

Amélioration de DTC classique par DTC-2 niveaux avec vecteurs nuls à 12 secteurs basée sur les réseaux de neurones de la MAS

Habib BENBOUHENNI¹, Rachid TALEB²

¹Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Oran (ENPO)

BP1523 El M'nouer, Oran, Algérie

habib0264@gmail.com

²Département d'Electrotechnique, université Hassiba Benbouali de Chlef (UHBC), Laboratoire LGEER

Hay Salam, Route Nationale N° :19 ,02000 Chlef, Algérie

r.talbe@univ-chlef.dz

Résumé – Nous présentons dans cette étude une amélioration de la commande DTC classique avec vecteurs nuls. Nous allons procéder à une comparaison des performances de la commande DTC proposé avec commande DTC classique avec vecteurs nuls basée sur les réseaux de neurones de la machine asynchrone de forte puissance (1MW). Les résultats de simulation sont présentés et discutés. Les ondulations du courant, flux et du couple seront évaluées et comparées pour les deux commandes. Le but attendu est d'évaluer la commande qui donne la meilleure réponse dynamique de la machine asynchrone.

Mots Clés— Moteur asynchrone; Commande DTC; Réseaux de neurone; Tableau de commutation

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].

La commande vectorielle par orientation du flux rotorique, présenté 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 des machines asynchrones durant les années 80, dans ces méthodes de contrôle le flux statorique et le couple électromagnétique sont estimés à partir des seules grandeurs électriques accessibles au stator, et ceci sans recours à des capteurs mécaniques. Cette loi de contrôle présente des performances dynamiques remarquables de même qu'une bonne robustesse vis-à-vis des écarts de paramètres du moteur [2].

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 de niveau des pertes par commutation [3].

La commande DTC est caractérisée principalement par une bonne réponse dynamique du couple, une bonne robustesse et une complexité moindre que la commande vectorielle. En revanche, on observe une ondulation élevée du couple et du flux. Toutefois, la stabilité de la réponse et le découplage de la commande flux et couple sont beaucoup plus précis avec la commande DFOC [1]. 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.

Dans cet article nous allons présenter un nouveau tableau de commutation de la commande DTC classique avec vecteurs nuls de la machine asynchrone de forte puissance (1Mw) alimentée par un onduleur à deux niveaux basée sur les réseaux de neurones, et comparation les résultats par simulation de la commande DTC proposé neuronale par la commande DTC classique neuronale avec vecteurs nuls.

II. MODELE DYNAMIQUE DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Les equations mathématiques de la machine à induction dans le repère fixé au stator s'écrivent [4]:

- Equations des tensions statoriques et rotoriques:

$$V_s = R_s I_s + \frac{d\Phi_s}{dt} \quad (1)$$

$$0 = R_r I_r + \frac{d\Phi_r}{dt} - j\omega \Phi_r \quad (2)$$

- Equations des flux statoriques et rotoriques:

$$\Phi_s = L_s I_s + M I_r \quad (3)$$

$$\Phi_r = L_r I_r + M I_s \quad (4)$$

- Equation mécanique de la machine :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_e - f\Omega - C_r \quad (5)$$

III. PRINCIPE DE LA COMMANDE DTC

Depuis que M. Depenbrock et I. Takahashi ont proposé la commande DTC de la machine à induction 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 [1].

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

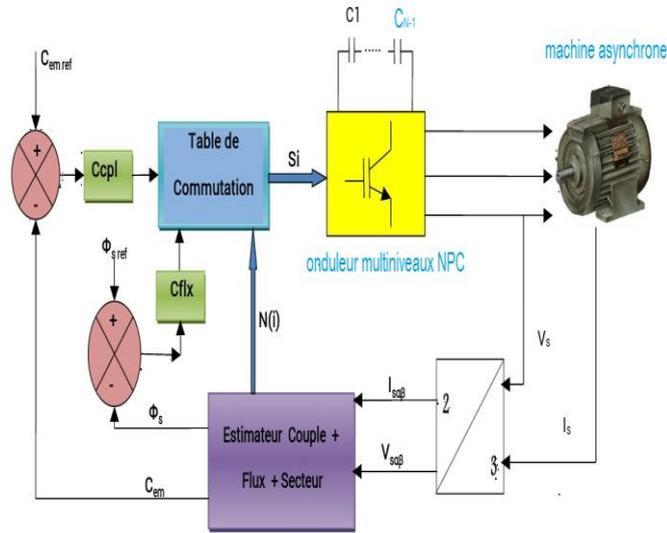


Fig.1 Structure de base de la commande directe du couple.

Le flux statorique et le couple électromagnétique sont calculés à partir des équations suivantes [5, 6] :

$$\Phi_s = \sqrt{\Phi_{\alpha s}^2 + \Phi_{\beta s}^2} \quad (6)$$

Avec:

$$\Phi_{\alpha s} = \int_0^t (v_{\alpha s} - R_s i_{\alpha s}) dt \quad (7)$$

$$\Phi_{\beta s} = \int_0^t (v_{\beta s} - R_s i_{\beta s}) dt \quad (8)$$

L'angle θ_s et C_{em} est calculé à partir de:

$$\theta_s = \arctg\left(\frac{\Phi_{\beta s}}{\Phi_{\alpha s}}\right) \quad (9)$$

$$c_{em} = \frac{3}{2} P [\Phi_{\alpha s} i_{\beta s} - \Phi_{\beta s} i_{\alpha s}] \quad (10)$$

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.

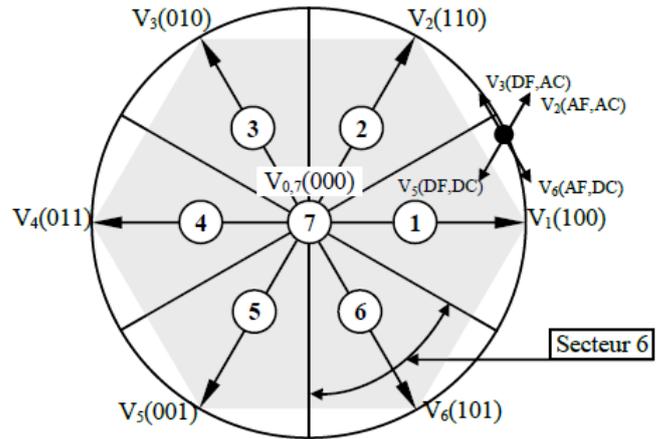


Fig.2 Différents vecteurs tensions statoriques délivrés par un onduleur de tension à deux niveaux.

AF: Augmenter le Flux
DF: Diminuer le Flux.
AC: Augmenter le Couple
DC: Diminuer le Couple.

IV. ÉLABORATION DU TABLEAU DE COMMUTATION SANS VECTEURS NULS

Dans ce cas on n'exploite que les séquences actives, cette stratégie à l'avantage de la simplicité et permet d'éviter les diminutions indésirables du flux à basse vitesse [7].

TABLEAU I
STRATÉGIE DE CONTRÔLE À COMPARATEUR HYSTÉRÉSIS À TROIS NIVEAUX DU COUPLE AVEC LES VECTEURS TENSIONS NULS

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

Avec:

$\begin{cases} Ccpl = 1 & \text{augmenter le couple} \\ Ccpl = 0 & \text{Réduire le couple} \\ Ccpl = -1 & \text{maintenir le couple} \end{cases}$

$\begin{cases} Cflx = 0 & \text{réduire le flux} \\ Cflx = 1 & \text{augmenté le flux} \end{cases}$

$$\begin{aligned}
 V_0 &= [0 \ 0 \ 0] & V_1 &= [1 \ 0 \ 0] & V_2 &= [1 \ 1 \ 0] & V_3 &= [0 \ 1 \ 0] \\
 V_4 &= [0 \ 1 \ 1] & V_5 &= [0 \ 0 \ 1] & & & & \\
 V_6 &= [1 \ 0 \ 1] & V_7 &= [1 \ 1 \ 1] & & & &
 \end{aligned}$$

Dans cette partie de notre travail, nous améliorons les performances dynamiques de l'entraînement avec de règle qui sont toujours déterminée qualitativement du diagramme vectoriel du flux élaboré précédemment. Pour cela, le nombre de secteurs doit être suffisamment grand pour avoir une décision adéquate. D'un autre part. Ainsi, tout en essayant d'avoir le maximum de contrôle, nous développerons un nombre minimum de règles en utilisant douze secteurs réguliers notés N1 jusqu'à N12 représentés par la Fig. 3

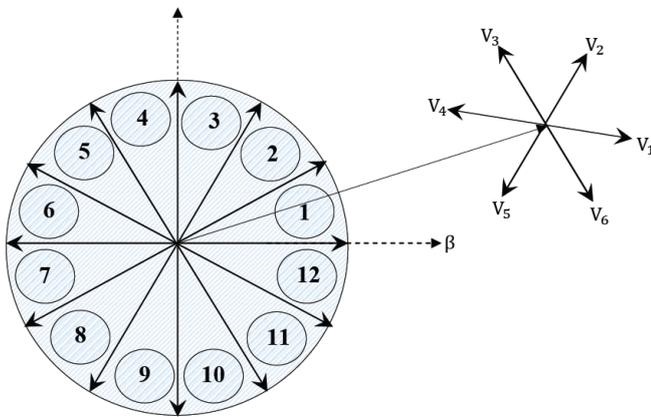


Fig.3 Représentation des 12 divisions du plan complexe.

Le tableau de commande est construite en fonction de l'état des variables Cflx et Ccpl, et de la zone de position de N, elle se présente donc sous la forme suivante:

TABLEAU II
STRATÉGIE DE DTC AVEC VECTEURS NULS À 12 SECTEURS

N		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
c f l x	c												
	c												
	p												
1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	1	1
	0	7	7	0	0	7	7	0	0	7	7	0	0
	-1	6	6	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5
0	1	3	3	4	4	5	5	6	6	1	1	2	2
	0	0	0	7	7	0	0	7	7	0	0	7	7
	-1	5	5	6	6	1	1	2	2	3	3	4	4

V. COMMANDE DTC NEURONALE

Le développement des réseaux de neurones est relativement récent. L'origine des réseaux de neurones vient de l'essai de modélisation du neurone biologique par Warren Mac Culloch et Walter Pitts. Mais il faut attendre les années 80 pour voir émerger véritablement les réseaux de neurones dans le domaine du traitement de l'information, et ceci grâce à la mise au point d'un algorithme d'apprentissage pour les

réseaux de neurones à plusieurs couches (utilisant le calcul du gradient par rétropropagation) [4].

Les réseaux de neurones forment une famille de fonctions non linéaires, permettant de construire, par apprentissage, une très large classe de modèles et de contrôleurs. Un réseau de neurone est un système d'opérateurs non linéaires interconnectés, recevant des signaux de l'extérieur par ses entrées, et délivrant des signaux de sortie, qui sont en fait les activités de certains neurones [2].

Les réseaux de neurones artificiels sont des réseaux fortement connectés de processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit.

A. Principe de Contrôleur Neuronale

Le rôle d'une loi de contrôle est de maintenir certains états d'un système à des valeurs désirées malgré les effets d'éventuelles perturbations. Des principes de contrôle très simples, parfois même mécaniques, sont employés depuis des années. Certains concepts sont toujours encore utilisés de nos jours, mais les lois de la commande modernes reposent sur des variables formalismes et sur une théorie de contrôle.

Aujourd'hui, on veut contrôler des systèmes complexes. Il s'agit également de les rendre plus intelligents, c'est-à-dire plus automatisés, plus autonomes, plus performants, plus rapides, tout en réduisant au maximum l'énergie. Ces exigences complexifient largement les systèmes et leurs modèles [2].

B. Commande Neuronale Directe du Couple (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 liés au contrôle de ces systèmes [4]. Dans notre Article sur la DTC-RNA, il est facile d'utiliser cette technique dont on va garder le même travail qu'au DTC classique mais nous changeons que le bloc qui donnera les impulsions aux interrupteurs d'onduleur par un contrôleur à base de réseaux de neurones comme est illustré sur la fig.4.

Pour réaliser un réseau de neurone il faut faire trois études principales [4]:

- Choix des variables d'entrées des RNA

La première variable d'entrée est la position du flux dans le référentiel lié au stator. La deuxième variable d'entrée, nous avons utilisée la variable d'état d'erreur du flux. La troisième variable d'entrée, nous avons utilisée la variable d'état d'erreur du couple.

- Choix des variables de sortie des RNA

La sortie est représentée par les impulsions des interrupteurs d'onduleur qui représentent des valeurs zéro ou un.

- Construction de la base d'apprentissage

La base d'apprentissage du RNA est mise sous forme de fichier ou du tableau matrice). Le réseau de neurones que nous avons utilisé est un réseau multicouche à connexion local qui utilise l'algorithme de rétro-propagation pour leurs apprentissages.

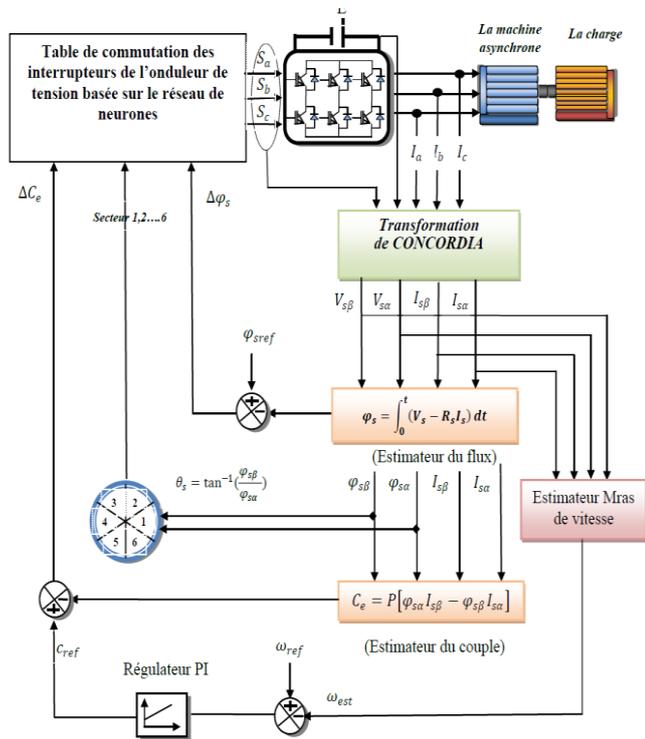


Fig.4 Commande directe du couple de la MAS basée sur les RNA.

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 Biases de ce réseau est réalisés par un algorithme de retropropagation nommé l'algorithme de Levenberg-Marquardt (LM).

La convergence du réseau à été obtenue en utilisant les valeurs des paramètres regroupées dans le tableau 3.

TABLEAU III
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

Sur la Fig.5 nous illustrons le contrôleur à base de réseau de neurones (on prend l'exemple de la DTC-RNA proposé à 12 secteurs):

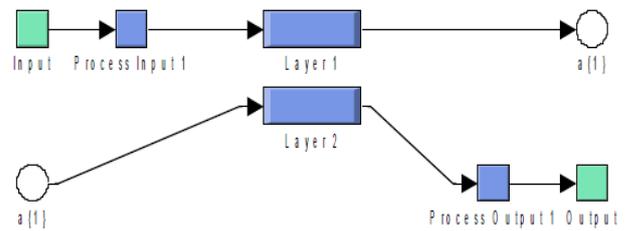


Fig.5 Structure de réseaux de neurones pour DTC neuronale

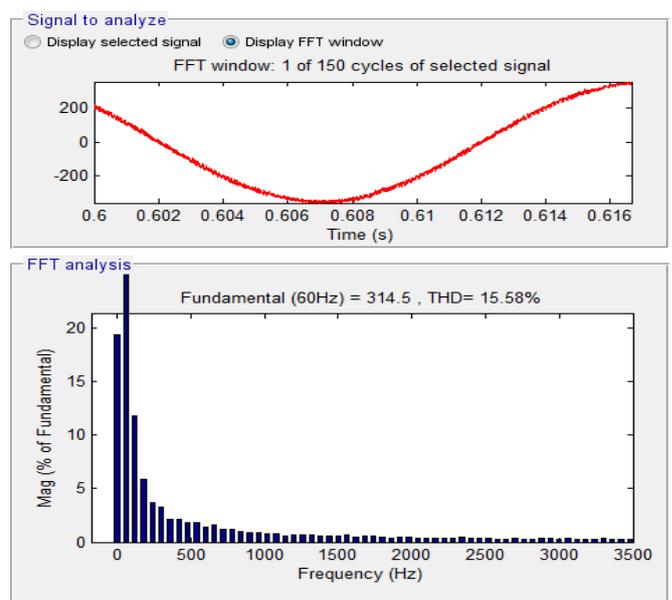
Pour illustrer le fonctionnement de la commande et réaliser les études prospective, un modèle de simulation développée dans l'environnement fourni par Matlab/Simulink, une application développée dans l'environnement fourni par Matlab /Simulink.

Nous avons utilisés dans la commande les paramètres de contrôle suivante: C_r =echelon variable de 6500 à -6500N.m à l'instant $t=0.8s$, $\Delta C_e =0.05N.m$, $\Delta \phi_s =0.001wb$, la vitesse référence $w_{ref}=1000tr/min$, une période d'échantonnage $T_e =50\mu s$, $\phi_{sref}=3.6wb$.

Parametre de moteur asynchrone de forte puissance sont: puissance nominale $P_n = 1MW$, Résistance statorique $R_s = 0.228\Omega$, résistance rotorique $R_r = 0.332\Omega$, inductance statorique $L_s = 0.0084H$, inductance rotorique $L_r = 0.0082H$, inductance mutuelle $L_m = 0.0078H$, number de paire de pole $p = 3$, moment d'inertie $J = 20kg.m^2$, coefficient de frottement $K_f = 0.008Nm.s.rad^{-1}$.

VI. RÉSULTATS DE SIMULATION

Les résultats de simulation pour deux stratégie de DTC avec et sans RNA de la MAS alimentée par onduleur de tension à deux niveaux sont illustrés dans les Figures 6, 7, 8, et 9.



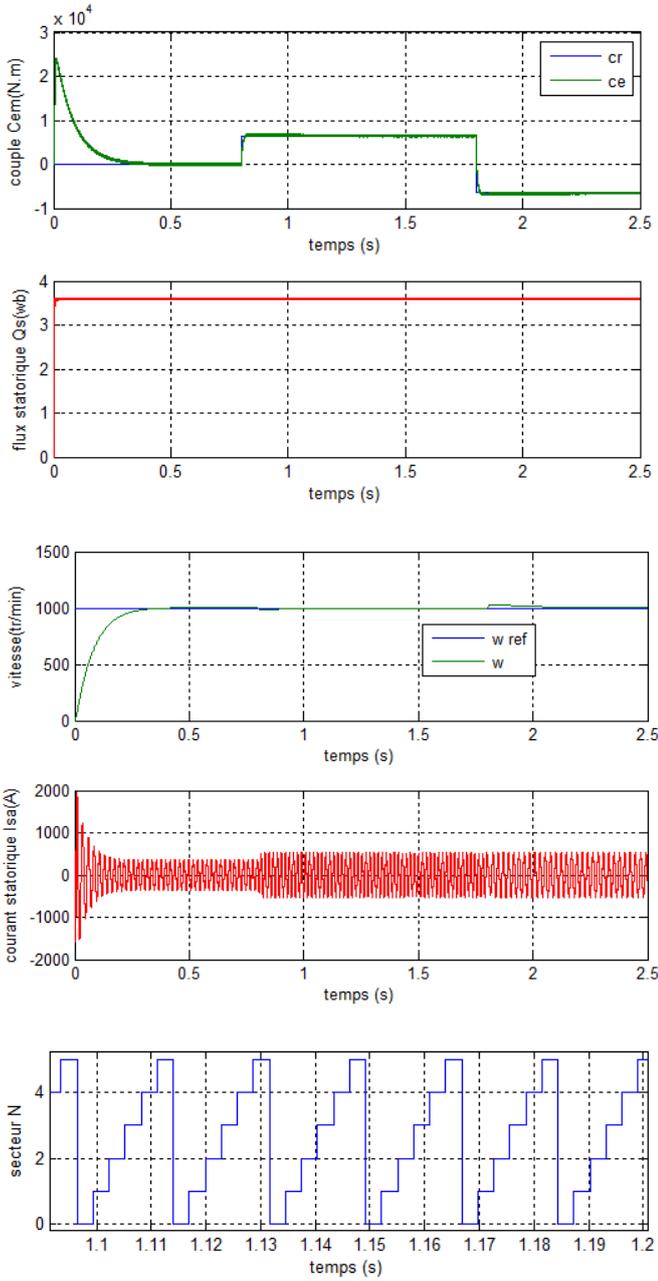


Fig. 6 Performances de stratégie classique de la commande DTC à 2 niveaux appliquée à la MAS.

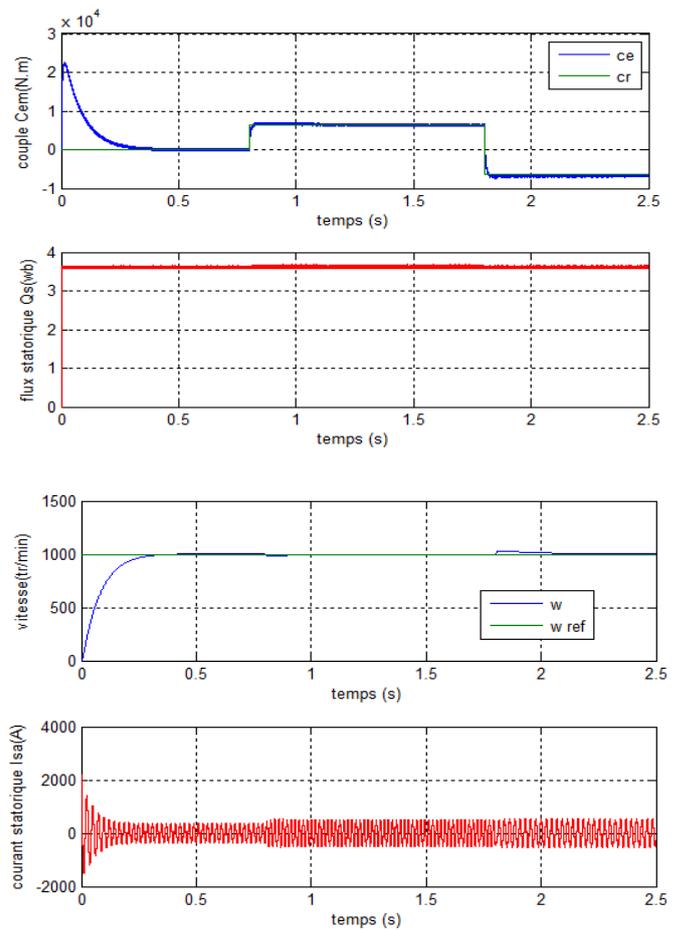
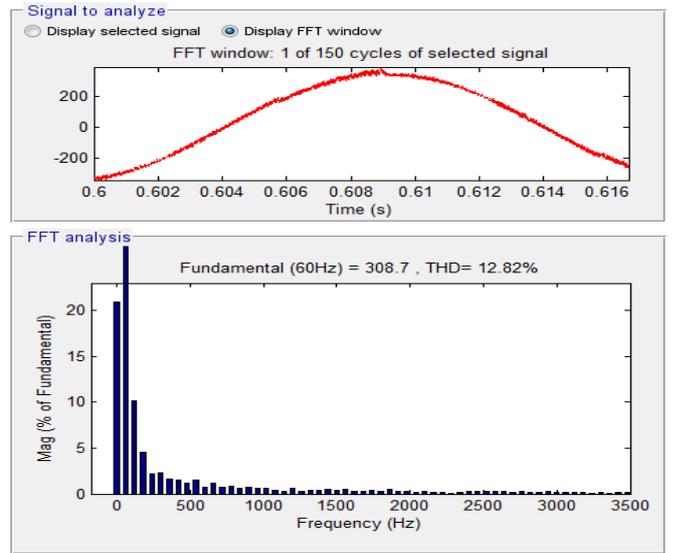
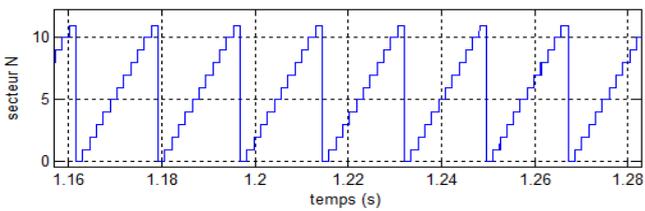


Fig. 7 Performances de stratégie proposé de la commande DTC à 2 niveaux appliquée à la MAS..

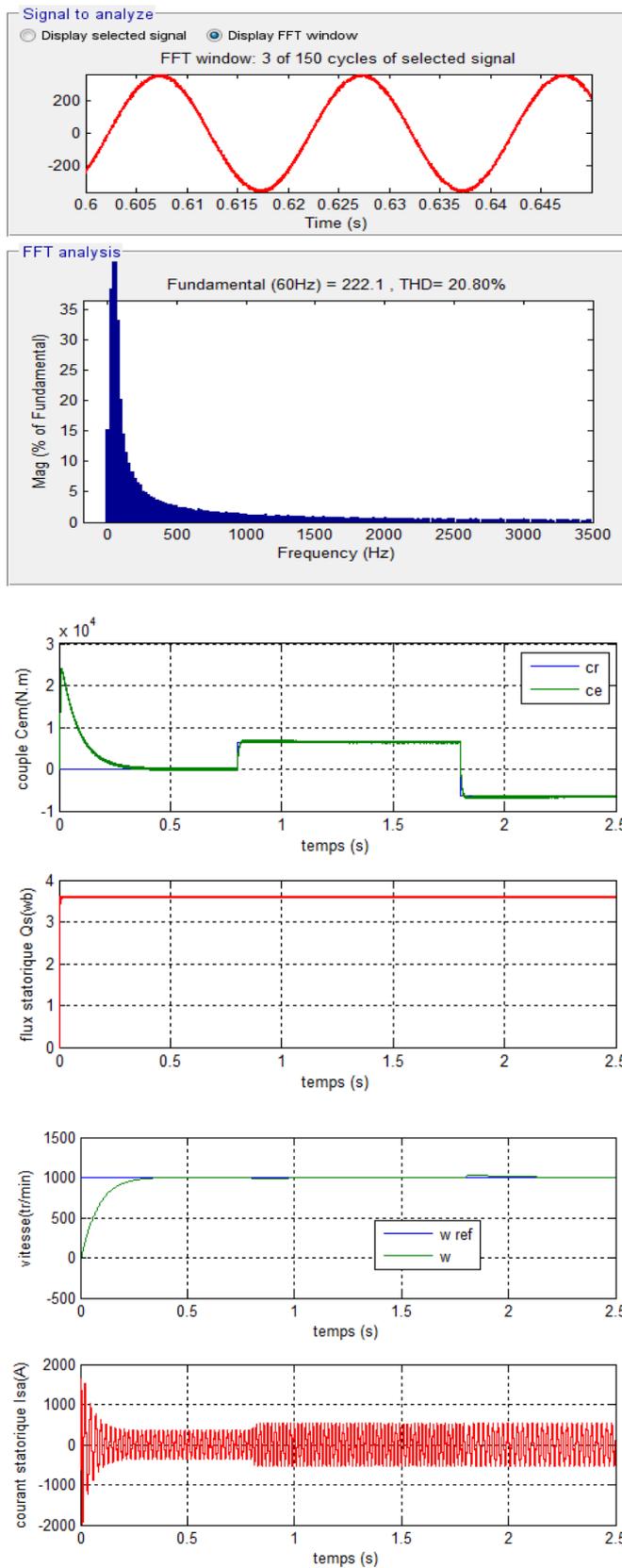


Fig. 8 Performances de stratégie classique de la commande DTC-RNA à 2 niveaux appliquée à la MAS.

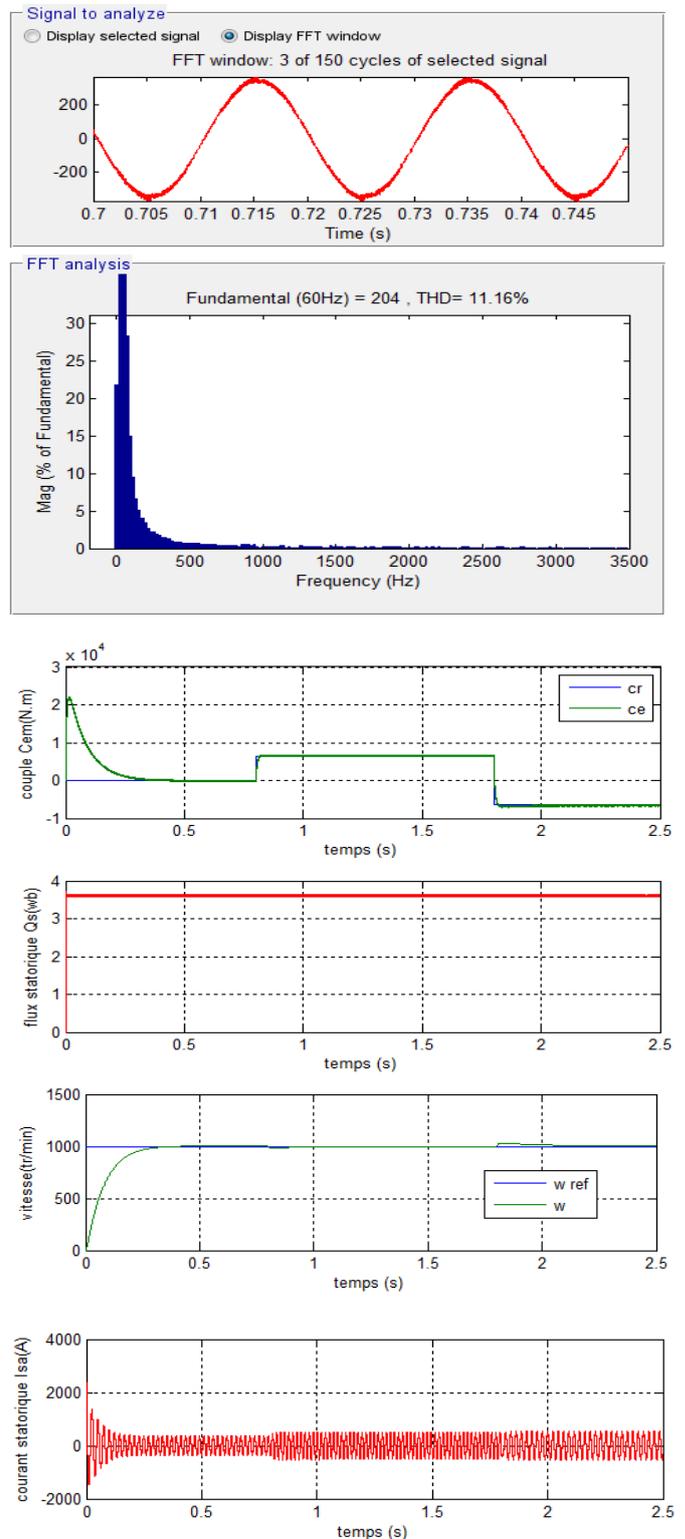


Fig. 9 Performances de stratégie proposé de la commande DTC-RNA à 2 niveaux appliquée à la MAS..

Dans le but de connaître la meilleure commande de la MAS, une étude comparative est indispensable entre les deux commandes traitées précédemment (DTC-RNA-2N classique

et DTC-RNA-2N avec vecteurs nuls à 12 secteurs). La figure suivante présenté la comparaison entre deux commande.

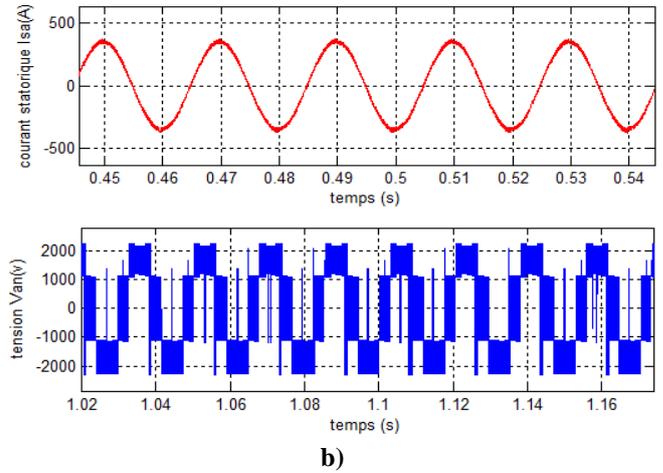
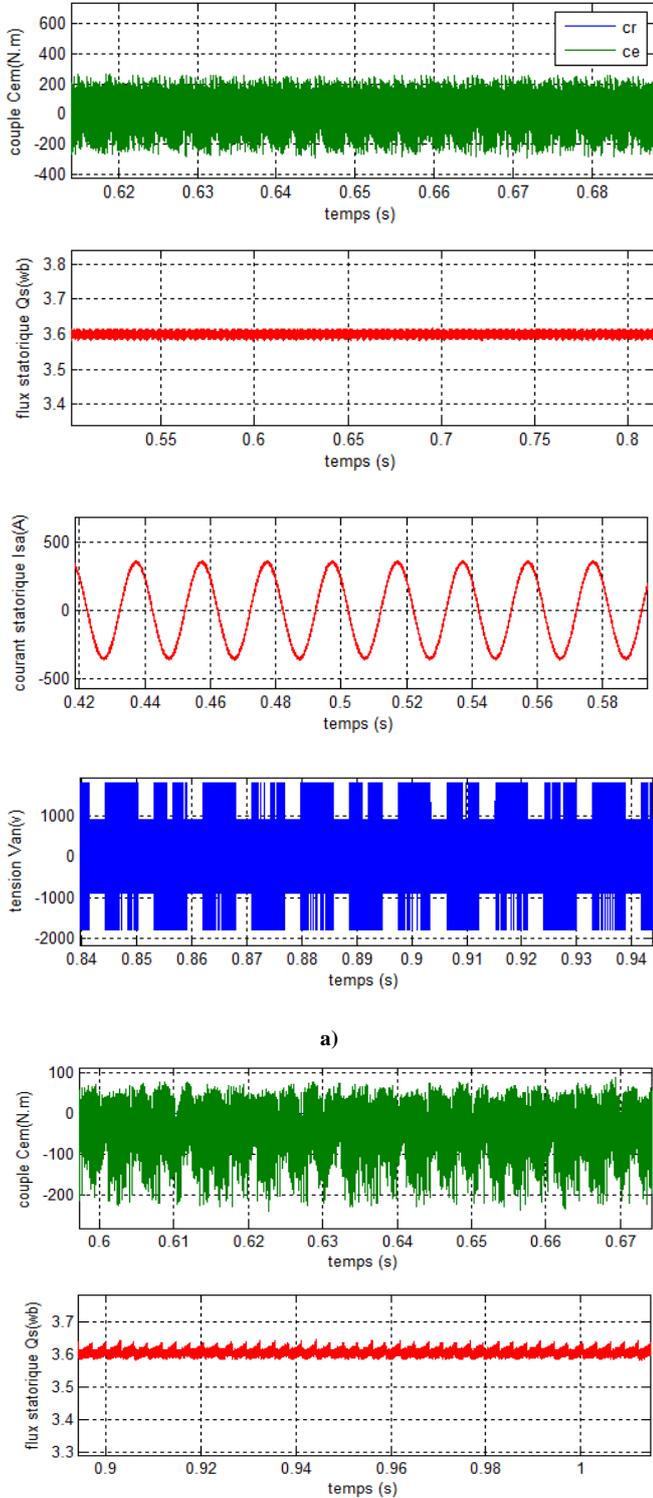


Fig .10 Zooms obtenues par la commande DTC à deux niveaux avec vecteur nuls de la MAS: a) DTC classique neuronale, b) DTC proposé neuronale.

Le tableau suivant présenté le résumé de comparaison entre les deux types de commande avec et sans RNA.

TABLEAU IV
ETUDE COMPARATIVE

	I_{sa} THD (%)	Minimisations des ondulations du couple	Minimisations des ondulations du flux
DTC-2 NIVEAUX	15.58	Assez bonne	Assez bonne
DTC-2 NIVEAUX A 12 SECTEURS	12.82	bonne	bonne
DTC-RNA-2 NIVEAUX	20.80	bonne	bonne
DTC-RNA-2 NIVEAUX A 12 SECTEURS	11.16	Trés bonne	Trés bonne

Le Tableau 4 montré que la commande DTC-2 niveaux à 12 secteurs avec et sans RNA réduit considérablement les ondulations du couple électromagnétique, du flux statorique et la valeur de THD du courant statorique comparativement à celle de la commande DTC-2 niveaux classique.

La dynamique des composantes du flux statorique n'est pas affectée par l'application de ces consignes de charges.

VII. CONCLUSIONS

Les réseaux de neurones sont des techniques puissantes de traitement non linéaire des données, qui ont fait leurs preuves dans des nombreux domaines. Ces outils permettent de calculer des fonctions complexes, adaptables à un ensemble d'exemples par le biais d'algorithmes d'optimisation utilisant différentes techniques d'apprentissage.

Dans la première partie de cet article nous avons présenté quelques éléments essentiels qui permettent de comprendre la commande DTC, et proposé un nouveau tableau de

commutation pour augmentation les performance de la MAS. Un deuxième partie appliqué les réseaux de neurones a la commande DTC classique et proposé. Les résultats de simulation obtenus montrent que cette technique de commande permet d'obtenir un découplage parfait entre le flux statorique et le couple électromagnétique avec une dynamique de poursuite rapide. D'un autre coté la commande DTC proposé est plus performante que commande DTC classique.

Donc la commande DTC-RNA permet de donner une valeur ajouté au système d'entraînement de point de vue réduction des ondulations du couple électromagnétique et du flux statorique.

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* 2011, 6, pp:23-32
- [2] B. Sebti, "Commande par DTC d'un Moteur Asynchrone apport des Réseaux de Neurones," Mémoire de Magister, université de Batna, 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. Omer 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] S. Meziane, R. Toufouti, H. Benalla, "Etude Comparative entre la DTC deux niveaux et la DTC Trois Niveaux de la Machine Asynchrone," *communication Science et technologie*, N 7, janvier 2009.
- [6] H. Yantour, J. Saadi, A. Khoumri, "Modilisation et Simulation d'une Commande Directe du Couple Appliquée à la Machine Asynchrone (DTC), " *6^{me} conférence Francophone de modélisation et simulation-MOSIM'06*, Rabat, Maroc, du 3 au 5 avril 2006.
- [7] Z. Boubakar, "Commande d'une Machine Synchrone à aimants Permanents sans Capteur de Vitesse utilisation d'un Observateur Nou Lineaire," Mémoire de Magister, université de Batna, 2008.