

# Nouvelle approche pour la DTC modifié. Application à un actionneur électrique

Habib BENBOUHENNI<sup>1</sup>, Rachid TALEB<sup>2</sup>, Hacene MELLAH<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Oran (ENPO)  
BP1523 El M'nouer, Oran, Algeria

[habib0264@gmail.com](mailto:habib0264@gmail.com)

<sup>2</sup>Département d'Electrotechnique, université Hassiba Benbouali de Chlef (UHBC), Laboratoire LGEER  
Hay Salam, Route Nationale N° :19, 02000 Chlef, Algeria

**Résumé** – Nous présentons dans cette étude une amélioration de la commande DTC modifié. Nous avons proposées quatre stratégies de DTC modifié. Cependant, la présence des correcteurs à hystérésis pose le problème de fluctuations sur les différentes grandeurs de sortie de la machine asynchrone. Un technique ont été préposée pour remédier à ce problème, nous avons opté pour les techniques d'intelligence artificielle à base des réseaux de neurones: DTC-RNA modifié. Les éléments théoriques, et les résultats de simulation sont présentés et discutés. En régime permanent, les ondulations du flux, et du couple seront évaluées et comparées, pour les différents commandes. En régime transitoire, le but attendu est d'évaluer la commande qui donne la meilleure réponse dynamique.

**Mots Clés** — DTC modifié, Machine asynchrone, Réseaux de neurones, THD.

## I. INTRODUCTION

La machine à induction connaît un succès croissant depuis deux décennies en remplaçant progressivement les machines à courant continu et synchrones dans de nombreuses applications industrielles et dans les transports. Ce succès acquis par la machine à induction s'explique par sa conception robuste réduisant les frais de maintenance, par son coût relativement moindre par rapport aux autres machines électriques et également par l'augmentation des capacités de calcul des microprocesseurs permettant de réaliser une commande performante [1].

Pour contourner les problèmes de sensibilité aux variations paramétriques vécu par la commande vectorielle, on a considéré d'autre méthodes de commande dans lesquelles le flux et le couple électromagnétique sont estimés à partir des seules grandeurs électriques accessibles au stator et ceci sans le recours à des capteurs mécaniques, parmi ces méthodes, la commande directe du couple, basée sur l'orientation du flux statorique et qui est introduite en 1985 par Takahashi et Depenbrock [2].

Le principe de base de DTC est qu'on doit choisir directement des vecteurs de tension statorique selon les différences entre les références du couple et du flux statorique et leurs valeurs réelles. Les contrôleurs du courant suivi d'un comparateur à MLI ne sont pas utilisés dans des systèmes de

commande DTC et les paramètres de la machine ne sont pas utilisés également exception faite pour la résistance statorique du moteur. Ainsi la DTC possède l'avantage d'être moins dépendante des paramètres de la machine, de fournir une réponse du couple plus rapide en comparaison au contrôle du couple via des contrôleurs de courant à modulation de largeur d'impulsions, et une configuration plus simple [3].

Un des objectifs de la commande directe du couple est de réduire au maximum la fréquence de commutation de l'onduleur. Un autre est que le fonctionnement n'a pas besoin d'une tension continue constante à l'entrée de l'onduleur. D'autre part, cette loi de commande en couple s'adapte par nature à l'absence de capteur mécanique connecté à l'arbre du moteur (vitesse, position). Des travaux se sont donc multipliés sur ce sujet, initialement basés sur les principes de contrôle énoncés par I.Takahashi et donnant lieu à diverses évolutions de stratégies.

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 [1]. De façon générale, l'absence de maîtrise des harmoniques de couple a généré de nombreux problèmes liés à la compatibilité électromagnétique de l'équipement. Tel que le niveau parfois excessif de bruit audible et l'excitation de certains modes mécaniques résonants (problème des couples pulsatoires) pouvant entraîner un vieillissement précoce du système. Certains travaux se sont donc consacrés à l'obtention d'une meilleure maîtrise des harmoniques et/ou de la fréquence de commutation des interrupteurs de l'onduleur [3].

La technique DTC classique implique un fonctionnement de l'onduleur 2 niveaux standard avec une fréquence de commutation variable, parfois élevée et incompatible avec des applications de forte puissance du fait du niveau des pertes par commutation. D'autre part, les récentes structures de convertisseurs continu - alternatif multiniveaux semblent bien adaptés pour des applications de forte puissance, du fait qu'elles permettent l'utilisation des semi-conducteurs rapides (IGBT) sans risque sur la sûreté de fonctionnement du système.

On a vu de ce qui précède que la DTC classique présenté des ondulations dans le flux et le couple. Pour cela, on

présenté dans ce qui suit une stratégie de commande qui minimisent ces ondulations appelé la commande DTC modifié.

Les réseaux de neurones connaissent depuis quelques années un succès croissant dans divers domaines des sciences de l'ingénieur, celui du génie des procédés n'échappe pas à cette règle. Dans cet article, nous intéressons à l'application des réseaux de neurone la commande DTC Modifié propose.

L'un des défis de l'homme aujourd'hui est de copier la nature et de reproduire des modes de raisonnement et de comportement qui lui sont propre. Les réseaux de neurones, sont nés de cette envie, ils constituent une famille de fonctions non linéaires paramétrées, utilisées dans de nombreux domaines (physique, chimie, biologie, finance, etc...), notamment pour la modélisation de processus et la synthèse de lois de commandes [4].

Le but de ce travail est comparer les résultats obtenue par la DTC modifié classique et les nouveaux tables de commutation proposées.

## II. FONCTIONNEMENT ET SEQUENCES D'UN ONDULEUR DE TENSION TRIPHASÉ

À partir de la stratégie de base de DTC proposée par *Takahashi*, plusieurs stratégies se sont développées, profitant des degrés de liberté offerts par la structure de l'onduleur de tension triphasé. Plusieurs tables de vérité définissant les états des interrupteurs de L'onduleur, sont présentés sous diverses formes. On s'intéresse seulement à la table de vérité originale de *Takahashi* et celle sans séquences nulles [5].

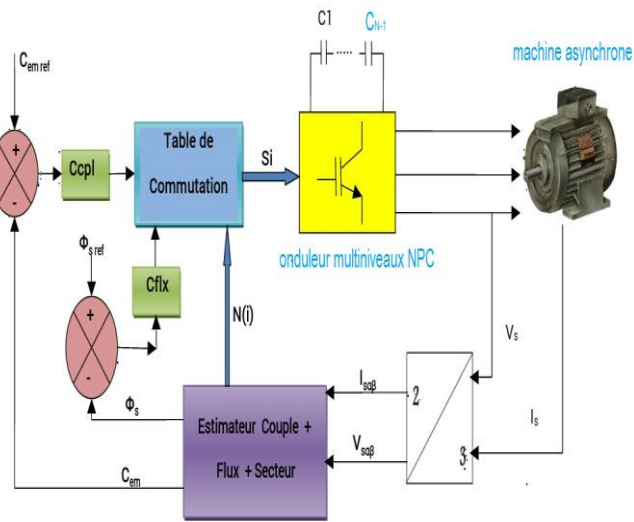


Fig. 1 Structure de base de la commande directe du couple sans boucle de vitesse

Un onduleur de tension triphasé permet d'atteindre sept positions distinctes dans le plan déphase, correspondant aux huit séquences de tension de sortie de l'onduleur, (voir Fig.1). On peut écrire [6, 7]:

$$\vec{V}_s = V_{s\alpha} + jV_{s\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_{dc} [C_a + C_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + C_c e^{j\frac{4\pi}{3}}] \quad (1)$$

$[V_a \ V_b \ V_c]^T$  Est le vecteur de tensions de sortie de l'onduleur qui depend de l'état des interrupteurs. Cet état est représenté, théoriquement, par 3 grandeurs booléennes de commande  $C_{k_i} (i = a, b, c)$ , où  $C_{k_i}$  est l'état de l'interrupteur  $k_i$ , supposé parfait, tel que pour le  $i^{ème}$  bras de l'onduleur ( $i=a, b, c$ ):

- $C_{k_i} = 1$  si l'interrupteur en haut est fermé et l'interrupteur en bas est ouvert ;
- $C_{k_i} = 0$  si l'interrupteur en haut est ouvert et l'interrupteur en bas est fermé.

Les huit vecteurs de tension sont représentés dans le plan  $(\alpha\beta)$  par la Fig.2 où  $V_0$  et  $V_7$  sont identiquement nuls. Les six autres ont le même module égale à  $\sqrt{\frac{2}{3}} U_{dc}$ . Les extrémités de ces six vecteurs définissant les sommets d'un hexagone régulier puisque deux vecteurs successifs font entre eux un angle de  $\frac{\pi}{3}$  appelée secteur ou zone.

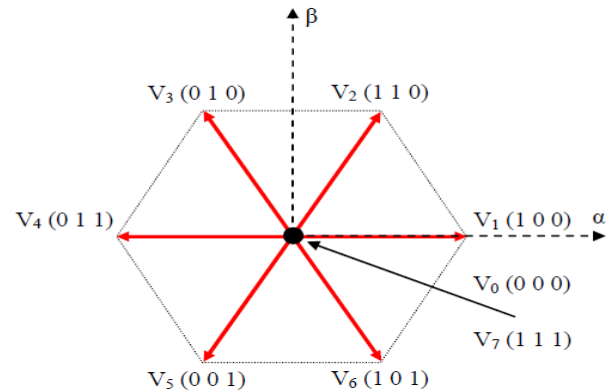


Fig. 2 Séquences de fonctionnement d'un onduleur, et partition du plan complexe en six secteurs angulaires

Avec:

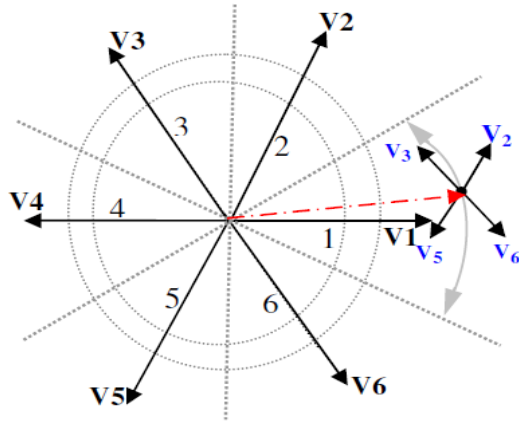
$$\vec{V}_0 \Leftrightarrow (C_{k_1}; C_{k_2}; C_{k_3}) = (0; 0; 0) \text{ et } \vec{V}_7 \Leftrightarrow (C_{k_1}; C_{k_2}; C_{k_3}) = (1; 1; 1) \quad (2)$$

La méthode la plus simple de piloter l'onduleur consiste en un pilotage direct de l'onduleur par applications successives à la période de commande de l'onduleur, des vecteurs  $V_i (i=1, \dots, 6)$  non nuls, et des vecteurs nuls  $V_0$  et  $V_7$ . Le vecteur de contrôle à donc huit possibilités et le seule réglage possible est le temps d'applications des vecteurs (période fixe). Son principe est de sélectionner un des huit vecteurs tensions générés par l'onduleur de tension pour contrôler, à la fois le couple et le flux statorique, après la détermination des composantes du vecteur flux statorique, soit par estimation en intégrant directement les tensions statoriques soit préféablement par observation, par la suite le couple électromagnétique est estimés à partir des courants statoriques mesurés [8].

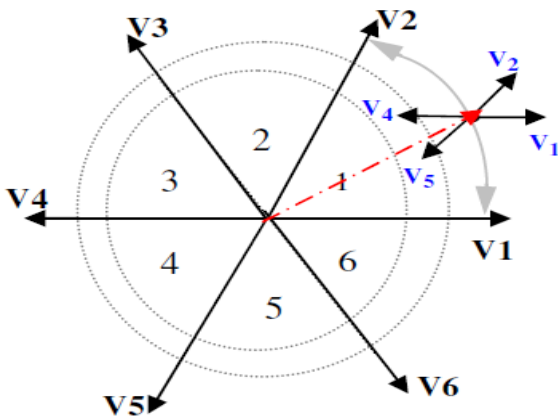
## III. LE CONTRÔLE DIRECTE DU COUPLE MODIFIÉ

Dans cette partie l'idée est de changer le tableau de vérité à partir d'une modification des secteurs de la DTC classique,

tels qu'au lieu de prendre le premier secteur de  $-30^\circ$  à  $30^\circ$ , il est pris de  $0^\circ$  à  $60^\circ$ . La Fig.3b montré cette nouvelle position des zones, dans ce cas-ci, les états non utilisés dans la première zone seront  $V_3$  et  $V_6$  au lieu de  $V_1$  et de  $V_4$  [9].



a)



b)

Fig. 3 a) DTC classique, b) DTC Modifié

Le Tableau.1 illustre la comparaison entre les deux technique de contrôle DTC [10]:

**TABLEAU I**  
COMPORTEMENT DE LA DTC CLASSIQUE ET LA DTC MODIFIÉ

	DTC classique	DTC modifiée
$V_1$	$-30^\circ \rightarrow 30^\circ$ couple ambiguïté	$0^\circ \rightarrow -60^\circ$ ( $Cem \uparrow, \Phi \uparrow$ )
$V_2$	$30^\circ \rightarrow 90^\circ$ ( $Cem \uparrow, \Phi \uparrow$ )	$60^\circ \rightarrow 0^\circ$ ( $Cem \uparrow, \Phi \uparrow$ )
$V_3$	$90^\circ \rightarrow 150^\circ$ ( $Cem \uparrow, \Phi \downarrow$ )	$60^\circ \rightarrow 120^\circ$ flux ambiguïté
$V_4$	$-150^\circ \rightarrow 150^\circ$ couple ambiguïté	$120^\circ \rightarrow 180^\circ$ ( $Cem \uparrow, \Phi \downarrow$ )
$V_5$	$-150^\circ \rightarrow -90^\circ$ ( $Cem \downarrow, \Phi \downarrow$ )	$-120^\circ \rightarrow -180^\circ$ ( $Cem \downarrow, \Phi \downarrow$ )
$V_6$	$-90^\circ \rightarrow -30^\circ$ ( $Cem \downarrow, \Phi \uparrow$ )	$-60^\circ \rightarrow -120^\circ$ couple ambiguïté

Il peut voir que les états  $V_1$  et  $V_4$ , ne sont pas employés dans le DTC classique (DTC\_C) parce qu'ils peuvent

augmenter ou diminuer le couple au même secteur selon si la position est dans les premiers ou les deuxième  $30^\circ$ . Dans la DTC modifiée (DTC-M),  $V_3$  et  $V_6$  ne sont pas utilisés. Cependant, dans la DTC modifié l'ambiguïté se trouve dans le couple au lieu du flux comme dans la DTC classique [9].

L'avantage principal de DTC modifiée est d'avoir une fréquence de commutation constante. Par conséquent, il est préférable de perdre l'usage de deux états pour réduire et maîtriser la fréquence de commutation. Les stratégies proposé pour DTC modifié est donnée par les Tableaux 2- 5 [8, 9].

**TABLEAU II**  
TABLE DE VÉRITÉ CLASSIQUE DE LA DTC MODIFIÉ

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

**TABLEAU III**  
TABLE DE VÉRITÉ DE STRATEGIE 1 DE LA DTC MODIFIÉ

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

**TABLEAU IV**  
TABLE DE VÉRITÉ DE STRATEGIE 2 DE LA DTC MODIFIÉ

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

**TABLEAU V**  
TABLE DE VÉRITÉ DE STRATEGIE 3 DE LA DTC MODIFIÉ

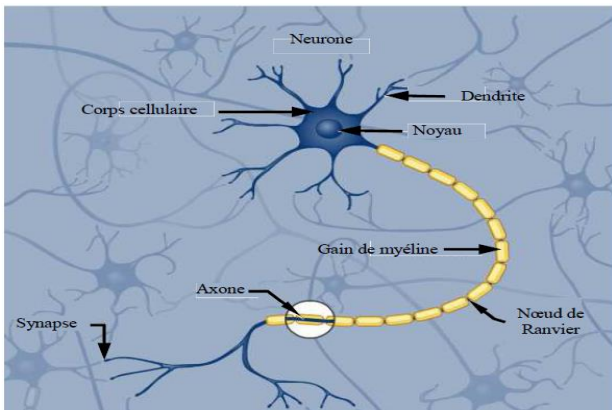
N		1	2	3	4	5	6
Cflx	Ccpl						
1	1	2	3	4	5	6	1
	0	1	2	3	4	5	6
	-1	1	2	3	4	5	6
0	1	4	5	6	1	2	3
	0	5	6	1	2	3	4
	-1	5	6	1	2	3	4

**TABLEAU VI**  
TABLE DE VÉRITÉ DE STRATEGIE 4 DE LA DTC MODIFIÉ

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

#### IV. LE CONTRÔLE DIRECT DU COUPLE NEURONALE MODIFIÉ

L'origine des réseaux de neurones vient de l'essai de modélisation mathématique du cerveau humain les premiers travaux datent de 1943 et sont l'oeuvre de MM. Mac Culloch et Pitts. Ils supposent que l'impulsion nerveuse est le résultat d'un calcul simple effectué par chaque neurone et que la pensée née grâce à l'effet collectif d'un réseau de neurone interconnecté (voir la Fig.4). Ils ont connu des débuts prometteurs vers la fin des années 50, mais le manque d'approfondissement de la théorie a gelé ces travaux jusqu'aux années 80 [4].

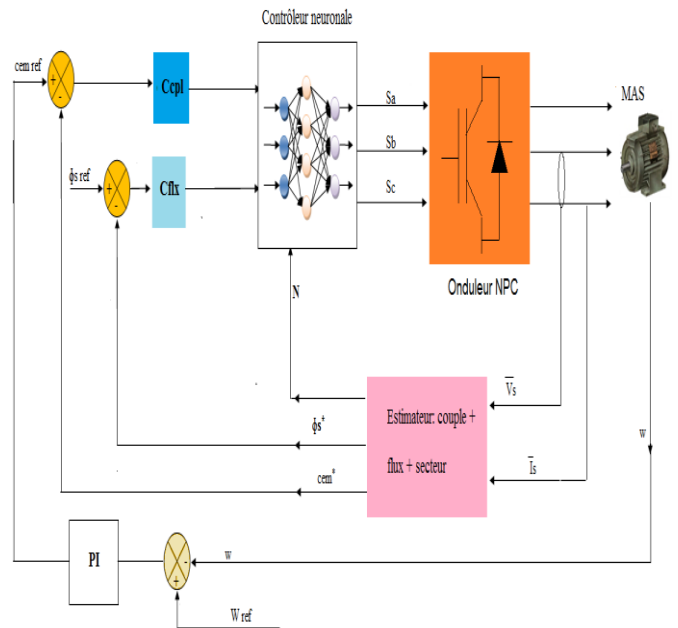


**Fig. 4** Modèle d'un neurone biologique.

La structure de commande neuronale directe du couple (DTC-RNA), de la machine asynchrone est représentée par la Fig.5. Dont la table de commutation sont remplacé par un contrôleur neuronal, et dont les entrées sont Ccpl du couple, et Cflx du flux, et la position (zone) du flux statorique  $Z(i)$ , et les sorties sont les impulsions  $S_a, S_b, S_c$  permettant la commande des interrupteurs de l'onduleur [8].

Pour générer le contrôleur RNA par Matlab/Simulink ou on a choisi 30 couches cachées et 3 couches de sorties avec les fonctions d'activation respectivement de type « tansig » et « purelin ».

La mise à jour des poids et des biais de ce réseau est réalisés par un algorithme de retropropagation nommé l'algorithme de Levenberg-Marquardt (LM).



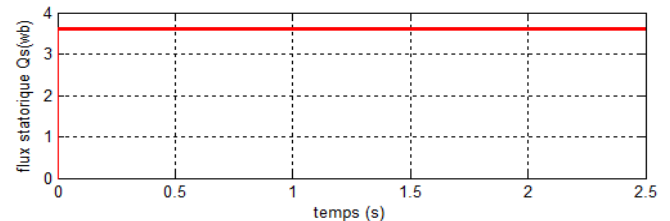
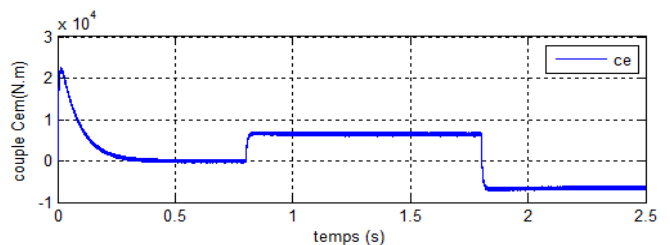
**Fig.5** Commande directe du couple modifié de la MAS basée sur les RNA

**TABLEAU VII**  
PROPRIÉTÉS DU LM

Paramètres du LM	valeurs
Nombre de couche cachée	30
Pas d'apprentissage	0.002
Pas d'affichage (affichage de l'erreur par morceaux)	50
Nombre d'itération (epochs)	5000
Coef d'accélération de convergence (mc)	0.9
Erreur (goal)	0
Fonctions d'activation	Tansig, Purelin

#### V. RÉSULTATS DE SIMULATION

Les résultats de simulation des stratégies proposées de la commande DTC modifié basée sur les RNA de la MAS alimentée par un onduleur de tension à deux niveaux sont illustrés dans les Figures 6, 7, 8, 9, et 10.



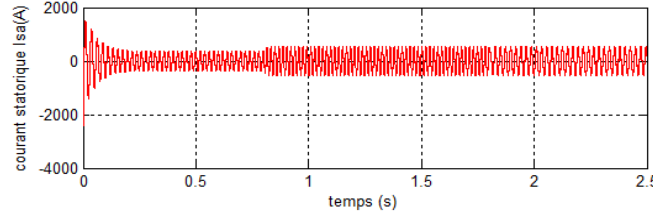
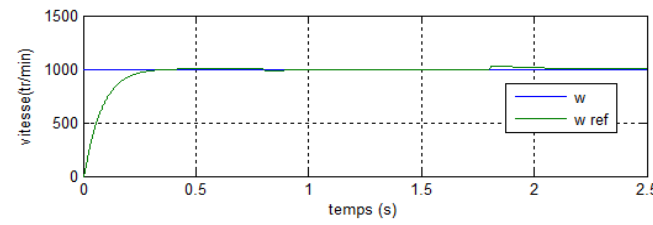
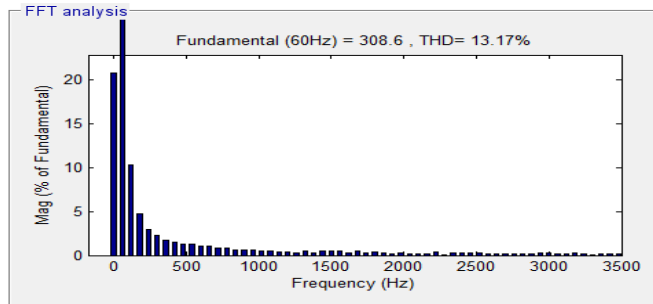
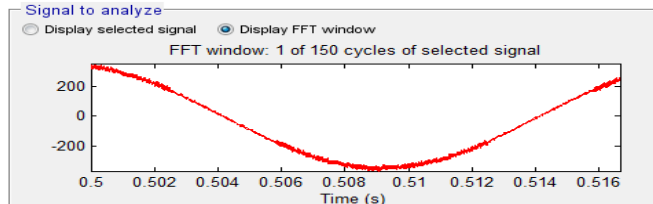
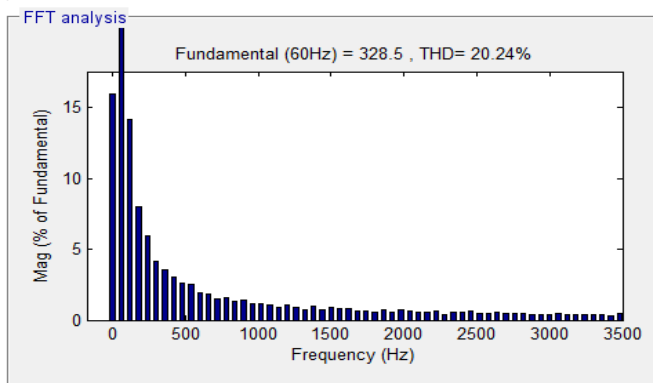
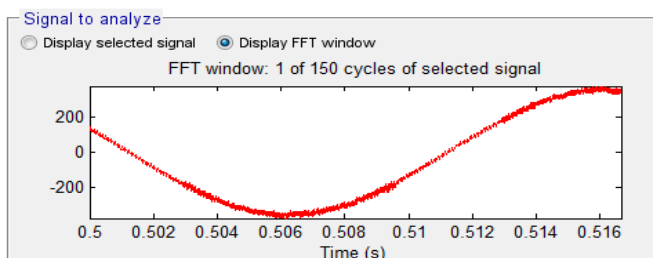
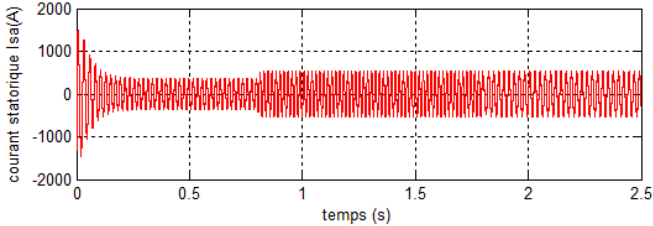
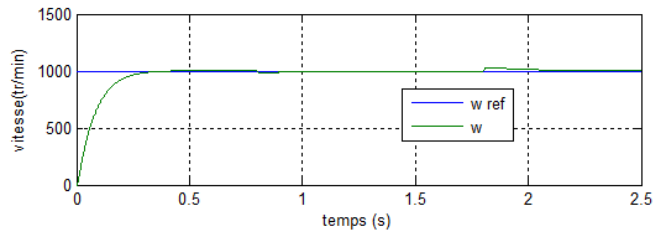
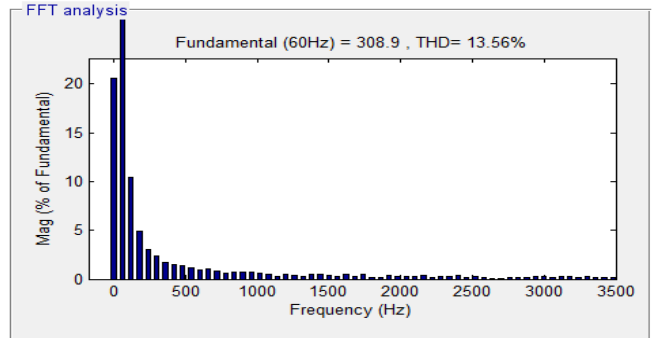
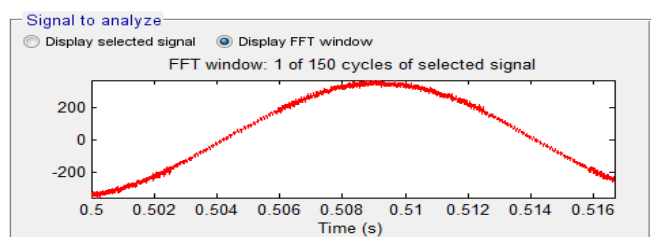
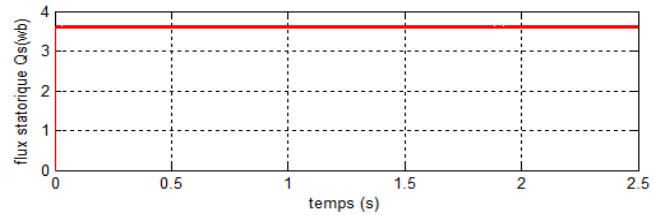
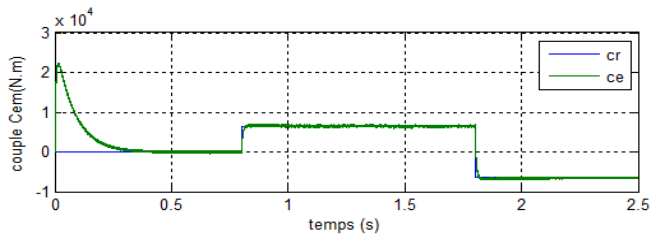
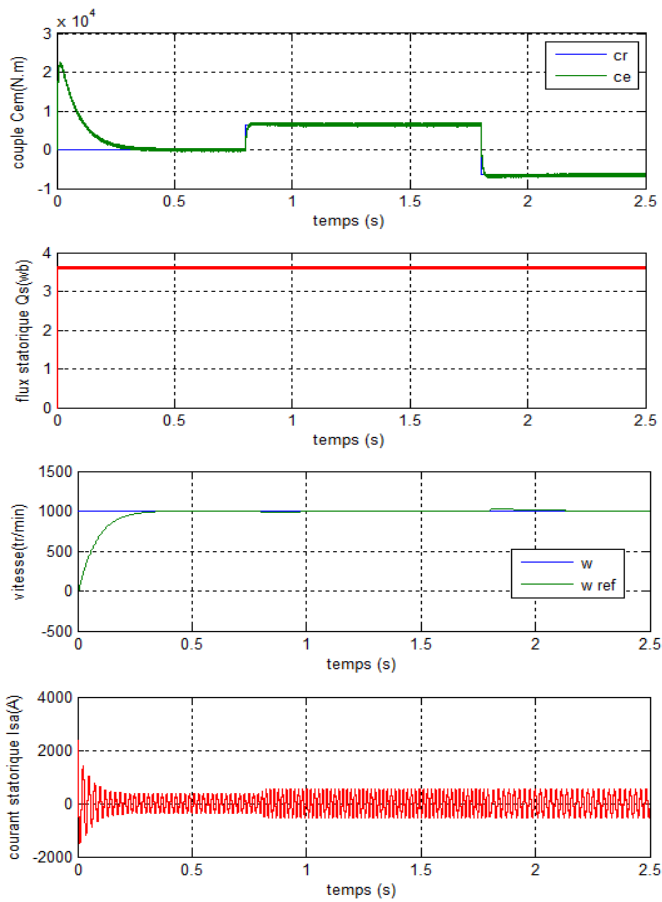


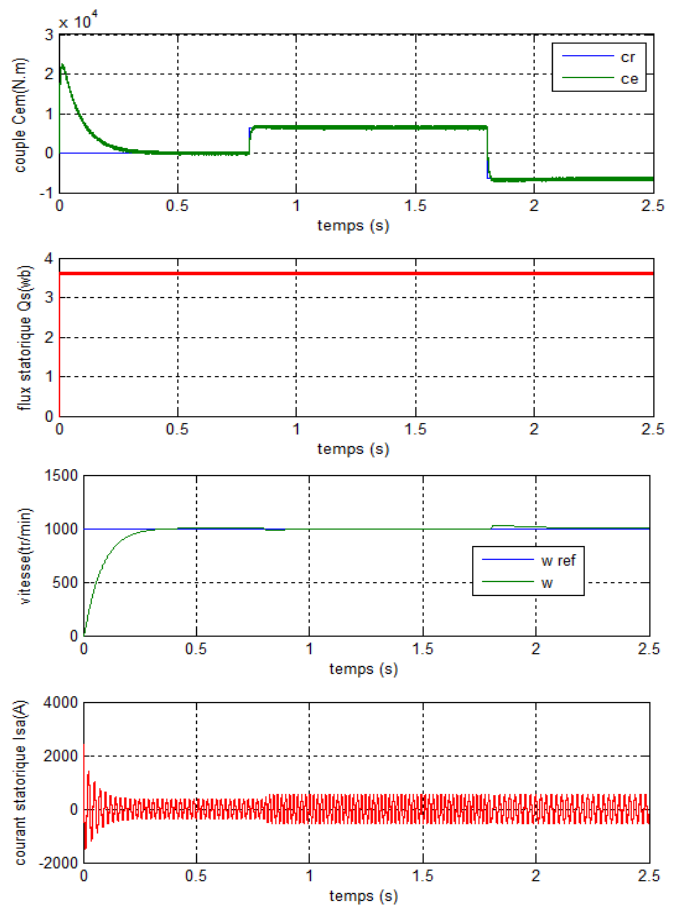
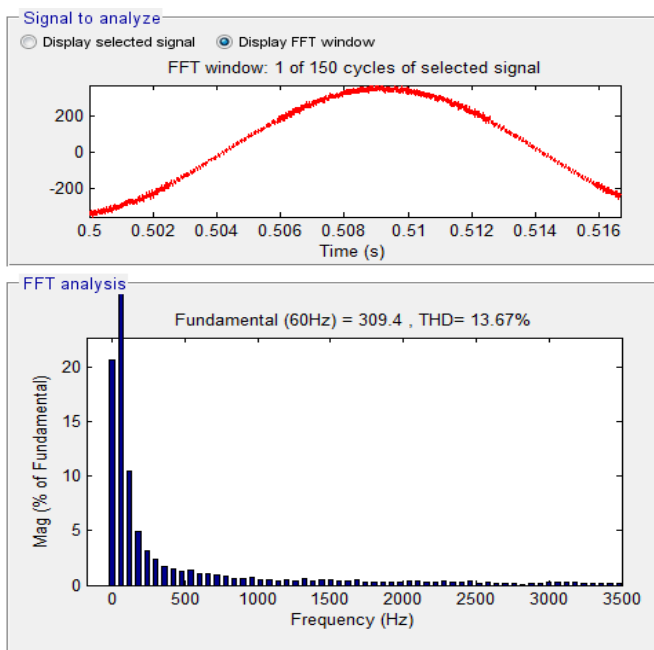
Fig. 7 Performances de stratégie 1 de la commande DTC modifié neuronale appliquée à la MAS

Fig. 6 Performances de la commande DTC modifié neuronale appliquée à la MAS

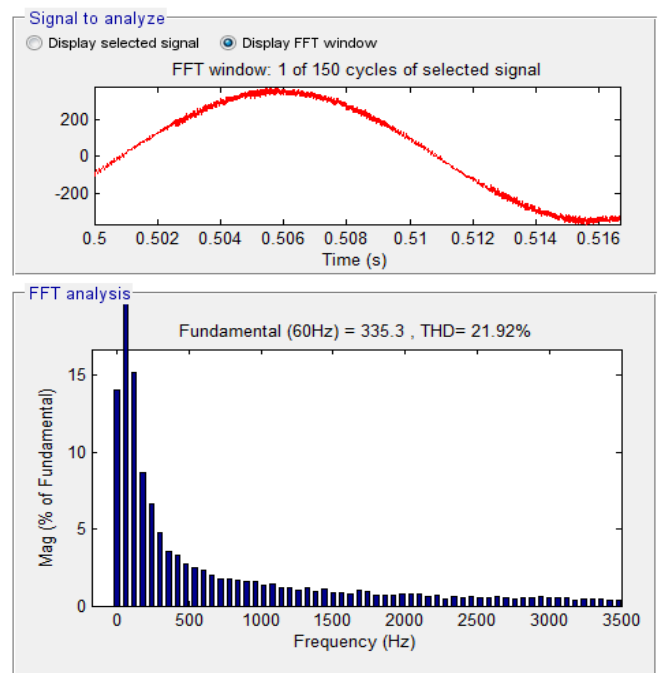


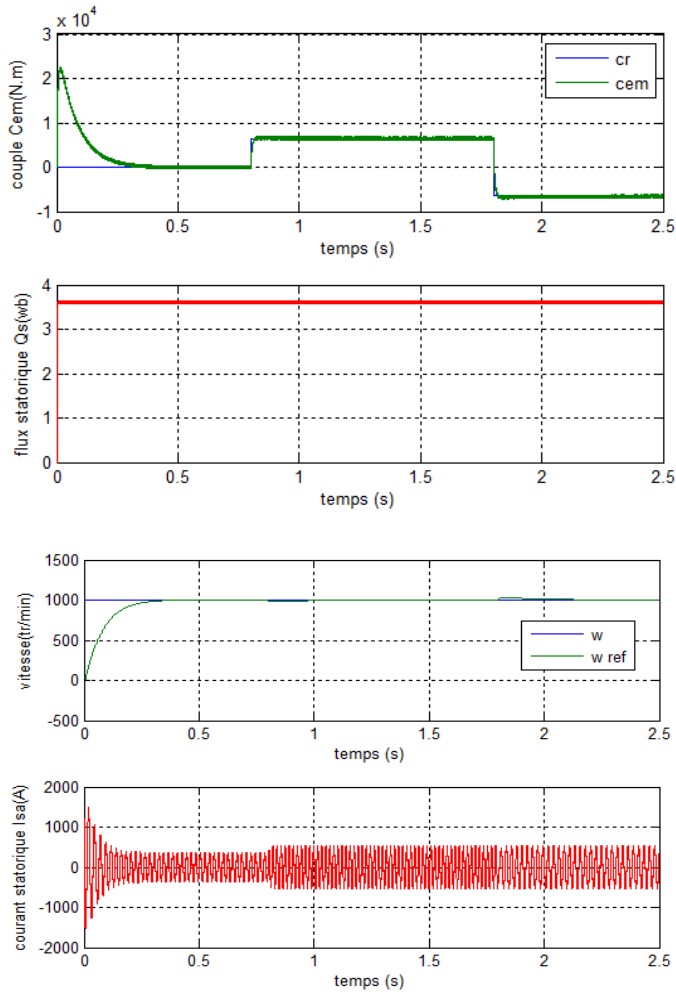


**Fig. 8** Performances de stratégie 2 de la commande DTC modifié neuronale appliquée à la MAS



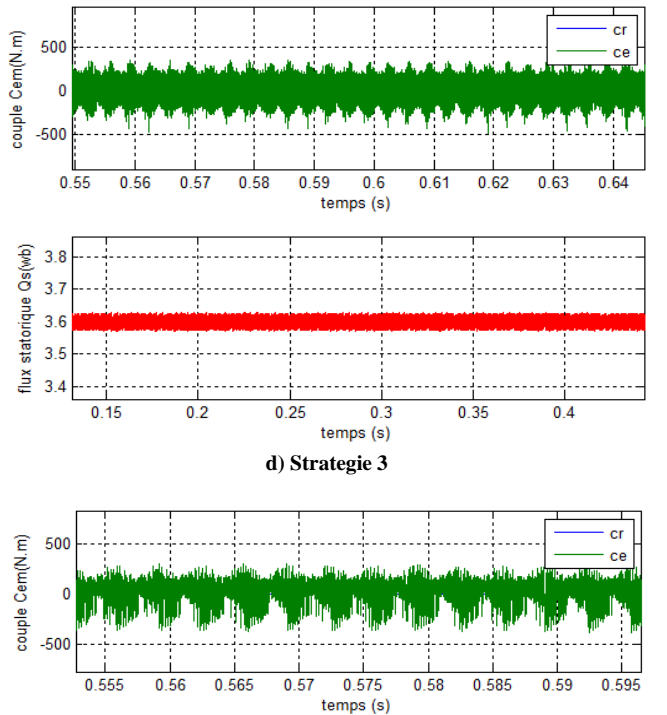
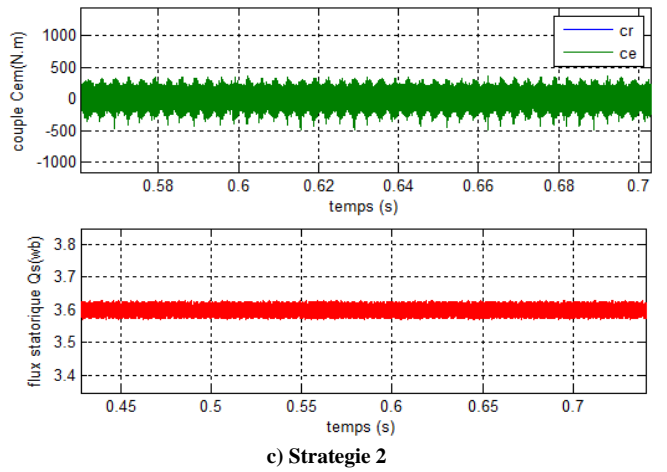
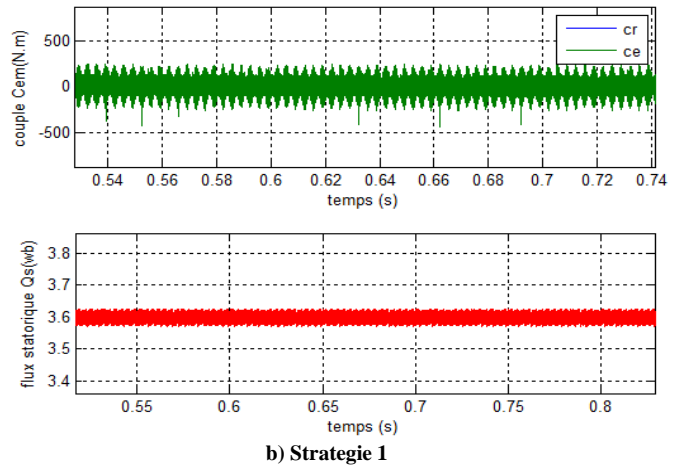
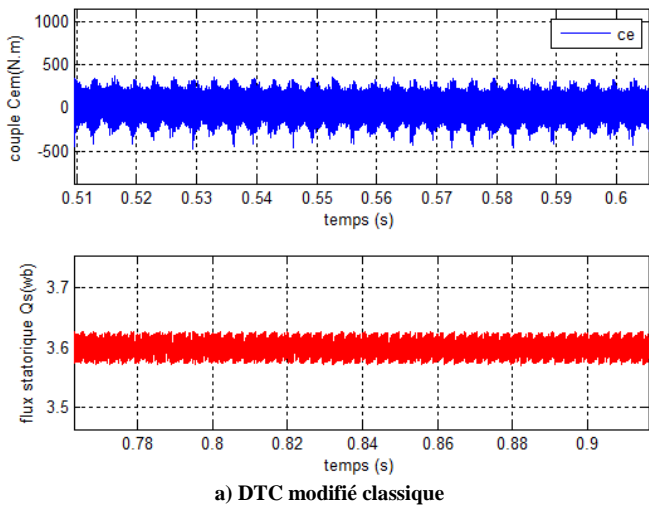
**Fig. 9** Performances de stratégie 3 de la commande DTC modifié neuronale appliquée à la MAS

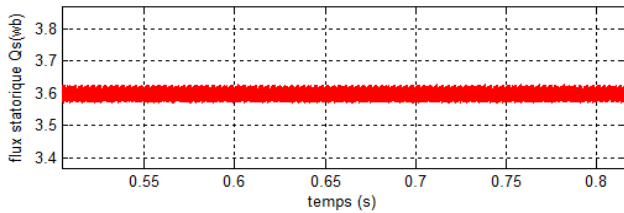




**Fig. 10** Performances de stratégie 4 de la commande DTC modifié neuronale appliquée à la MAS.

Dans le but de connaître la meilleure stratégie de la commande DTC modifié de la MAS, une étude comparative est indispensable entre les quatre stratégies traitées précédemment. La figure suivante présent la comparaison entre les stratégies proposées.





e) Stratégie 4

Fig. 11 Zooms obtenues par les stratégies proposés de la commande DTC modifié basée sur les RNA de la MAS

TABLEAU VIII

ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES STRATÉGIES PROPOSÉES BASÉE SUR LES RNA

	DTC modifié classique	Stratégie 1	Stratégie 2	Stratégie 3	Stratégie 4
$I_{sa}$ THD (%)	20.24	<b>13.17</b>	13.56	13.67	21.92

On conclue d'après, la Fig. 9 et Tableau 8 que la stratégie 1 proposé de la commande DTC modifié basée sur les réseaux de neurones est plus performante que les autres stratégies de la commande DTC modifié neuronale de la MAS.

D'un autre coté, une bonne poursuite de vitesse pour toutes les stratégies proposées. La stratégie 1 de la commande DTC-RNA modifié garantit une meilleure qualité de la forme d'onde du courant statorique par rapport à d'autre stratégies,

## VI. CONCLUSIONS

Dans cet article, nous avons présenté différentes stratégies de commande DTC modifié de la machine asynchrone de forte puissance alimentée par onduleur NPC à deux niveaux basée sur les réseaux de neurones. Dans le but d'améliorer les performances de la commande DTC modifié de la MAS (réductions d'ondulations du couple et du flux, temps de réponse, THD du courant statorique), des testes de simulation de la commande par variation et inversement du couple de charge, ont été présenté, les résultats obtenu montrent que la stratégie 1 de DTC-RNA modifié proposé avec régulation de vitesse est très performante, par rapport a la commande DTC modifié classique à base des RNA.

## REFERENCES

- [1] H. Chaikhy, M. Khafallah, A. Saad, M. Es-Saadi, K. Chikh, "Evaluation des performances des commandes vectorielles de la machine à induction," Revue de Génie Industriel, ISSN 1313-8871, 2011, 6, 23-32.
- [2] R. Zaiter, "Commande Directe du Couple DTC d'une Machine Asynchrone avec Défaut," Mémoire de Magister, université Mohamed Khider-Biskra, 2013.
- [3] M. Nefsi, A. Massoum, A. Meroufel, P. Wira, "Contrôle Directe du Couple de la Machine Asynchrone basé sur MLI Vectorielle Discrétisée (DSVM-DTC)," Acta Electrotehnica, Vol. 53, Number 1, 2012.
- [4] B. Sebti, "Commande par DTC d'un Moteur Asynchrone apport des Réseaux de Neurones," Mémoire de Magister, université de Batna, 2013.
- [5] A. Aissa, "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, 2005.
- [6] 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, 2014.
- [7] C. Abdesselam, "Commande Directe du Couple du Moteur Asynchrone –Apport de la Logique Floue," Mémoire de Magister, université de Batna, 2008.
- [8] D. Youcef, "Commande Directe du Couple et des Puissances d'une MADA Associée à un Système éolienne par les Techniques de L'intelligence Artificielle," Thèse de Doctorat en Science, université Djillali Liabes de Sidi Belabbés, 2015.
- [9] T. Riad, "Contribution à la Commande Directe de Couple d'une Machine Asynchrone Triphasée," Thèse de Doctorat, université mentouri Constantine, 2008.
- [10] Dris Ahmed, "Etude des Différentes Stratégies de Commande Non Linéaire de la Machine Asynchrone avec Estimation du Flux et de la Vitesse," Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Oran, 2015.