

Régulateurs PI-flou et hystérésis neuronale pour la Commande DTC cinq niveaux à 12 secteurs d'un moteur asynchrone

Habib BENBOUHENNI¹, Rachid TALEB², Zinelaabidine BOUDJEMA²

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

BP1523 El M'nouer, Oran, Algeria

habib0264@gmail.com

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

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

Résumé— Cet article présenté une commande DTC cinq niveaux à 12 secteurs basés sur les régulateurs à hysteresis neuronale et contrôleur PI-flou de la vitesse d'un moteur asynchrone de forte puissance (1MW). Cette commande est robuste et simple d'implémentation et basés sur une alimentation par modulation de largeur d'impulsions, et sur un découplage du flux et du couple moteur. En utilisant Matlab/Simulink, les résultats de simulations montrent les performances de la commande DTC proposé.

Mots Cles— Machine asynchrone, DTC, Onduleur à cinq niveaux, THD, Régulateurs à hystérésis neuronale, PI-flou.

I. INTRODUCTION

Les améliorations principales des processus industriels modernes au cours des cinq dernières décennies proviennent en grande partie des avancées réalisées dans les commandes à vitesse variable des entraînements électriques.

En effet, les principaux types de moteurs électriques utilisés pour ces entraînements sont: les moteurs à courant continu et les moteurs à courant alternatifs synchrones et asynchrones [1].

Grâce à son faible coût et sa simplicité de construction, conjugués aux techniques de variation de vitesse, la machine asynchrone s'impose de plus en plus dans les domaines De l'entraînement à vitesse variable [2].

Depuis longtemps, la commande des machines électriques a fait l'objet de plusieurs travaux de recherches afin d'améliorer leurs performances. Des commandes différentes ont été développées, décalées dans le temps par des années à cause du développement permanent des composants électroniques utilisés dans la réalisation des blocs de commande et d'alimentation [3].

Dans ce qui suit, on va présenter brièvement quelques types de commandes couramment utilisées pour commander le MAS. On s'intéresse spécialement à la commande directe du couple et du flux, qui est le noyau de cet article.

Le contrôle direct du couple (DTC) proposé par Depenbrock et Takahashi, est une solution pour les problèmes du contrôle vectoriel. En effet, dans cette dernière les grandeurs de commande que sont le flux statorique et le

couple électromagnétique, sont calculées à partir des seules grandeurs liées au stator et ceci sans l'intervention du capteur mécanique [4].

La DTC est une commande exploitant la possibilité d'imposer un couple et un flux aux machines à courant alternatif d'une manière découplée, une fois alimentée par un onduleur de tension sans regulation de courant faite par une boucle de retour, en atteignant l'exécution semblable a celui obtenue a partir d'une commande vectorielle [5].

La commande DTC présente des performances dynamiques remarquables de même qu'une bonne robustesse vis-à-vis des variations des paramètres de la machine. Cependant, elle présente des limitations (Ondulations du couple, ondulations du flux, non maîtrise de la fréquence de commutation,...). L'émergence de cette méthode a donné lieu à divers travaux dont l'objectif est de montrer ses performances, ou d'apporter des solutions à ses limitations.

Le travail réalisé dans le cadre de cet article proposé des améliorations de performances de la commande DTC des machines asynchrones alimentées par onduleur NPC de tension à cinq niveaux. Notre objectif est de développer des algorithmes de commande permettant d'apporter des solutions aux problèmes majeurs de cet technique de commande.

II. PRINCIPE DE LA COMMANDE DTC

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 [6].

La commande DTC d'un moteur asynchrone est basée sur la détermination directe de la séquence de commandes appliquées aux interrupteurs d'un onduleur NPC de tension à cinq niveaux. 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.

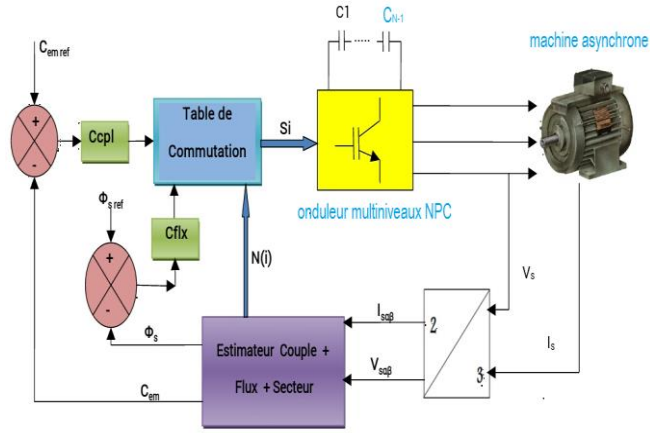


Fig. 1 Structure de base de la commande directe du couple

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

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

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

Le module du flux statorique s'écrit:

$$\Phi_s = \sqrt{\Phi_{\alpha s}^2 + \Phi_{\beta s}^2} \quad (3)$$

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

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

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

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

Selon la formule (1), on peut négliger la chute de tension statorique due à la résistance statorique (cas des vitesses élevées par exemple). Avec cette supposition, la variation du

flux est proportionnelle à la tension statorique appliquée. Une tension appliquée dans la même direction que le vecteur flux fait augmenter le module de celui-ci et vice versa [7].

Un onduleur NPC de tension triphasé à cinq niveaux, est composée de huit interrupteurs commandés qui sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant (il s'agit d'associations classiques d'un transistor et d'une diode en antiparallèle) et de six diodes de maintien connectées tout au long du bus continu.

L'onduleur est alimenté par une source continue E , que quatre condensateurs de valeurs égales se partagent pour donner quatre sources distinctes de tension $E/4$ [8].

La structure triphasée de l'onduleur NPC à cinq niveaux de tensions est présentée sur la Fig.2.

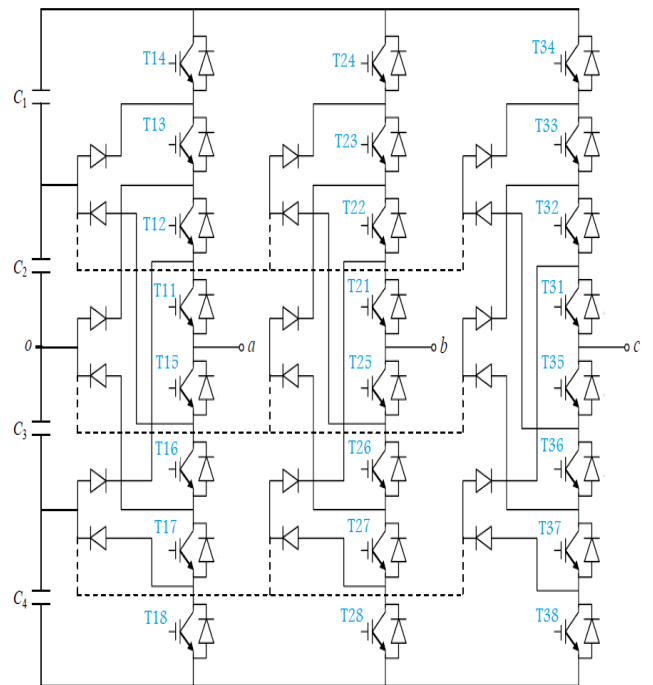


Fig. 2 Schéma d'un onduleur NPC à cinq niveaux

Les tensions simples fournies par l'onduleur sont exprimées par le système matriciel suivant [9]:

$$\begin{bmatrix} va \\ vb \\ vc \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} F_{11}^{b'} + 2F_{11}^b \\ F_{21}^{b'} + 2F_{22}^b \\ F_{31}^{b'} + 2F_{33}^b \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{10}^{b'} + 2F_{10}^b \\ F_{20}^{b'} + 2F_{20}^b \\ F_{30}^{b'} + 2F_{30}^b \end{bmatrix} \right) \frac{E}{4} \quad (6)$$

Avec F : fonction de connexion du demi-bras, est donnée comme suit.

$$\begin{cases} F_{K1}^b = F_{K1} F_{K2} \\ F_{K0}^b = F_{K3} F_{K4} \end{cases}$$

On désigne par:

- { 1: le demi - bras du haut
- { 0: le demi - bras du bas

Dans la Fig.3, on distingue 60 positions discrètes, distribuées sur quatre hexagones, en plus d'une position au centre de l'hexagone. Certaines positions sont créées par plusieurs états redondants. De l'hexagone externe vers l'hexagone interne, les positions du vecteur v_s sont créées respectivement par un, deux, trois ou quatre états redondants. La position du centre de l'hexagone, qui correspond à une tension de sortie nulle, est créée par cinq états redondants. On distingue ainsi 24 positions à une seule redondance, 18 positions à deux redondances, 12 positions à trois redondances et 6 positions à quatre redondances. Les 61 positions de vecteur de tension de sortie divise le diagramme vectoriel en six secteurs triangulaires [10].

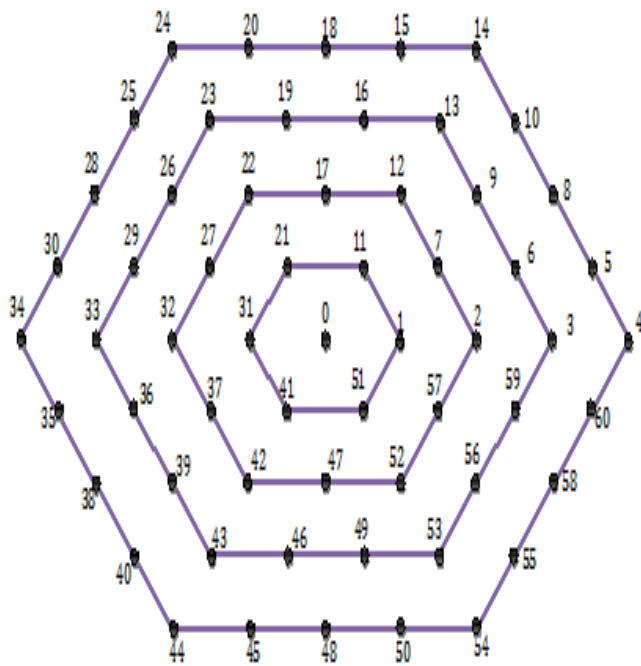


Fig. 3 Représentation vectorielle des tensions de l'onduleur à cinq niveaux.

III. TABLEAUX DE COMMUTATION

Afin de réaliser le contrôle direct du flux statorique et du couple électromagnétique de la machine asynchrone pilotée par un onduleur 5-niveaux de tension à structure NPC, nous devons élaborer une stratégie mettant en œuvre au mieux les possibilités de l'onduleur.

La construction du tableau de commutation (Tableau 1), se base effectivement sur le choix du vecteur de tension statorique appliqué pour permettre d'augmenter ou de

diminuer le module du flux statorique ainsi que la valeur du couple électromagnétique.

TABLEAU 1
TABLE DE VERITE DE L'ONDULEUR A 5 NIVEAUX

secteur	Cflx					
	1			0		
	Ccpl					
	1	0	-1	1	0	-1
1	14	2	54	24	32	44
2	18	7	58	28	37	48
3	24	12	4	34	42	54
4	28	17	8	38	47	58
5	34	22	14	44	52	4
6	38	27	18	48	57	8
7	44	32	24	54	2	14
8	48	37	28	58	7	18
9	54	42	34	4	12	24
10	58	47	38	8	17	28
11	4	52	44	14	22	34
12	8	57	48	18	27	38

IV. COMMANDE DTC BASEE SUR LES RESEAUX DE NEURONES

Les réseaux de neurones formels sont des systèmes de traitement de l'information dont la structure s'inspire de celle du système nerveux. Leurs deux grands domaines d'application sont d'une part la modélisation biologique, dont il ne sera pas question ici, et d'autre part, la réalisation de machines destinées à effectuer des tâches auxquelles les ordinateurs et les outils traditionnels semblent moins bien adaptés que les êtres vivants, telles que des tâches perceptives et motrices.

Ainsi, les applications des réseaux de neurones formels à la reconnaissance de formes et à la classification ont-elles pris une place importante au sein des réalisations industrielles.

Dans le domaine du traitement du signal et de l'automatique, les années 90 ont été marquées par des avancées significatives tant du point de vue de la recherche fondamentale que du point de vue des applications industrielles. Ceci constitue en fait un signe incontestable de la maturation de ces outils [3].

A. Neurone formel

Un neurone formel ou artificiel est un processeur très simple (simulé sur ordinateur ou réalisé sur circuit intégré) imitant grossièrement la structure et le fonctionnement d'un neurone biologique. La première version du neurone formel est celle de *Culloch et Pitts* (1943). C'est un automate binaire qui réalise une somme pondérée de ses entrées, le potentiel, et compare ce potentiel à un seuil (nul) : s'il est supérieur, la sortie vaut +1 et le neurone est actif, s'il est inférieur, la sortie vaut -1 et le neurone est inactif.

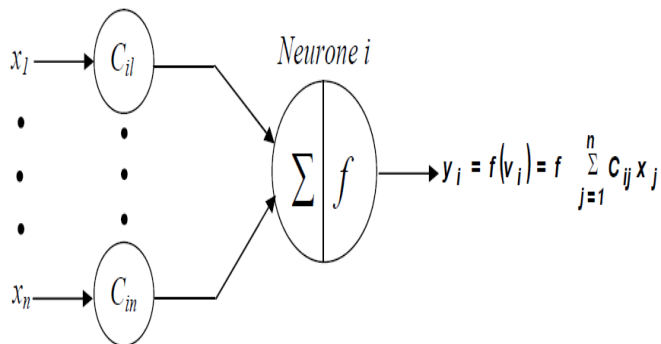


Fig.4 Schéma d'un neurone formel ou artificiel.

Un réseau de neurones artificiel est un système constitué de neurones interconnectés, qui reçoit des informations de l'environnement. On distingue deux familles de réseaux de neurones [3] :

- les réseaux bouclés
- les réseaux non bouclés

V. COMMANDE DTC BASEE SUR LES REGULATEURS A HYSTERESIS NEURONALE

Dans cette application, notre but est de remplacer les régulateurs hystérésis par un réseau neurones (régulateurs hysteresis neuronale) capable de générer de la même façon les signaux de la commande du tableau de commutation. Le synoptique de la commande DTC avec régulateurs hystérésis neuronale est représenté dans la Fig.5

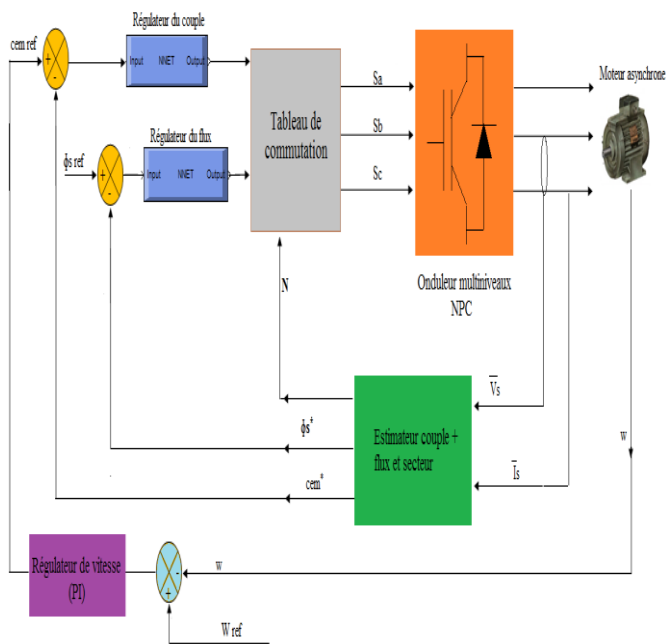


Fig. 5 Structure de base de la commande directe du couple basée sur les régulateurs à hysteresis neuronale

VI. COMMANDE DTC BASEE SUR LE CONTROLEUR PI-FLOU DE LA VITESSE

Pour améliorer les performances de la commande DTC au démarrage ou pendant les phases de changements du flux de référence et du couple de référence, il est possible de procéder à un choix convenable des vecteurs de commutation en utilisant la logique floue.

La structure de la commande DTC avec PI-flou de la machine asynchrone est représentée par la Fig.6. Dont le contrôleur PI classique de vitesse sont remplacé par un contrôleur flou (PI-flou), et dont l'entrée sont l'erreur de vitesse (\$w_{ref} - w\$) et la sortie sont le couple reference (\$C_{em}\$ ref).

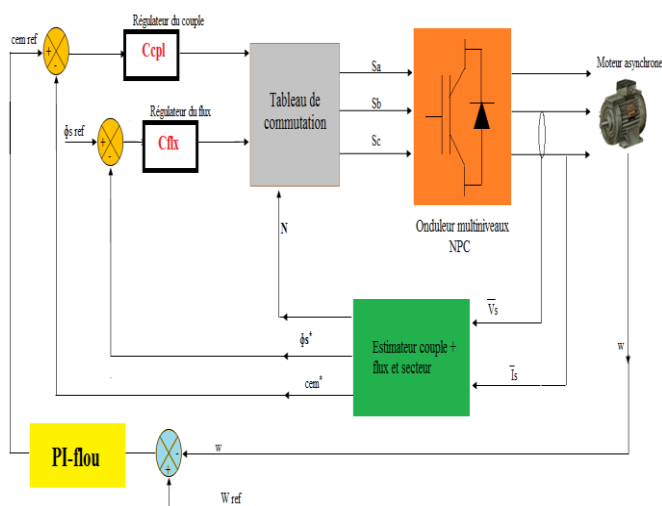


Fig. 6 Structure de base de la commande directe du couple basée sur le contrôleur PI-flou de la vitesse

La boucle pour le réglage de la vitesse mécanique de la machine \$\Omega\$ contient un régulateur flou dont les variables linguistiques sont en entrée ; l'erreur et la variation de l'erreur (\$e\$ et \$\Delta e\$) et en sortie ; la variation de la commande (\$\Delta U\$), \$U\$ représenté la variation de \$T_e\$ pour le régulateur de la vitesse [11].

Ou \$G_e\$, \$G_{\Delta e}\$ et \$G_u\$ sont des gains associé à \$e\$, \$\Delta e\$ et \$u\$ respectivement. En jouant sur ces gains pour assurer la stabilité et établir les performances dynamiques et statiques désirées. L'intervalle d'intérêt de chaque variable linguistique en entrée et en sortie est subdivisé en trois, cinq et sept classes pour obtenir respectivement neuf, vingt-cinq et quarante-neuf règles. Dans ce travail nous avons mené pour les variables d'entrée et la variable de sortie un régulateur flou sept ensembles, dans le but de trouver les bonnes performances souhaitées pour le réglage, représenté ainsi par des fonctions d'appartenance comme le montre la Fig.7.

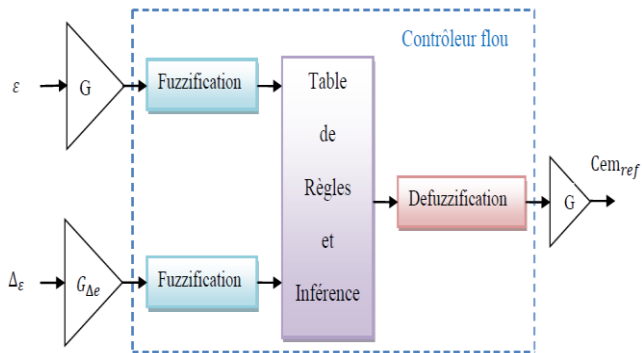


Fig. 7 Schéma bloc de régulation de la vitesse à contrôleur flou.

TABLEAU 2
TABLEAU DES REGLES DE COMMANDES A SEPT CLASSES

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

VII. COMMANDE DTC BASEE SUR LES REGULATEURS A HYSTERESIS NEURONALE ET PI-FLOU DE LA VITESSE

Le synoptique de la commande DTC basée sur les régulateurs à hystérésis neuronale et contrôleur PI-flou est représenté dans la Fig.9

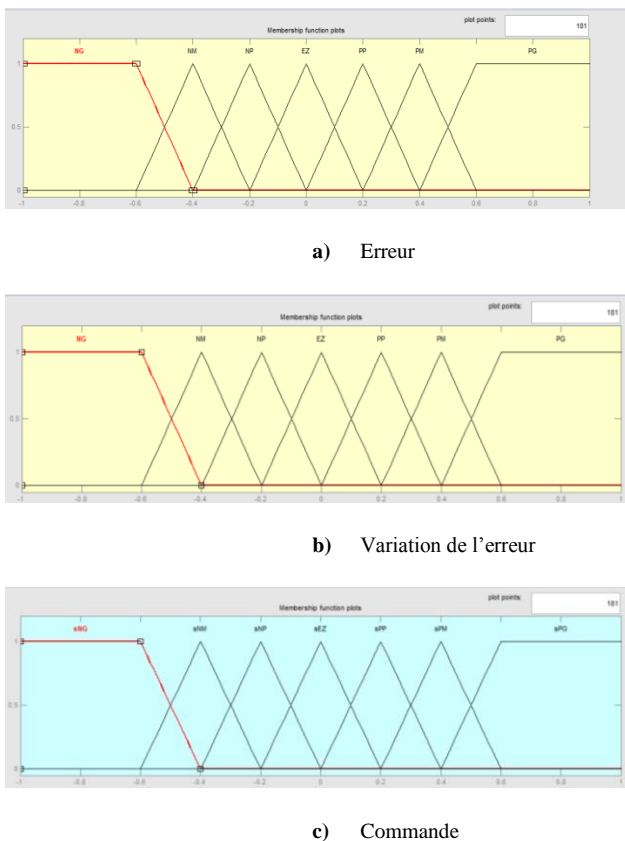


Fig. 8 Fonctions d'appartenance des différentes variables linguistique.

Les règles flous permettent de déterminer le signal de sortie du régulateur en fonction des signaux d'entrés. Elles reliant les signaux de sorties aux signaux d'entrés par des conditions linguistique prenant en compte l'expérience acquise par un opérateur humain. Par exemple, si l'erreur et sa variation sont fortement négatives, alors, le signal de sortie doit être également fortement négatif. Au contraire, si l'erreur et sa variation sont environ zéro, alors, il sera de même pour la commande [11]. Ces considérations nous ont conduits à adapter un tableau qui résumé les règles choisies.

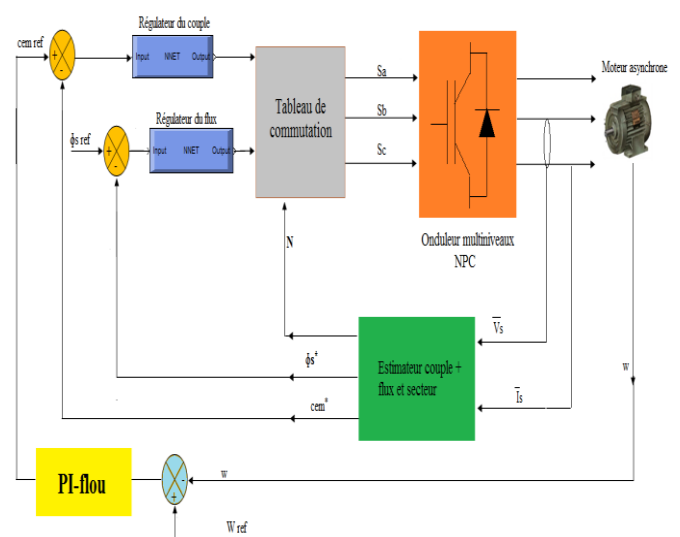
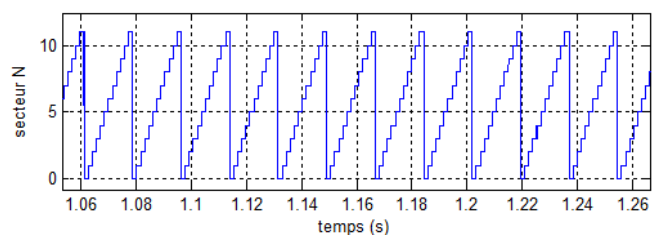


Fig. 9 Structure de base de la commande directe du couple basée sur les régulateurs à hystérésis neuronale et PI-flou de la vitesse

VIII. RESULTAT DE SIMULATION

Les Figures ci-dessous présentent les résultats de simulation sur une durée de 2.5 s pour un flux de référence de 3.6Wb. La largeur de la bande d'hystérésis du comparateur du couple est dans notre cas est fixée à ± 0.05 N.m et celle du comparateur du flux est fixée à ± 0.001 Wb.



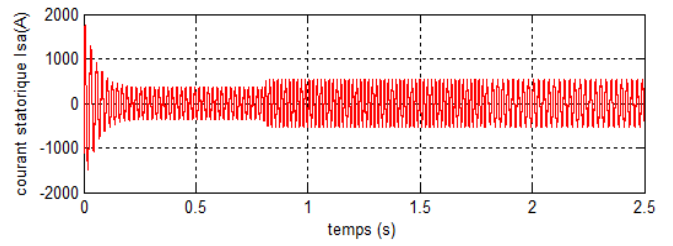
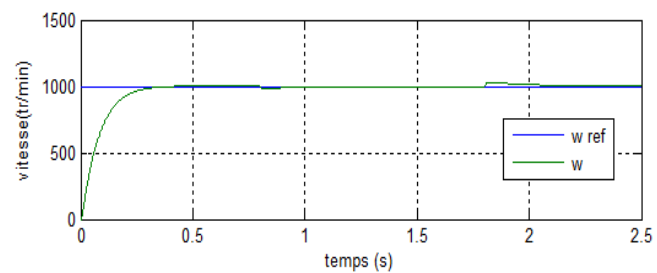
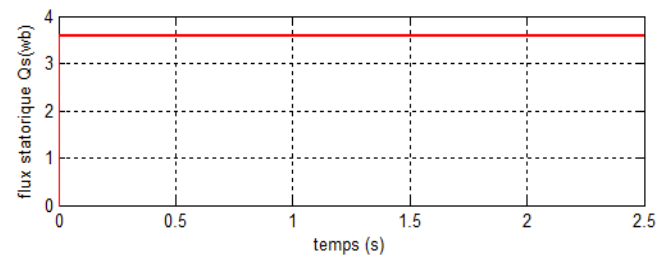
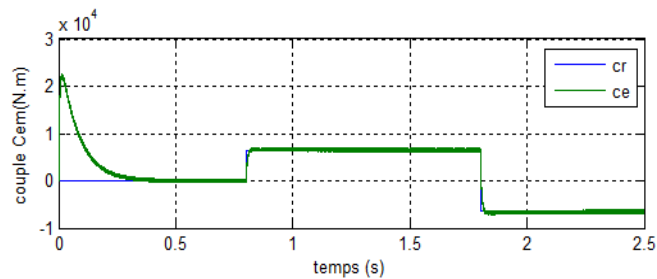
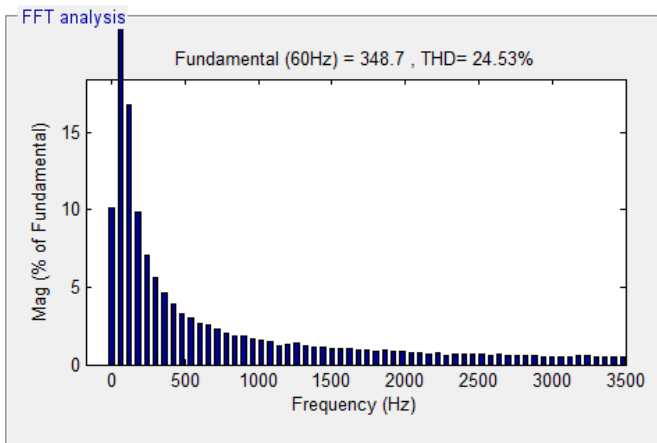
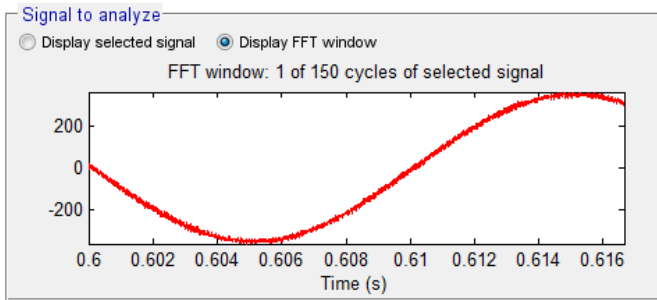
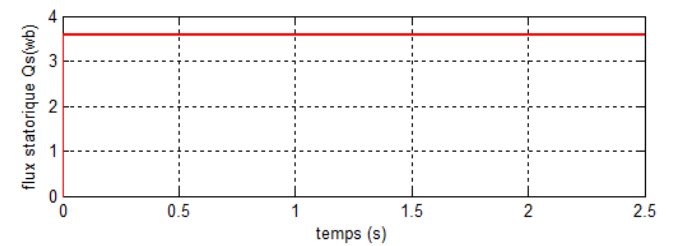
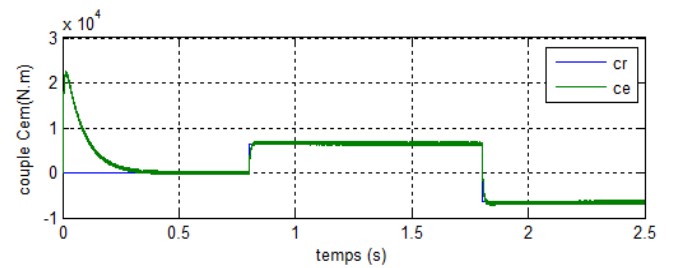
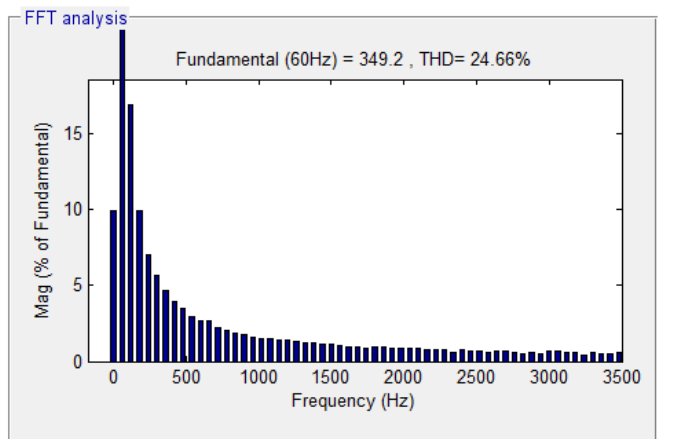
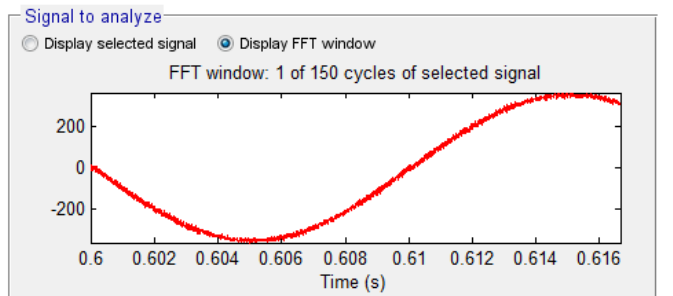


Fig. 10 Performances de la commande DTC à cinq niveaux appliquée à la MAS.



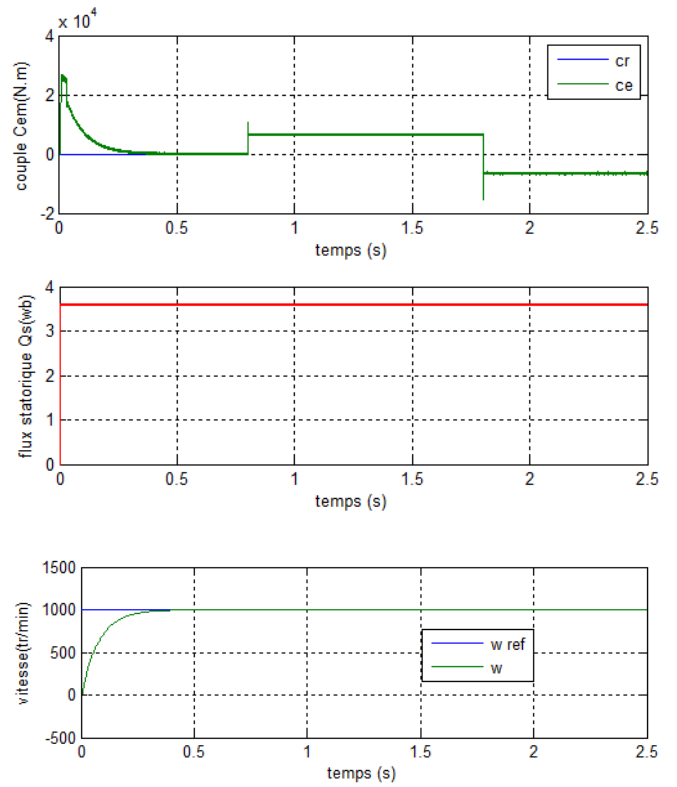
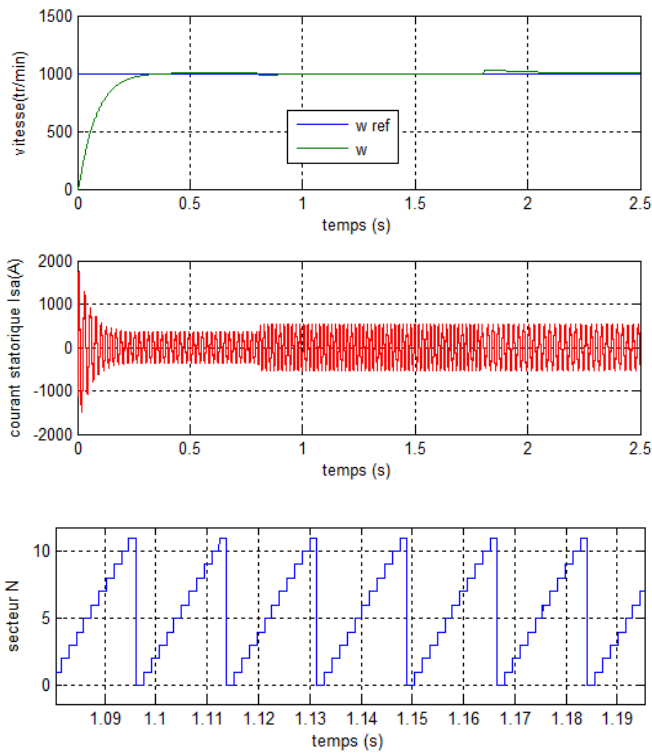


Fig. 11 Performances de la commande DTC à cinq niveaux avec régulateurs hystérésis neuronale appliquée à la MAS.

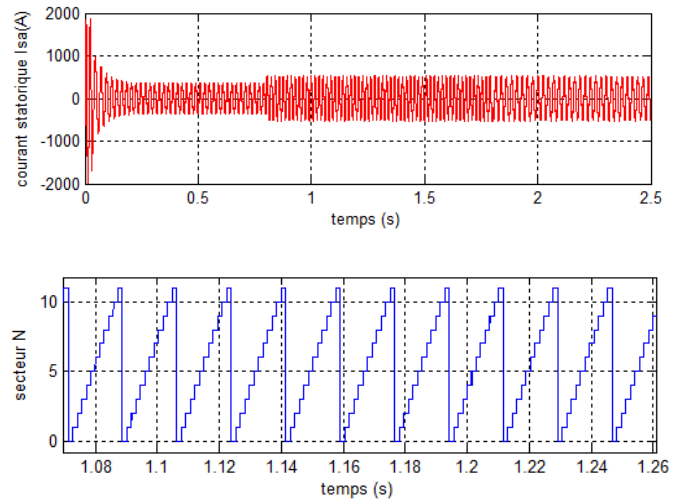
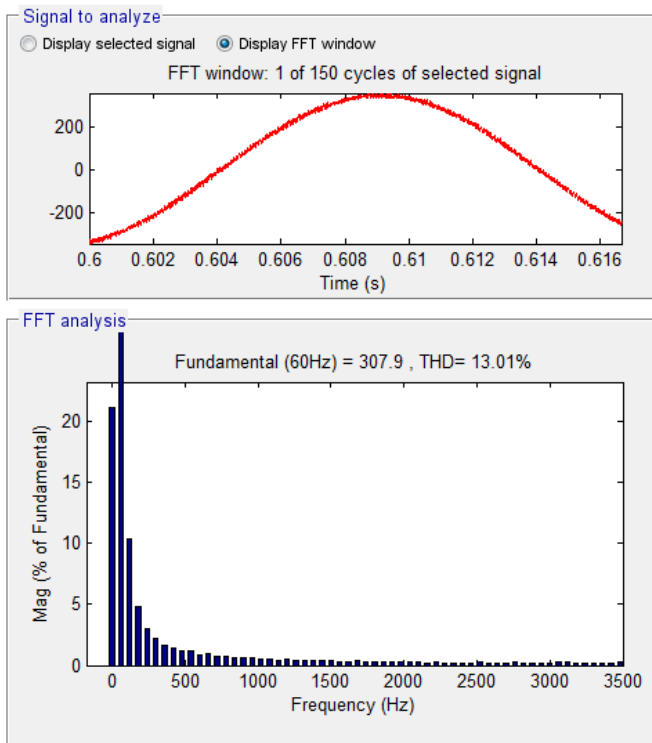
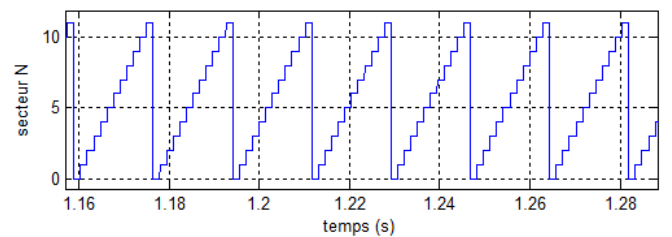


Fig. 12 Performances de la commande DTC à cinq niveaux avec régulateur PI-flou de la vitesse appliquée à la MAS.



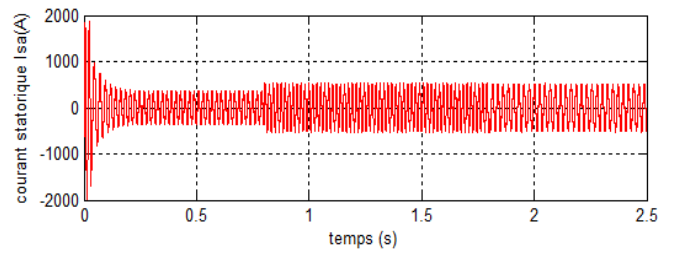
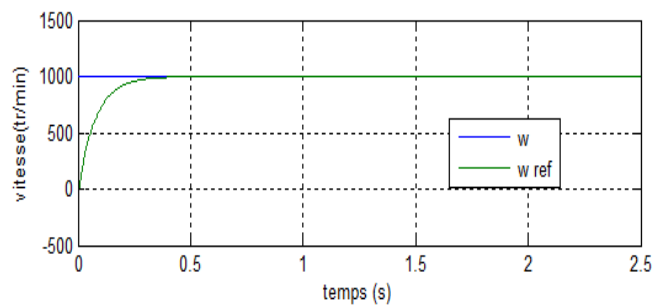
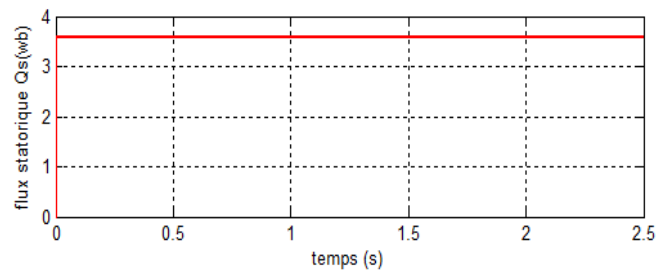
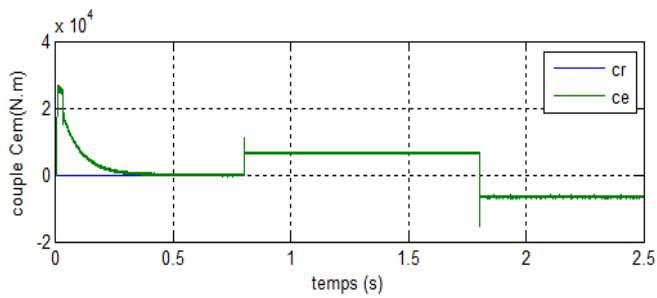
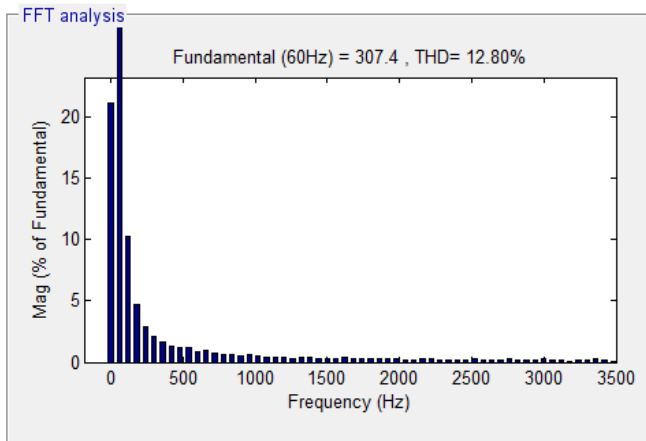
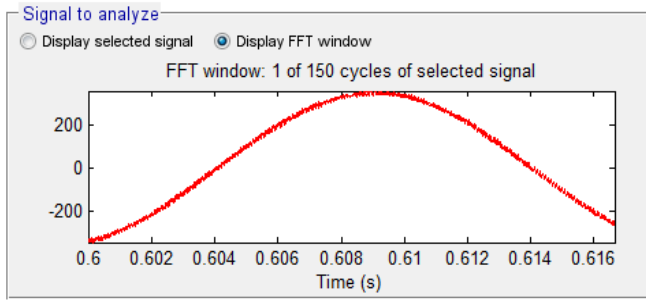
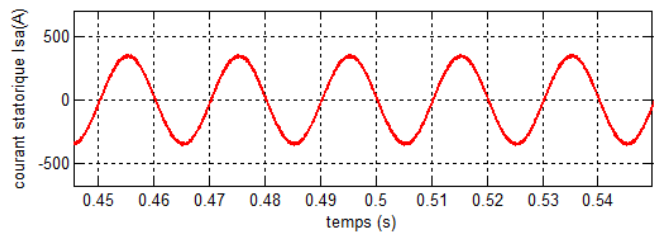
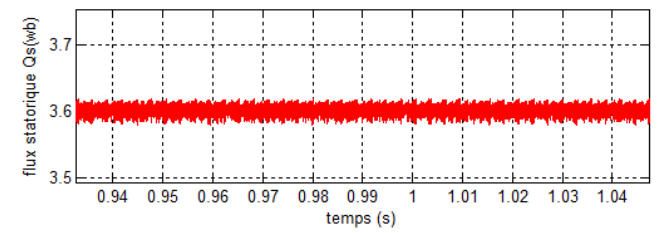
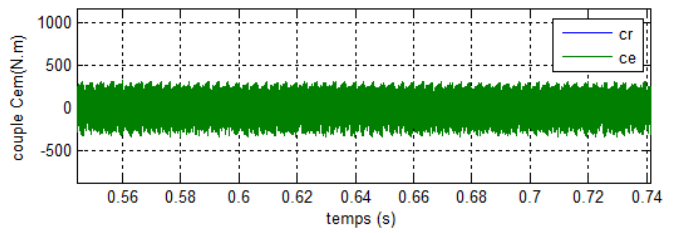
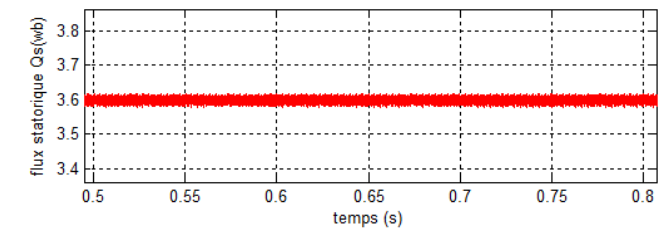
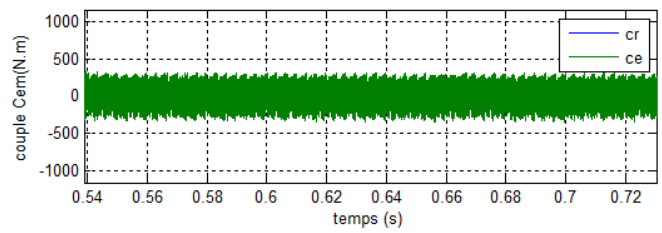


Fig. 13 Performances de la commande DTC à cinq niveaux avec régulateurs hystérésis neuronale et PI-flou de la vitesse appliquée à la MAS.



a)



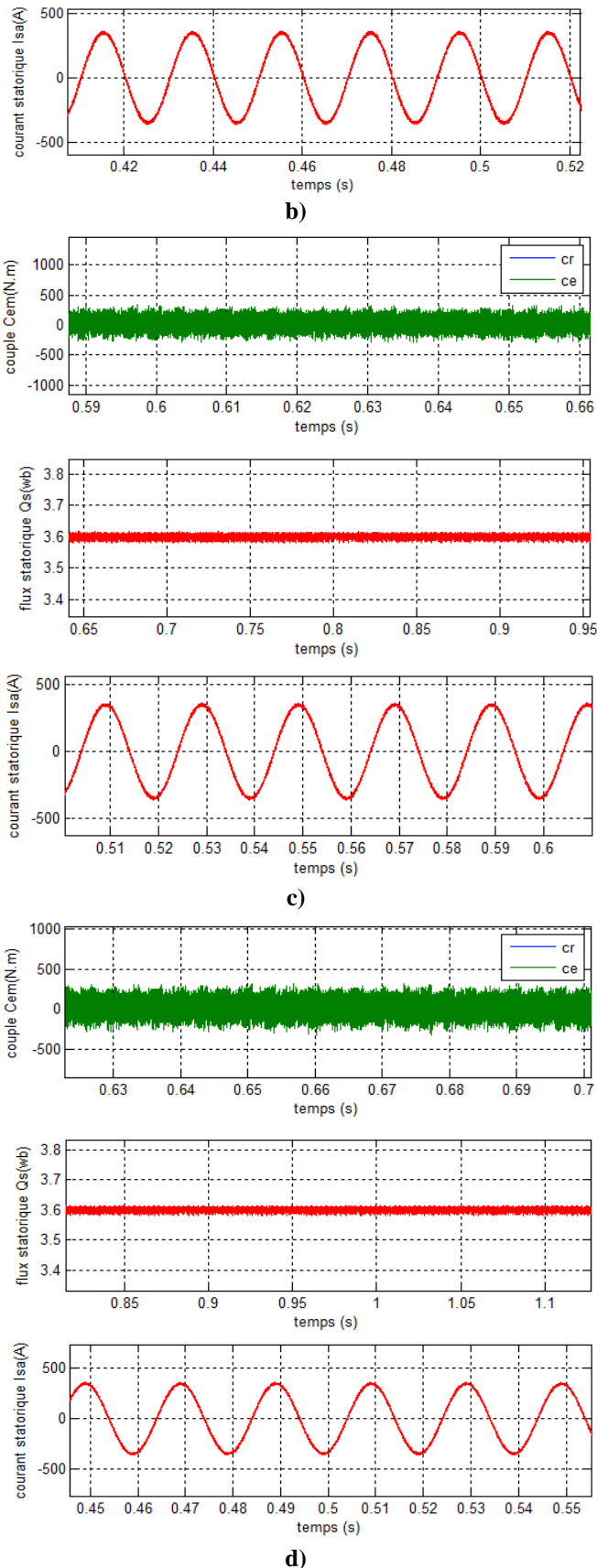


Fig. 9 Zooms obtenues par la commande DTC-RNA à sept niveaux et DTC-RNA à deux niveaux

Dans le tableau 3, nous résumons les résultats de simulation obtenus par DTC-5 niveaux à 12 secteurs avec et sans régulateurs hystérésis neuronale et PI-flou.

TABLEAU 3

ETUDE COMPARATIVE ENTRE DTC-5 NIVEAUX SANS ET AVEC REGULATEURS HYSTERESIS NEURONALE ET PI-FLOU

	I_{sa} THD (%)	Minimisations des ondulations du couple	Minimisations des ondulations du flux
DTC-5 Niveaux	24.53	Assez bonne	Assez bonne
DTC-5 niveaux basée sur les régulateurs à hystérésis neuronale	24.66	Assez bonne	Assez bonne
DTC-5 Niveaux basée sur le PI-flou	13.01	bonne	bonne
DTC-5 Niveaux basés sur les régulateurs à hystérésis neuronale et PI-flou	12.80	bonne	bonne

Les résultats de simulation et le Tableau 3 montrent sans doute, que la commande DTC-5 niveaux à 12 secteurs basés sur les régulateurs à hystérésis neuronale et PI-flou de la vitesse c'est la plus performante au niveau de la minimisation des pulsations du couple et du flux par rapport à d'autre commandes de DTC-5 niveaux. D'un autre coté, on constaté que le module du flux s'établie à sa valeur de référence de 3.6 wb. Et la vitesse atteint sa référence sans dépassement au démarrage à vide.

Le couple électromagnétique agit rapidement pour suivre les consignes de charges introduites. La dynamique des composantes du flux statorique n'est pas affectée par l'application de ces consignes de charges.

D'un autre coté la commande DTC-5 niveaux basée sur le PI-flou réduit considérablement les ondulations du couple et du flux, et la valeur de THD du courant statorique par rapport a la commande DTC-5 niveaux basée sur les régulateurs à hystérésis neuronale.

IX. CONCLUSION

Dans cet article nous avons présenté un stratégie de la commande directe du couple à cinq niveaux (DTC-5N) avec 12 secteurs de la machine asynchrone de forte puissance (1MW) basées sur les régulateurs à hysteresis neuronale et contrôleur PI-flou de la vitesse. L'avantage principal de cette

technique est de permettre le contrôle du flux et du couple de la machine sans avoir besoin à utiliser un capteur mécanique. Les résultats de simulation obtenue pour l'arrangement de DTC-5 niveaux à 12 secteurs basées sur les régulateurs à hysteresis neuronale et PI-flou de la vitesse, illustrent une réduction considérable dans l'ondulation du couple, du flux, et la valeur de THD du courant statorique par rapport aux résultats obtenus dans les autres commandes.

REFERENCES

- [1] Chaikhy Hamid, "Contribution au développement et à l'implantation des stratégies de commandes évaluées des machines asynchrones," Thèse doctorat, université Hassan 2, Casablanca, 2013.
- [2] H. Yantour, J. Saadi, A. Khoumsi, "Modélisation et simulation d'une commande directe du couple appliquée à la machine asynchrone (DTC)," 6^e conférence francophone de modélisation et simulation-MOSIM'06 du 3 au 5 Avril 2006, Rabat, Maroc.
- [3] Boufateh Messaoudi, "Utilisation du contrôle directe du flux statorique et du filtre de Kalman en vue du contrôle directe du couple d'un moteur asynchrone," Mémoire de Magister, université Mohamed Khaider de Biskra, 2007.
- [4] 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, Mediamira science Publisher, Volume 53, Number 1, 2012, pp35- 40.
- [5] 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.
- [6] Chikhi Abdesselem, "Commande Directe du Couple du Moteur Asynchrone –Apport de la Logique Floue," Mémoire de Magister, université de Batna, 2008.
- [7] H.Tédjini, M. Moudjahed, Y. Meslem, M. Tadjine, "Commande non linéaire Adaptative par backstepping et observateur d'une machine synchrone à aimant permanent alimentée par un onduleur à trois niveaux," 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP'2007, 03-04 November 2007.
- [8] Benzemamouche Houria, "Application de la MLI Vectorielle aux onduleurs Multiniveaux à base de GTO et d'IGBT," Mémoire de Magister, université badji mokhtar-Annaba, 2010.
- [9] N. Lourci, E. M. Berkouk, DJ. Lalili, "Cascade d'un redresseur à deux Niveaux-onduleur à cinq Niveaux à diodes Flottantes-machines asynchrone," Revue des sciences et de la technologie-RST-, volume 1 N°1, janvier 2009.
- [10] M. Nadhir, "Contribution à l'étude des Performances des Onduleurs Multiniveaux sur les Réseaux de Distribution," Thèse de Doctorat en sciences, université Badji Mokhtar-Annaba, 2014.
- [11] Moualdia 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.