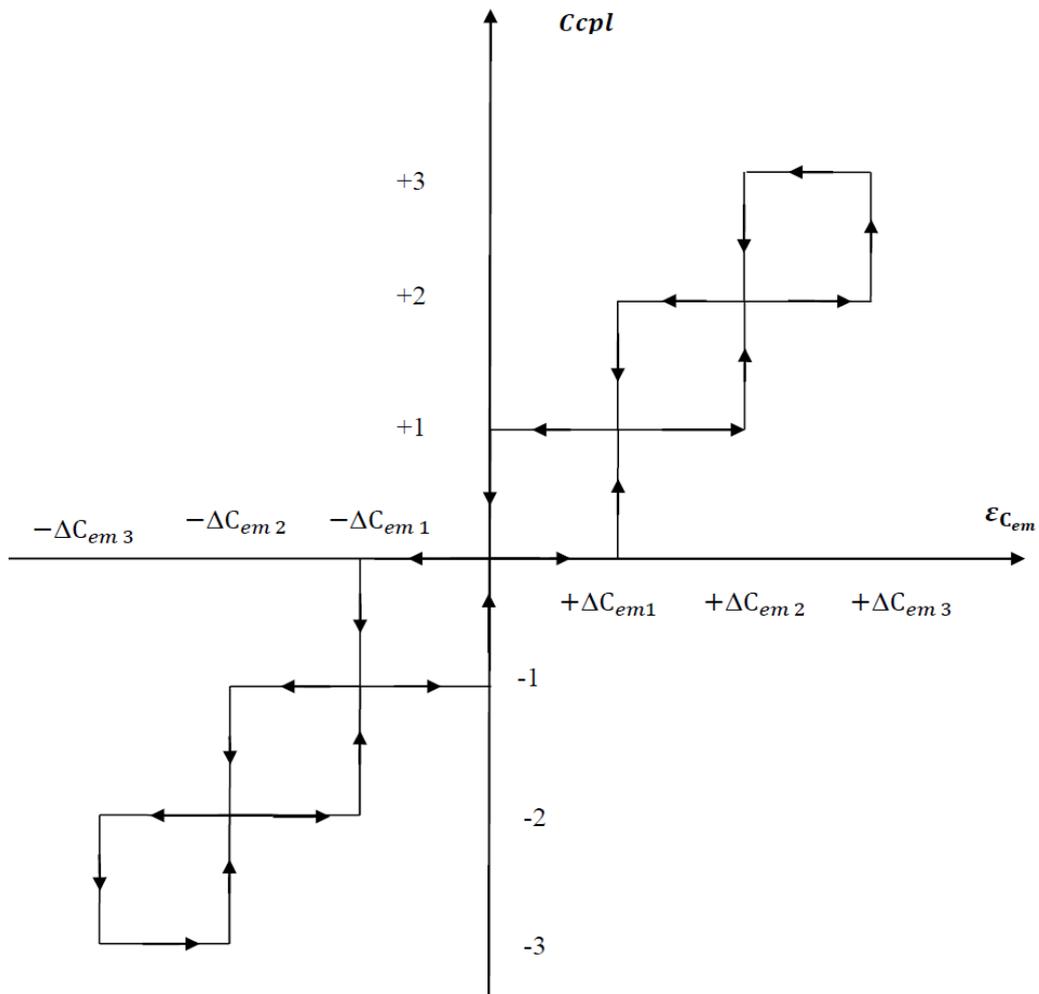
N		1	2	3	4	5	6
Cflx	Ccpl						
1	3	6	1	2	3	4	5
	2	1	2	3	4	5	6
	1	2	3	4	5	6	1
	0	0	0	0	0	0	0
	-1	6	1	2	3	4	5
	-2	6	1	2	3	4	5
	-3	5	6	1	2	3	4
0	3	1	2	3	4	5	6
	2	2	3	4	5	6	1
	1	2	3	4	5	6	1
	0	0	0	0	0	0	0
	-1	5	6	1	2	3	4
	-2	5	6	1	2	3	4
	-3	6	1	2	3	4	5
-1	3	1	2	3	4	5	6
	2	2	3	4	5	6	1
	1	3	4	5	6	1	2
	0	0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

Tableau 3 Table de vérité de stratégie 2

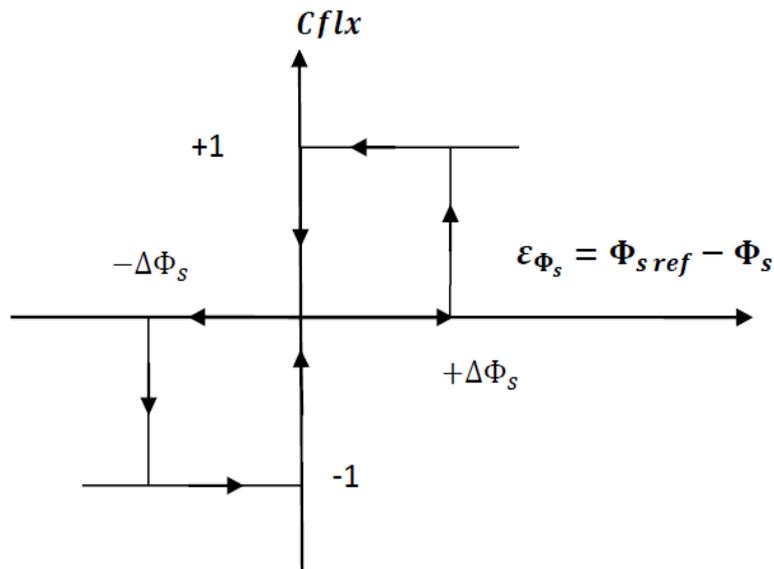
N		1	2	3	4	5	6
Cflx	Ccpl						
1	3	3	4	5	6	1	2
	2	2	3	4	5	6	1
	1	1	2	3	4	5	6
	0	0	0	0	0	0	0
	-1	6	1	2	3	4	5
	-2	6	1	2	3	4	5
	-3	1	2	3	4	5	6
0	3	3	4	5	6	1	2
	2	2	3	4	5	6	1
	1	2	3	4	5	6	1
	0	0	0	0	0	0	0
	-1	0	0	0	0	0	0
	-2	5	6	1	2	3	4
	-3	6	1	2	3	4	5
-1	3	4	5	6	1	2	3
	2	3	4	5	6	1	2
	1	3	4	5	6	1	2
	0	0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

Le but d'utiliser un correcteur du flux est de maintenir l'extrémité du vecteur flux dans une couronne circulaire. Pour cela, un correcteur à hystérésis à trois niveaux (Fig. 3b) convient parfaitement et permet en plus d'obtenir de très bonnes performances dynamiques. La sortie du correcteur, représentée par une variable booléennes Cflx indiqué directement si l'amplitude du flux doit être Cflx=1, ou Cflx=0, ou Cflx= -1.

Le correcteur du couple (Fig. 3a) a pour fonction de maintenir le couple dans les limites $|C_{em} - C_{em_{ref}}| \leq \Delta C_{em}$, C_{em} étant la référence du couple et ΔC_{em} la moitié de la largeur de la bande d'hystérésis du correcteur. Dans notre cas, nous utilisons un correcteur à 7 niveaux afin d'augmenter le nombre du vecteur.



a) Contrôleur du couple à 7 niveaux



b) Contrôleur du flux à 3 niveaux
Fig.3 Schéma des contrôleurs à hysteresis proposées

3. DTC basée sur les techniques de l'intelligence artificielle

La figure 4, illustre la structure de la stratégie globale de commande neuronale et du contrôleur PI-flou de la vitesse utilisée dans la DTC. Le système de contrôle est composé du contrôleur PI-flou, le contrôleur neuronal, le bloc d'estimation du couple et du flux statorique, l'onduleur de tension à deux niveaux.

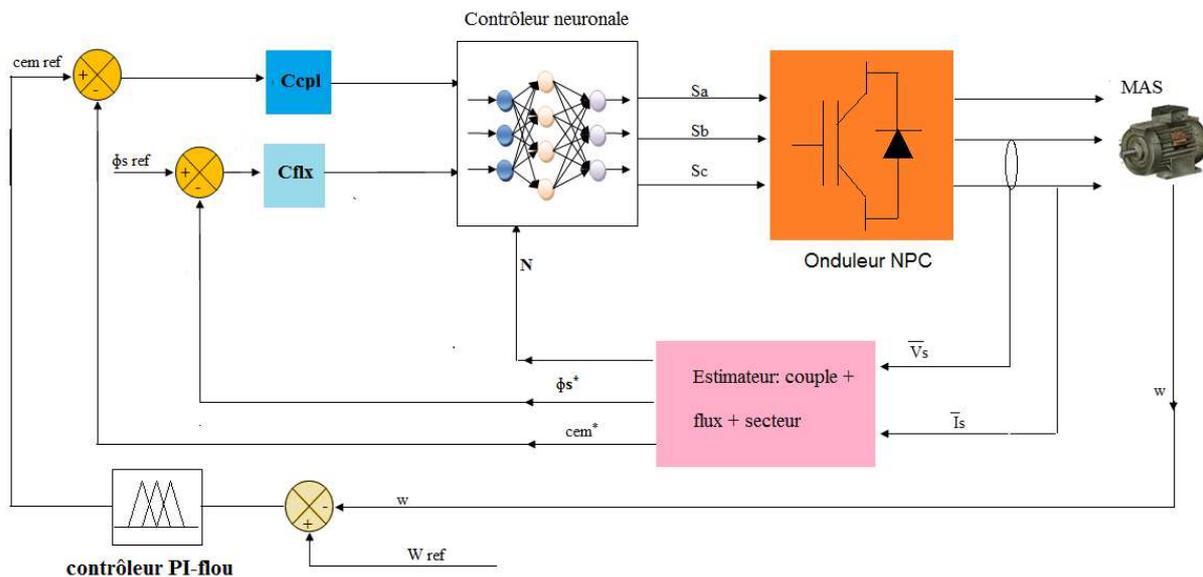


Fig. 4: Commande DTC basée sur les techniques de l'intelligence artificielle.

Les réseaux de neurones sont des modèles mathématiques inspirés du fonctionnement cérébral de l'être humain. Leur faculté d'apprentissage, de généralisation et d'approximation, font deux de nouvelles solutions pour la modélisation, l'identification et le contrôle des processus par leur capacité à traiter des données entrée-sortie du système [9]. Le choix d'un réseau de neurones pour améliorer les performances de la commande DTC proposée, est obtenue après plusieurs essais de simulation.

Le tableau de commutation de DTC est remplacé par un réseau de neurones de type perceptron, comportant une couche de entrée à 3 neurones, une couche cachée de 18 neurones, et une couche de sortie à 3 neurones. Les fonctions d'activation sont de formes tansig pour la couche d'entrée et purelin pour le neurone de la couche cachée, et trainlm pour le neurone de la couche de sortie. La Fig. 5 illustre l'architecture du réseau de neurones de la commande DTC.

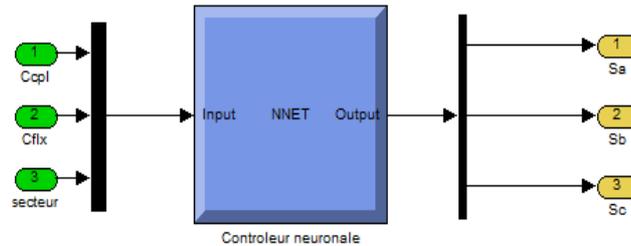


Fig. 5: Architecture du réseau de neurones de la commande DTC

La Fig.6 illustre l'architecture interne du contrôleur neuronale de stratégie 2 de la commande DTC.

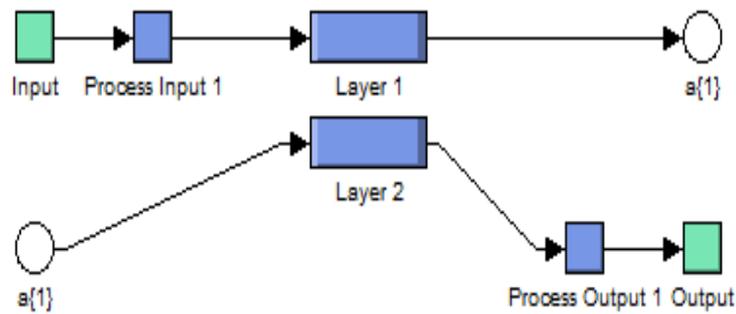


Fig. 6: Architecture interne du contrôleur neuronale

Un système flou peut être vu comme un système expert fonctionnant à partir d'une représentation de connaissance basée sur la théorie des ensembles. Un système flou est composé d'une base de données qui comptant l'ensemble des renseignements que nous possédons sur le processus ce qui nous permet de définir les fonctions d'appartenance et les règles floues de ce système flou, d'une base de règles floues qui est une collection de règle IF-THEN, d'une interface numériques-symbolique ou fuzzification de type singleton et d'une interface symbolique-numérique ou defuzzification par la méthode des centres pondérés qui revient à faire une somme pondérées des centres des ensembles flous infers multiples par les degrés d'appartenances correspondant [10, 11].

$$y = \frac{\sum_{j=1}^M w_j b_j}{\sum_{j=1}^M w_j} \tag{6}$$

Avec:

W_j est le degré d'activation de la jeme règle flou.

$b_{j,i}$ $i=1, 2, \dots, n$ sont les coefficients de la jeme consequence linéaire.

y_i la sortie numériques de la jeme règle flou ou $j \in [1, M]$

M: le nombre total des règles d'inférence.

Le régulateur flou utilisé est du type Mamdani, qui est construit autour d'un organe de décision manipulant des règles subjectives et imprécises. La première étape pour la réalisation d'un régulateur flou est de choisir ses variables d'entrées et de sorties, savoir avec quels paramètres on peut obtenir la commande, et définir les univers de discours de ses variables [12].

Les entrées du système sont l'erreur de la vitesse e et sa derive/dt.

Avec: $e = w_{ref} - w$

Les sortie du régulateur sont le couple de référence Cem_{ref} qui additionné avec Cem estimé. On peut changer la sensibilité du régulateur flou sans changer sa structure interne à l'aide des gains dits facteurs d'échelle (Fig. 7) qui sont places en entrée et en sortie du régulateur flou [12, 13].

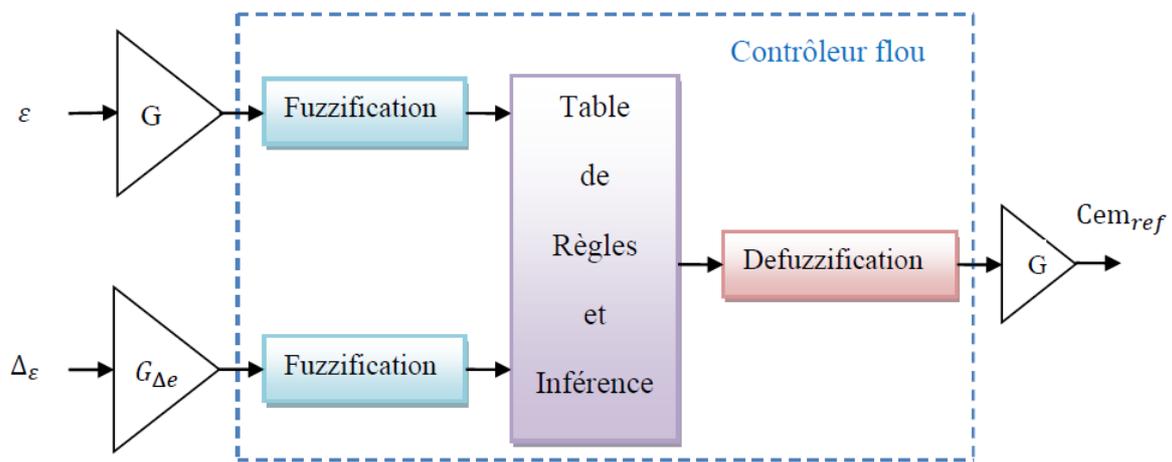


Fig. 7 : Schéma synoptique du régulateur flou avec réglage

Nous avons commencé notre étude avec des ensemble flous des variables d'entrée et de sortie défini par des fonction d'appartenance de 3, 5 puis 7 ensemble. Après la comparaison des résultats, nous avons constaté que le régulateur à sept ensemble donne de meilleurs résultats.

Les sept ensemble flous qui caractérisant les variables entrée/sortie du régulateur flou sont les suivants:

NG: Négative grande

PP: Positive petite

NM: Négative moyenne

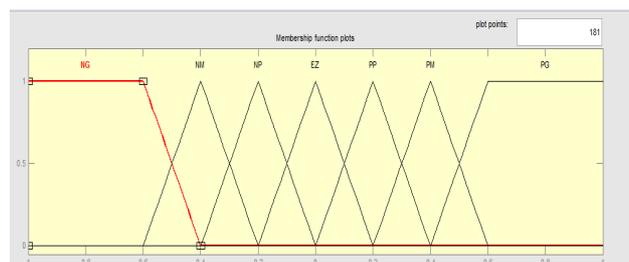
PM: Positive moyenne

NP: Négative petite

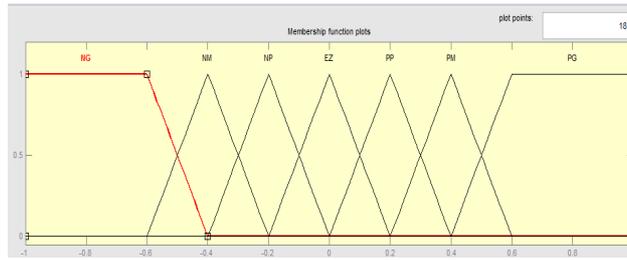
PG: Positive grande

EZ: Environ zéro

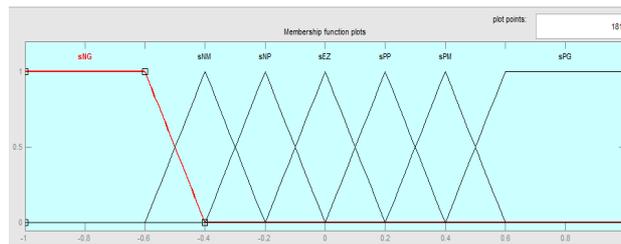
Les fonctions d'appartenance sont représentées dans la figure 8



a) Erreur



b) Variation de l'erreur



c) Commande

Fig. 8 : Fonctions d'appartenance des différentes variables linguistiques.

Le jeu de règles du régulateur flou à sept ensembles est représenté dans le Tableau 4

Tableau 4 Tableau des règles de commandes à sept classes

e	NL	NM	NP	EZ	PS	PM	PL
Δe							
NL	NL	NL	NL	NL	NM	NP	EZ
NM	NL	NL	NL	NM	NP	EZ	PS
NP	NL	NL	NM	NP	EZ	PS	PM
EZ	NL	NM	NP	EZ	PS	PM	PL
PS	NM	NP	EZ	PS	PM	PL	PL
PM	NP	EZ	PS	PM	PL	PL	PL
PL	EZ	PS	PM	PL	PL	PL	PL

4. Résultats de simulation

Le comportement de la structure de la commande directe du couple, appliquée à une machine asynchrone de forte puissance (1 Mw), est simulé sous l'environnement Matlab/Simulink. La simulation est effectuée dans les conditions suivantes :

La bande d'hystérésis du comparateur du couple est, dans ce cas, fixée à ± 0.05 N.m et celle du comparateur du flux à ± 0.001 wb.

Le couple de référence C_{ref} est récupère à la sortie d'un correcteur PI, et flux référence $\Phi_{sref}=3.6$ wb.

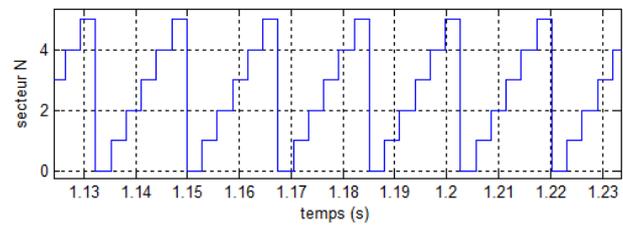
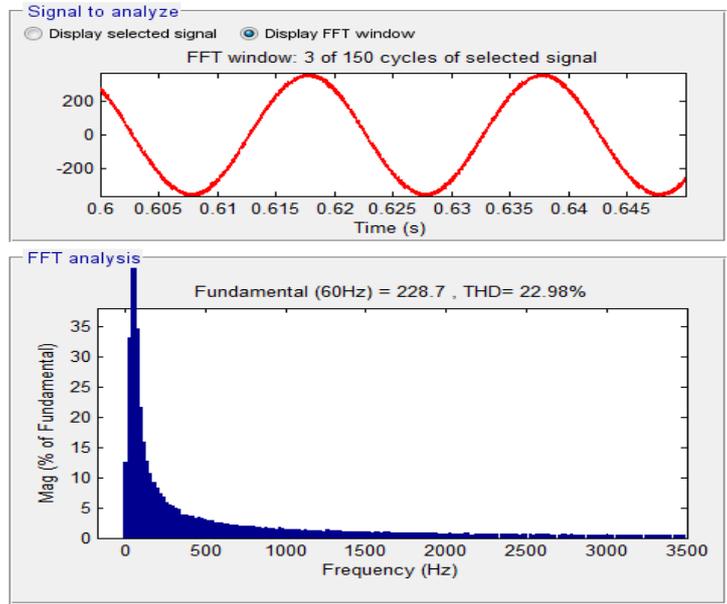
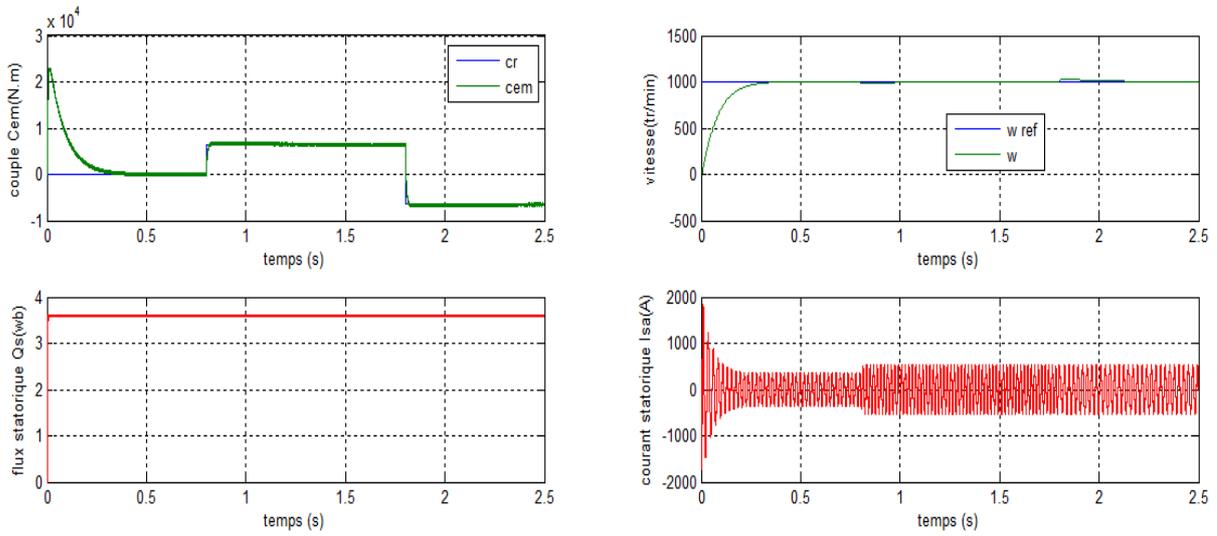


Fig. 9 : Performances de DTC classique appliquée à la MAS

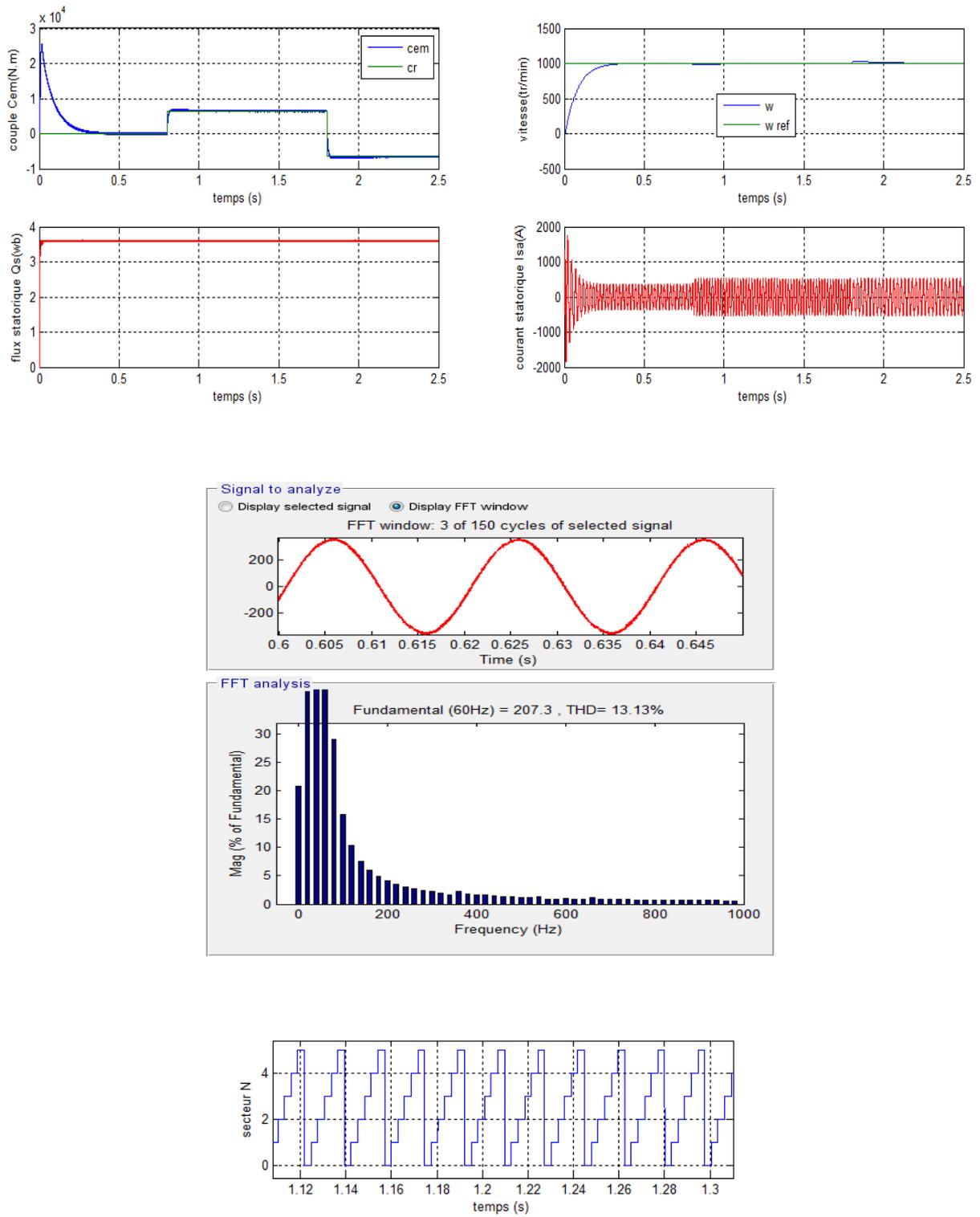


Fig. 10 : Performances de stratégie 1 de DTC appliquée à la MAS

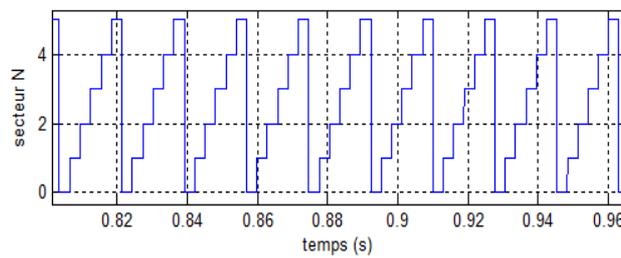
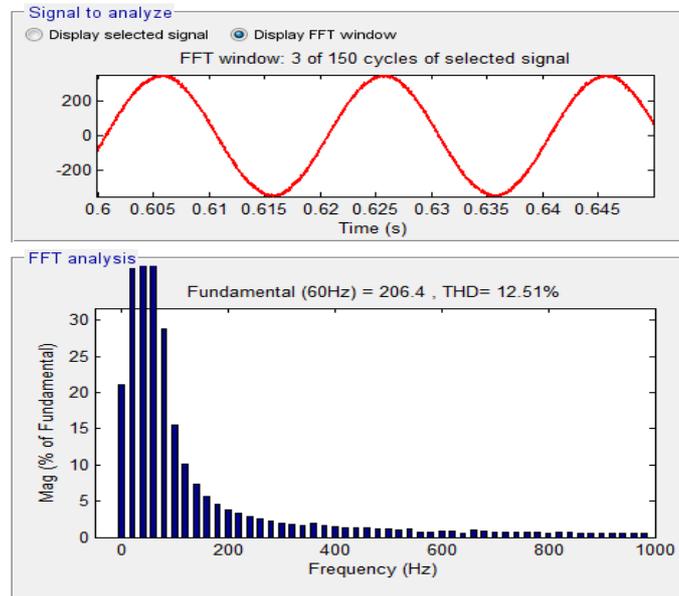
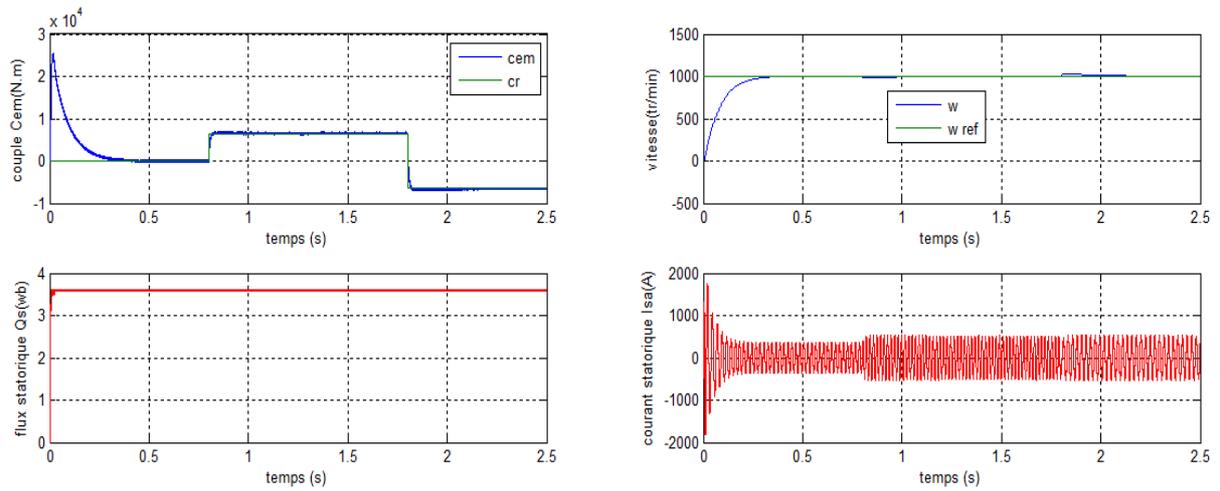
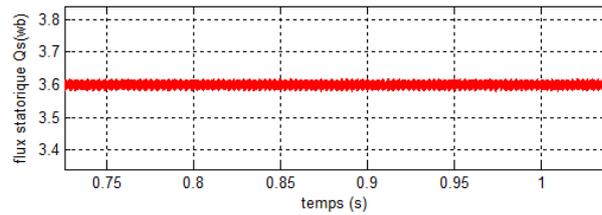
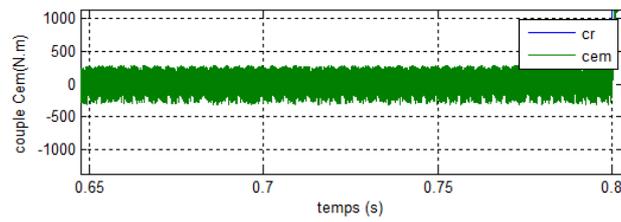
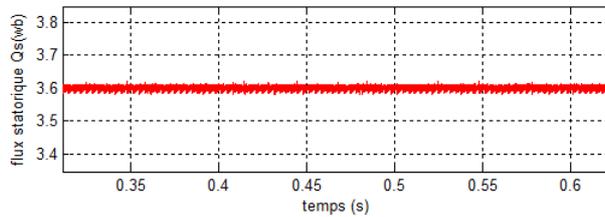
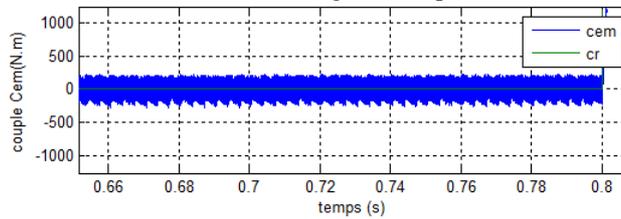


Fig. 11 : Performances de stratégie 2 de DTC appliquée à la MAS

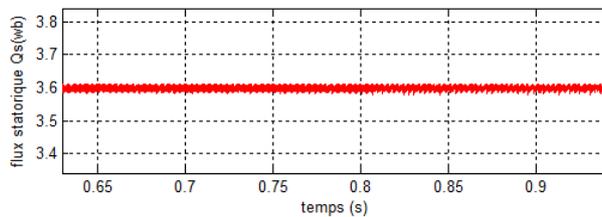
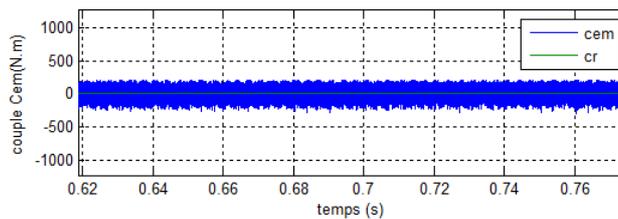
Dans le but de connaître la meilleure stratégie de la commande DTC de la MAS, une étude comparative est indispensable entre les stratégies proposées. La figure suivante présente la comparaison entre les stratégies proposées de la commande DTC deux niveaux.



a) Stratégie classique



b) Stratégie 1



c) Stratégie 2

Fig. 12 : ZOOMS du flux et couple: a) stratégie classique, b) stratégie 1, c) stratégie 2

Dans le Tableau 5, nous résumons les résultats de simulation obtenus par les stratégies proposées de la commande DTC sans les techniques de l'intelligence artificielle de la MAS.

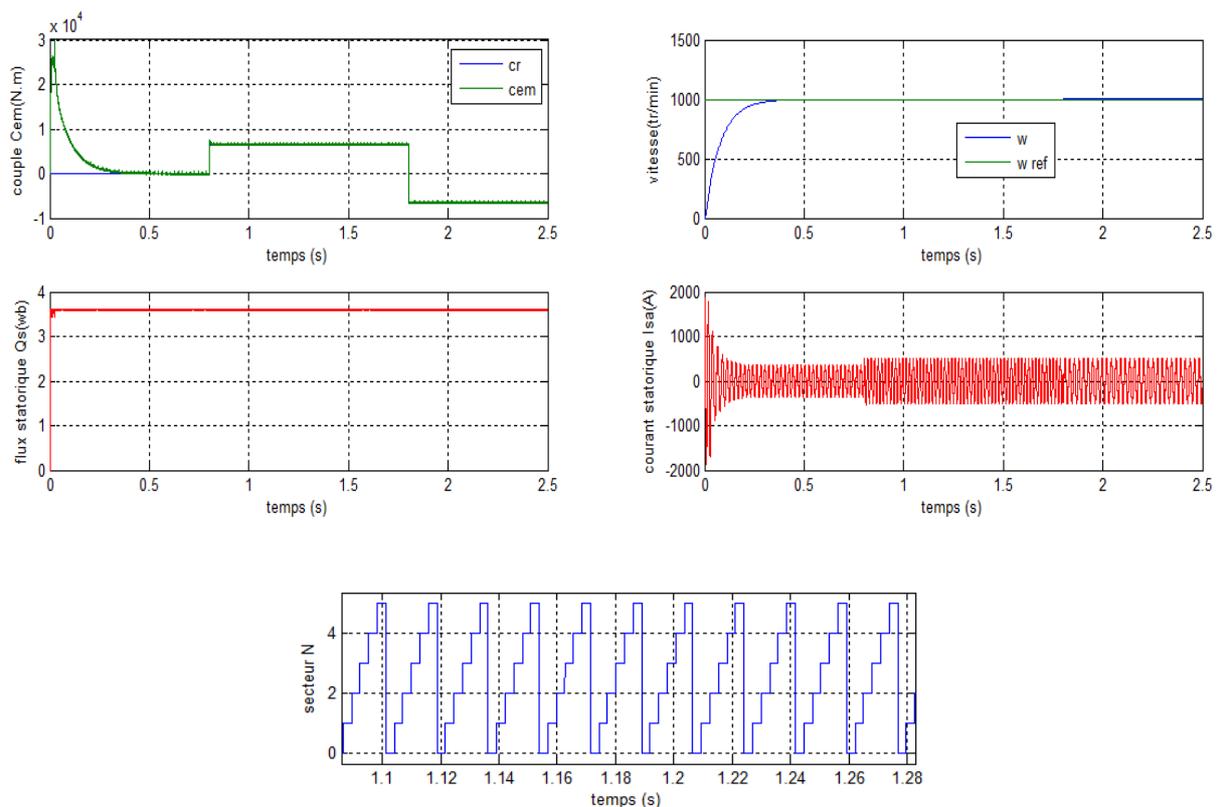
Tableau 5 Etude comparative entre stratégie classique, stratégie 1, et stratégie 2

	I_{sa} THD (%)	Minimisations des ondulations du couple	Minimisations des ondulations du flux
Stratégie classique	22.98	Assez bonne	Assez bonne
Stratégie 1	13.13	bonne	bonne
Stratégie 2	12.51	bonne	bonne

Ce tableau montre que la stratégie 2 de la commande DTC deux niveaux réduit considérablement les ondulations du flux, et du couple électromagnétique et la valeur de THD du courant statorique, comparativement à celle de stratégie classique et stratégie 1. D'un autre coté, on remarque que le module du flux reste constant pendant la période de simulation et il est totalement indépendant du couple, ce qui montre la nature découplée de la commande proposée. Une bonne poursuite de vitesse pour tous les modes de fonctionnement.

On applique les techniques de l'intelligence artificielle à la commande DTC du moteur asynchrone en fixant la consigne de vitesse à 1000 tr/min.

La Fig.13 présente les résultats de simulation de stratégie 2 de la commande DTC basée sur les techniques de l'intelligence artificielle (réseaux de neurones et la logique floue).



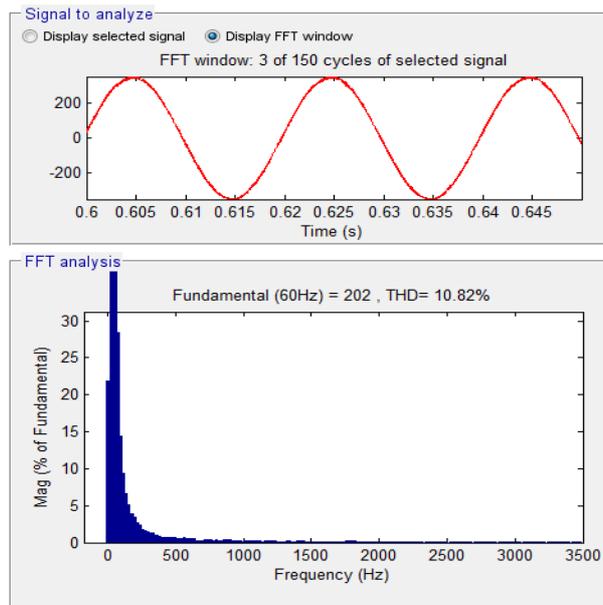


Fig. 13 : Performances de stratégie 2 de DTC basée sur les techniques de l’intelligence artificielle appliquée à la MAS

Dans le but de connaître la meilleure commande DTC, une étude comparative est indispensable entre la stratégie 2 de DTC deux niveaux et la stratégie 2 avec les techniques de l’intelligence artificielle. La Fig. 14 présenté la comparaison entre les deux commandes.

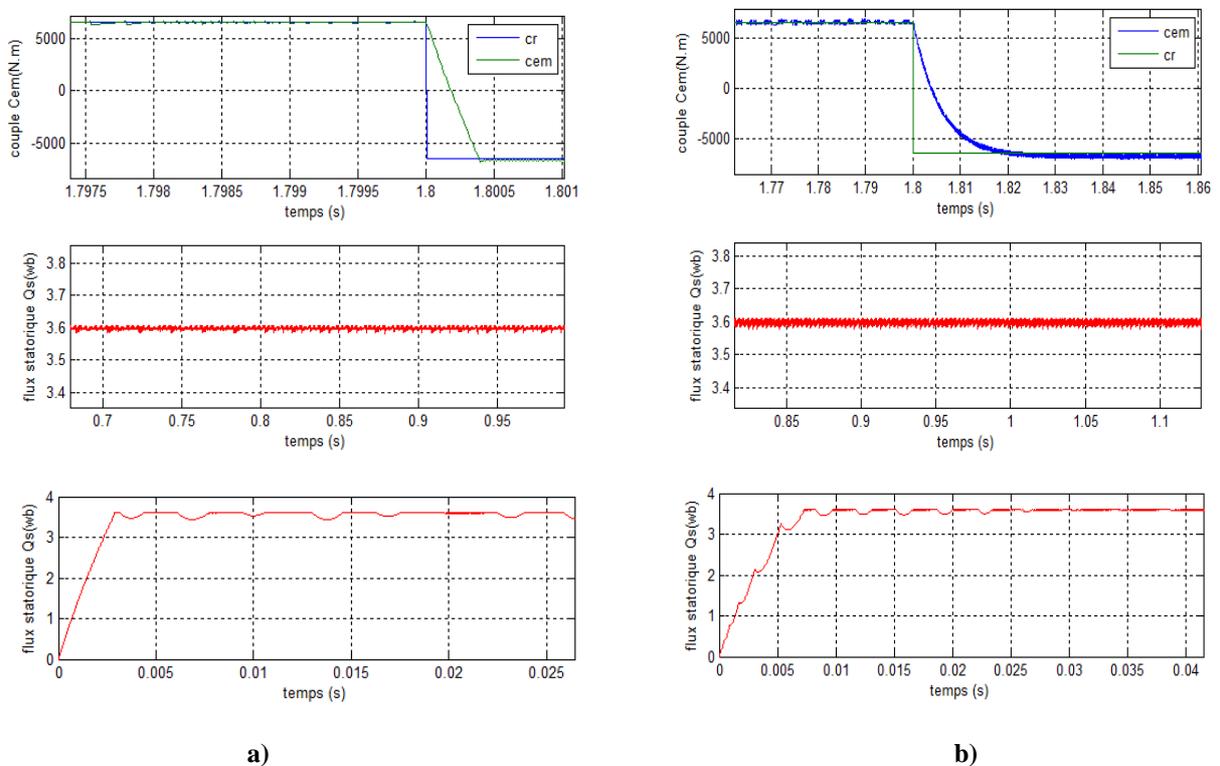


Fig. 14 : Zooms du flux et couple: a) stratégie 2 basée sur les techniques de l’intelligence artificielle, b) stratégie 2 classique

Dans le Tableau 6, nous résumons les résultats de simulation obtenus par les commandes DTC proposés avec et sans les techniques de l'intelligence artificielle de la MAS.

Tableau 6 Etude comparative entre la stratégie 2 et la stratégie 2 basés sur les techniques de l'intelligence artificielle

	I_{sa} THD (%)	Minimisations des ondulations du couple	Minimisations des ondulations du flux
Stratégie 2	12.51	bonne	bonne
Stratégie 2 basée sur les techniques de l'intelligence artificielle	10.81	parfait	Meilleur

Ce tableau montre que les résultats de simulation par les techniques de l'intelligence artificielle montrent que le suivi de la consigne est parfait. Nous remarquons que les ondulations du couple électromagnétique et du flux statorique réduit parfaitement par rapport à la stratégie 2 sans techniques d'intelligences artificielles. Nous avons pu conclure que les techniques de l'intelligence artificielle présentés des bonnes performances de stratégie 2 de la commande DTC, qui est l'objectif principale de notre article.

5. Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté les nouveaux tableaux de commutation (stratégies) de la commande directe du couple de la machine asynchrone (1MW) alimentée par onduleur à deux niveaux basés sur les techniques de l'intelligence artificielle. Dans le but d'améliorer les performances de la DTC (réductions d'ondulations du couple, du flux, et le THD du courant statorique), des tests de simulation de la commande par variation et inversement du couple de la charge, ont été présenté, les résultats obtenu montrent que la stratégie 2 proposé avec les techniques de l'intelligence artificielle est très performante.

6. Références

1. N. Benharir, M. Zerikat, S. Chekroun, A. Mechernene, "Approche adaptative d'une commande neuronale sans capteur d'un moteur asynchrone associée à un observateur par mode glissant," Communication Science & Technology, Cost, N°14, Januray 2014.
2. R. Zaiter, "Commande directe du couple DTC d'une machine asynchrone avec défaut," Mémoire de Magister, université Mohamed Khider-Biskra, 2013.
3. B. Sebti, "Commande par DTC d'un moteur asynchrone apport des réseaux de neurones," Mémoire de Magister, université de Batna, 2013.
4. B. O. Fethi, "Application des techniques de l'intelligence artificielle (LF-RN) pour le contrôle directe du couple d'une MAS alimentée par des onduleurs multiniveaux," Mémoire de Magister, université des Sciences et de la Technologie d'Oran, 2013.
5. H. Chaikhy, M. Khafallah, A. Saad, M. Essaadi, K. Chikh, "Evaluation des performances des commandes vectorielles de la machine à induction," Revue de Génie Industriel, ISSN 1313-8871, 2011, 6, 23-32.
6. D. Yacine, "Contrôle de la fréquence de commutation des hystérésis utilisés dans les commandes d'une machine à induction," Mémoire de Magister, université de Batna, 2007.
7. L. Benalia, "Commande en tension des moteurs à induction double alimentes," Mémoire de Magister, université de Batna, 2010.
8. B. M'hamed, B. Mokhtari, L. Mokrani, B. Azoui, A. Naamane, N. M'sridi, "Compensateur PI flou de la variation de la resistance statorique d'un moteur à reluctance variable commande par DTC," Acta Electrotehnica, Vol. 53, N°4, pp : 293-298, 2012.

9. A. Mechernene, M. Zerikat, S. Chekroun, “ Commande vectorielle sans capteur d’un moteur asynchrone associée à un observateur basé sur un mécanisme d’adaptation par réseaux de neurones,” Quatrième conférence internationale sur le Génie Electrique CIGE’10, université de Bechar, 3-4 novembre, pp : 84-90, 2010.
10. K. Chafaa, M. Ghanai, K. Benmahammed, “ Fuzzy modeling using kalman filter,” IET (ex IEE) Control Theory and Applications, Vol. 1, No. 1, pp: 58-64, 2007.
11. B. B. Meunier, “ La logique floue et cas applications,” Addison, 1995.
12. W. Benzaoui, B. Doufane, A. Medkour, “ Développement d’un régulateur flou en vue de la commande d’un héliostat,” Revue des Energies Renouvelables, SIENR’14, Ghardaia, pp : 27-34, 2014.
13. M. Abdelhafidh, “Stratégies de commande DTC-SVM et DPC appliquées à une MADA utilisée pour la production d’énergie éolienne,” Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2014.