

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLICUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
جامعة عمار تليجي بالأغواط  
UNIVERSITE AMAR TELIDJI DE LAGHOUAT



كلية التكنولوجيا  
Faculté De Technologie  
قسم الإلكترونيات  
Département d'électrotechnique

Domaine : Sciences et Technologies ST  
Filière : Électrotechnique ELT  
Spécialité : Commandes Électriques CE

مذكرة نهاية الدراسات لنيل شهادة ماستر  
Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du Master

Thème

الموضوع

## ÉTUDE D'UNE DTC NEURONALE A ONDULEUR NPC APPLIQUEE A UN MAS

Présenté par : AMMAR Abd Elhalim

Devant le jury composé de :

KOUZI Katia

AMEUR Aissa

MOKHTARI Bachir

BIRAME M'hamed

Pr.

Pr.

MCA

MCA

Présidente

Examineur

Encadreur

Co-Encadreur

Année Universitaire 2021/2022

# Remerciements

Qu'Allah accepte nos remerciements, car avec sa grâce que nous vivons ces moments heureux aujourd'hui, *Elhamdoulillah*.

J'adresse mes grands remerciements à l'encadreur monsieur *MOKHTARI Bachir* pour sa proposition du thème, sa disponibilité et pour ses orientations judicieuses afin d'accomplir ce travail dans des bonnes conditions.

Je remercie monsieur *BIRAME M'hamed* d'avoir participé à l'encadrement de ce travail et pour sa disponibilité durant sa réalisation.

Mes remerciements vont aussi aux membres du jury qui ont accepté l'expertise de ce travail.

Egalement, je remercie tout enseignant du primaire jusqu'à l'université, sans eux, je n'aurais pas eu cette belle opportunité dans ma vie.

Enfin, je remercie tous mes amis et j'exprime au fond gratitude à toutes personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

**AMMAR ABD ELHALIM**

# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mon grand-père et ma grand-mère,*

*A mes chers parents,*

*A mon frère et mes sœurs,*

*A toute ma famille,*

*A Tous les enseignants du département d'électrotechnique, et à tous les amis d'électrotechnique et spécialement les étudiants de la promotion 2022.*

**AMMAR ABD ELHALIM**

## ملخص

أدى التطور في المعالجات الدقيقة وفي إلكترونيات الاستطاعة إلى ظهور عدة استراتيجيات في نظم التحكم الشعاعي للمحركات الكهربائية و من بينها المحرك اللاتزامني ثلاثي الأطوار (MAS) و من بين هذه الاستراتيجيات التحكم المباشر لعزم الدوران و الدفق المغناطيسي المعروفة اختصاراً بـ DTC ، في هذا العمل المقدم نستبدل بموج الجهد الكهربائي ثنائي المستوى بموج الجهد ثلاثي المستوى من نوع NPC قصد التقليل من تموجات العزم و الدفق المغناطيسي ، كذلك نستبدل مقارنات التخلفية (CH) بمقارنات عصبونية (CHN) و جدول الحقيقة العادي (TVC) بجدول عصبوني (TVN) وذلك لتقليل حجم المحاكاة.

**الكلمات المفتاحية :** TVN ، CHN ، CH ، TVC ، DTC ، NPC ، MAS .

## Résumé

Le développement des microprocesseurs et de l'électronique de puissance a conduit à l'émergence de plusieurs stratégies dans les systèmes de contrôle vectoriel des moteurs électriques, dont le moteur asynchrone triphasé (MAS), et parmi ces stratégies figure le Contrôle Direct du Couple et du Flux magnétique abrégé DTC. Dans ce mémoire, nous remplaçons l'onduleur de tension à deux niveaux par un onduleur de tension à trois niveaux de type NPC afin de réduire les ondulations de couple et de flux magnétique. Nous remplaçons également les comparateurs d'hystérésis (CH) par des comparateurs neuronaux (CHN) et la table de vérité conventionnelle (TVC) par une table neuronale (TVN) pour réduire le volume de la simulation.

**Mots clés :** MAS, NPC, DTC, TVC, CH, CHN, TVN.

## Abstract

The development of microprocessors and power electronics has led to the emergence of several strategies in electric motor vector control systems, including the three-phase induction motor (IM), and among these strategies is Direct Torque and Flux Control abbreviated DTC. In this presented work, we replace the two-level voltage inverter with an NPC-type three-level voltage inverter to reduce torque and magnetic flux ripples. We also replace hysteresis comparisons (HC) with neural comparators (NHC) and conventional truth table (CTT) with neural table (NTT) to reduce the size of the simulation.

**Keywords:** IM, NPC, DTC, TTC, HC, NHC, NT.

# SOMMAIRE

ABREVIATIONS ET SYMBOLES .....	ii
LISTE DE FIGURES ET DE TABLEAUX .....	iii
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	2

## Chapitre I : Modélisation du MAS

I.1. INTRODUCTION.....	4
I.2. GENERALITES SUR LE MAS TRIPHASE A CAGE.....	4
I.2.1. DEFINITION .....	4
I.2.2. CONSTITUTION DU MAS .....	5
I.2.3. LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS DU MAS.....	6
I.3. MODELISATION DU MAS .....	7
I.3.1 EQUATIONS DU MAS GENERALISEES .....	7
I.4. TRANSFORMATION DE PARK.....	10
I.4.1. APPLICATION DE LA TRANSFORMATION DE PARK .....	12
I.4.2. REFERENTIEL LIE AU STATOR ( $\alpha, \beta$ ) .....	13
I.5. FORME D'ETAT DU MODELE DU MAS DANS LE REPERE ( $\alpha, \beta$ ).....	14
I.6. CONCLUSION.....	15

## Chapitre II: Commande Directe de Couple du MAS

II.1. INTRODUCTION.....	17
II.2. LA COMMANDE DTC .....	17
II.3. PRINCIPE DU CONTROLE DIRECT DE FLUX .....	18
II.3.1. CONTROLE DU VECTEUR FLUX STATORIQUE .....	18
II.3.2. CONTROLE DU VECTEUR DU COUPLE ELECTROMAGNETIQUE .....	19
II.4. ESTIMATION DE FLUX ET DE COUPLE .....	20
II.5. DESSCREPTION DE LA STRUCTURE DE CONTROLE .....	20
II.5.1. SELECTION DU VECTEUR DE TENSION .....	21
II.6. COMPARETEUR A HYSTERESIS A TROIS NIVEAUX .....	21
II.7. TOPOLOGIE D'UN ONDULEUR NPC A TROIS NIVEAUX.....	22
II.8. ELABORATION DE LA TABLE DE COMMUTATION .....	23
II.9. STRUCTURE GENERALE DE LA DTC .....	24
II.10. AVANTAGES ET INCONVENIENTES DE LA DTC .....	25
II.10.1. AVANTAGES DE LA DTC .....	25
II.10.2. INCONVENIENTS DE LA DTC .....	25
II.11. CONCLUSION.....	25

### **Chapitre III : Table de sélection neuronale**

<b>III.1. INTRODUCTION.....</b>	<b>27</b>
<b>III.2. HISTORIQUE .....</b>	<b>27</b>
<b>III.3. GENERALITES .....</b>	<b>27</b>
<b>III.4. DEFINITIONS .....</b>	<b>28</b>
<b>III.5. CREATION D'UN RÉSEAU DE NEURONES SUR MATLAB .....</b>	<b>28</b>
<b>III.6. CONCLUSION .....</b>	<b>31</b>

### **Chapitre IV : Etude Comparative entre DTC et DTCN**

<b>IV.1. INTRODUCTION .....</b>	<b>33</b>
<b>IV.2. SCHEMA DE SIMULATION .....</b>	<b>33</b>
<b>IV.3. RESULTATS DE SIMULATION .....</b>	<b>39</b>
<b>IV.4. CONCLUSION .....</b>	<b>44</b>
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>46</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>48</b>

---

## **ABREVIATIONS ET SYMBOLES**

---

## ABREVIATIONS ET SYMBOLES

$\delta$	L'angle entre les vecteurs flux statorique et rotorique.
$\theta$	L'angle entre l'axe ( $d$ ) du repère de Park et l'axe de la phase (a) du système triphasé.
$(\alpha, \beta)$	Axes d'un repère lié au stator.
$C_e$	Couple électromagnétique.
$C_r$	Couple résistant.
$f_r$	Coefficient de frottements.
<i>DTCN</i>	DTC associée aux réseaux neuronaux.
$E$	Tension de bus continue à l'entrée de l'onduleur.
$I_{a,b,c}$	Courants absorbés par le moteur.
$I_{s,r}$	Courant statorique/rotorique.
$J$	Moment d'inertie total sur l'arbre du moteur.
$[L_{s,r}]$	Les matrices des inductances propres statoriques/rotoriques.
<i>MAS</i>	Moteur Asynchrone.
$[M_{r,s}]$	La matrice des inductances mutuelles stator/rotor.
<i>RNA</i>	Réseau de Neurones Artificiel.
$R_{s,r}$	Résistance statorique/rotorique.
$T_{s,r}$	Constante de temps statorique/rotorique.
$V_i$	Tension délivrée par l'onduleur ( $i=1, 2, 3, \dots, 19$ ).
$\omega_{ref}$	Pulsation référentielle.
$\omega_{r,s}$	Pulsation rotorique / statorique.
$\Phi_{r,s}$	Flux rotorique / statorique.
$\Delta C_e$	Erreur (écart) de couple.
$\Delta \Phi_s$	Erreur (écart) de flux statorique.
<i>NPC3N</i>	Onduleur NPC à trois niveaux.
$\Omega_r$	La vitesse de rotation du rotor.
$\Omega_s$	La vitesse de rotation du champ tournant par rapport au stator.

---

## LISTE DE FIGURES ET DE TABLEAUX

<b>Figure I.1.</b> Moteur asynchrone triphasé à cage	5
<b>Figure I.2.</b> Représentation spatiale des enroulements du MAS.	5
<b>Figure I.3.</b> Représentation du MAS triphasé et son équivalent biphasé.	11
<b>Figure II.1.</b> Structure de la commande DTC.	17
<b>Figure II.2.</b> Evolution du vecteur de flux statorique dans le plan $(\alpha, \beta)$	18
<b>Figure II.3.</b> Vecteurs des flux statorique, rotorique et de fuites.	19
<b>Figure II.4.</b> Choix du vecteur-tension	21
<b>Figure II.5.</b> Comparateur de couple à hystérésis utilisant trois niveaux.	22
<b>Figure II.6.</b> Bras d'un onduleur à trois niveaux de type NPC	22
<b>Figure II.7.</b> Vecteurs de tension et états des interrupteurs correspondant d'un NPC3N	23
<b>Figure II.8.</b> Comparateur à hystérésis du couple électromagnétique	24
<b>Figure II.9.</b> Structure générale d'une DTC appliquée au MAS.	24
<b>Figure.III.1.</b> NNTOOL pour créer la TVN sous Matlab.	28
<b>Figure.III.2.</b> Imports du Input data <b>Ent</b> et Target data <b>Sor</b> .	29
<b>Figure.III.3.</b> Paramètres de <b>net</b> créé.	29
<b>Figure.III.4.</b> Phase d'apprentissage.	30
<b>Figure.III.5.</b> Export des variables <b>net</b> et <b>sorn</b> dans l'espace de travail.	30
<b>Figure.III.6.</b> Bloc RNA créé.	31
<b>Figure.III.7.</b> Schéma blocs de la TVN créé.	31
<b>Figure IV.1.</b> Schéma bloc de la commande DTC conventionnelle du MAS.	33
<b>Figure IV.2.</b> Bloc de la table de vérité avec les calculs des écarts de flux et du couple par comparateurs à hystérésis.	34
<b>Figure IV.3.</b> Bloc Hystérésis de Couple.	34
<b>Figure IV.4.</b> Sauvegarde des vecteurs pour l'apprentissage et la conception du CHN.	35
<b>Figure IV.5.</b> Imports du Input data <b>Ent1</b> et Target data <b>Sor1</b>	35
<b>Figure IV.6.</b> Paramètres de <b>net</b> créé.	36
<b>Figure IV.7.</b> L'opération et l'évolution d'apprentissage.	37
<b>Figure IV.8.</b> Convergence de la sortie de RNA vers sa cible (Target).	37
<b>Figure IV.9.</b> Export des variables <b>sor1</b> , <b>net</b> et <b>network-outputs</b> dans l'espace de travail de Matlab.	38

---

<b>Figure IV.10.</b> Bloc RNA créé.	38
<b>Figure IV.11.</b> Schéma Bloc des CHN et TVN associés à la DTC.	39
<b>Figure IV.12.</b> Schéma global de la DTC équipée par des blocs neuronaux.	39
<b>Figure IV.13.1.</b> Le couple électromagnétique pour une DTC.	39
<b>Figure IV.13.2.</b> Le couple électromagnétique pour une DTCN.	40
<b>Figure IV.14.1.</b> Le module de flux statorique pour une DTC.	40
<b>Figure IV.14.2.</b> Le module de flux statorique pour une DTCN.	41
<b>Figure IV.15.1.</b> La vitesse de rotation pour une DTC.	41
<b>Figure IV.15.2.</b> La vitesse de rotation pour une DTCN.	42
<b>Figure IV.16.1.</b> Les courants absorbés pour une DTC.	42
<b>Figure IV.16.2.</b> Les courants absorbés pour une DTCN.	43
<b>Figure IV.17.</b> La trajectoire du vecteur de flux statorique.	43
<hr/>	
<b>Tableau .II.1.</b> Etat de commutation d'un NPC3N.	22
<b>Tableau .II.2.</b> Interconnexions possibles de la charge et de son alimentation.	23
<b>Tableau .II.3.</b> Table de vérité de la DTC à NPC3N.	24
<b>Tableau .IV.1.</b> Paramètres du système simulé.	44

# INTRODUCTION GENERALE

### INTRODUCTION GENERALE

La commande à vitesse variable des entraînements électriques, a bénéficié ses dernières années d'avancées méthodologique et technologique significatives. En effet les projets de l'électronique numérique et le développement des composants de l'électronique de puissance permet aujourd'hui de mettre on œuvre des algorithmes de commande envisageables il y a une dizaine d'années.

La DTFC (Direct Torque and Flux Control), ou populairement connue par DTC, est apparue au milieu des années quatre-vingt, spécialement par les deux chercheurs Isao Taka hashi et Toshihiko Noguchi. Elle s'est appuyée essentiellement sur des hypothèses simples, qui la rendaient ainsi facile à implanter. Elle est caractérisée par une rapidité de réponse du couple, une insensibilité vis-à-vis de la dérive paramétrique rotorique, notamment la constante de temps, et une convenance systématique à la commande de vitesse sans capteur [BM14].

On s'intéresse à l'amélioration des performances de la commande DTC appliquée aux machines tournantes. Il faut signaler que la commande DTC présente un inconvénient majeur qui est lié surtout à l'existence des ondulations importantes dans le couple et le flux statorique. Dans ce cadre, on propose une solution à ces problèmes par l'utilisation de la notion d'apprentissage par les réseaux de neurones. Le présent travail a pour but de remplacer les comparateurs d'hystérésis par des comparateurs neuronaux et la table de vérité conventionnelle par une table neuronale.

Pour ce faire, le travail présenté dans ce mémoire est articulé autour de quatre chapitres : Le premier chapitre sera consacré à la modélisation du MAS choisi pour l'étude qui est le MAS. Ce choix est justifié par sa large utilisation dans l'industrie. La modélisation est la description mathématique du système, elle nous aide à traiter le problème par simulation. Plusieurs modèles alors sont conçus, et nous garderons que celui écrit dans l'espace de Park lié au stator.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons le principe de la DTC classique appliquée au MAS telle qu'elle est décrite par leur fondateur en 1984.

Dans le troisième chapitre, nous impliquons les réseaux de neurones, et nous apprendrons comment créer une table de vérité par ces réseaux de neurones.

Le quatrième et dernier chapitre, présentera une DTC à comparateurs neuronaux, une simulation de la DTC conventionnelle comparée à celle équipée par des blocs neuronaux sera ensuite le sujet du reste du travail.

# Chapitre I : Modélisation du MAS

## I.1. INTRODUCTION

La modélisation de l'actionneur électrique est une étape primordiale pour étudier sa commande. Dans ce qui suit, on donnera de manière explicite le modèle mathématique du MAS (Equations électriques et mécaniques) dans son référentiel triphasé. Puis, on réduira l'ordre du système par une transformation dite de PARK. Cette transformation modélise la MAS dans un nouveau référentiel biphasé équivalent, cette fois.

Ceci nous permet d'obtenir des équations simples, qui traduisent fidèlement le fonctionnement du moteur. Nous commençons donc, de donner quelques généralités sur le MAS, sa définition, sa constitution, puis on cite ses avantages et ses inconvénients. Puis on cite les hypothèses simplificatrices qui nous aident à simplifier le modèle final. Nous donnerons les équations qui traduisent le modèle réel du moteur triphasé après une brève mise au point de certaines conventions. Nous présenterons ensuite, le modèle général de Park, duquel, nous déduirons après un choix judicieux du repère adéquat à la commande étudiée, le modèle du moteur commandé en tension [AC08].

## I.2. GENERALITES SUR LE MAS TRIPHASE A CAGE

Le moteur asynchrone à cage, à cause de sa robustesse, est très répandu dans le milieu industriel. Son utilisation classique est avant tout l'entraînement des systèmes à vitesse fixe ou variable. Aujourd'hui, avec le contrôle électronique du moteur, cela ouvre un large champ d'utilisation. La MAS à cage n'est plus limitée à des applications à vitesse constante.

### I.2.1. DEFINITION

Une machine asynchrone est constituée de deux parties, le stator et le rotor. Le stator représente la partie statique de la machine constituée d'un circuit magnétique comportant de multiples encoches à l'intérieur des quelles sont logées trois enroulements formants les bobines des phases statoriques. Au centre de ce cylindre, on trouve le rotor de la machine dont le circuit magnétique est composé de barres généralement en cuivre ou en aluminium. Ces barres sont reliées entre elles à chaque extrémité par un anneau de court-circuit.

Les trois phases statoriques sont alimentées par un réseau triphasé de tension sinusoïdale, à amplitudes et fréquences constantes [BM14].

Le couple appliqué va l'entraîner à une vitesse inférieure à celle du champ tournant donnée par la vitesse angulaire  $\Omega_s = \frac{60.f}{p}$ .

Le glissement du moteur est défini par la relation :  $g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s}$

- $\Omega_s$  : la vitesse de rotation du champ tournant par rapport au stator ;
- $\Omega_r$  : la vitesse de rotor ;
- $p$  : nombre de paires de pôles.

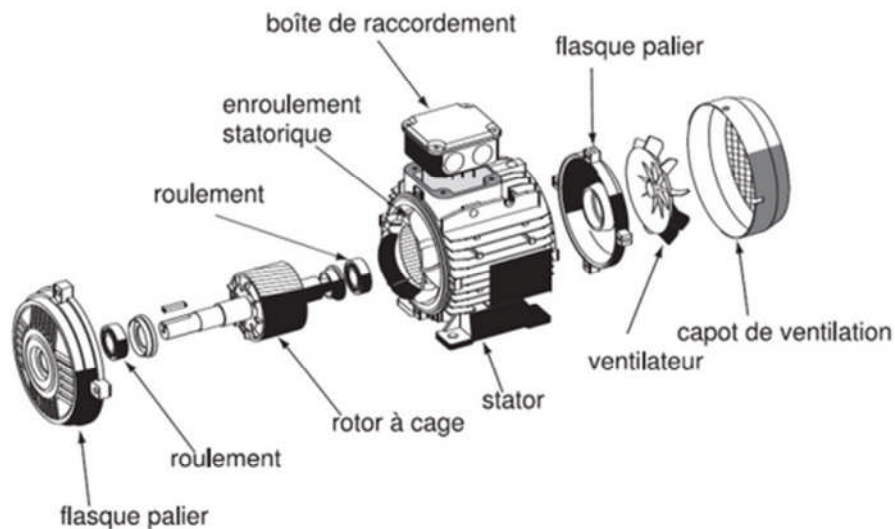


Figure I.1. Moteur asynchrone triphasé à cage [MI14]

## I.2.2. CONSTITUTION DU MAS

En récapitulé, le MAS est constitué des principaux éléments suivants (voir la figure(I.1)) [MI14] :

- Le stator (partie fixe) constitué de disques en tôles magnétiques portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer ;
- Le rotor (partie tournante) constitué de disques en tôles magnétiques empilés sur l'arbre du moteur portant un enroulement injecté ;
- Les organes mécaniques permettant la rotation du rotor et le maintien du différent sous-ensemble.

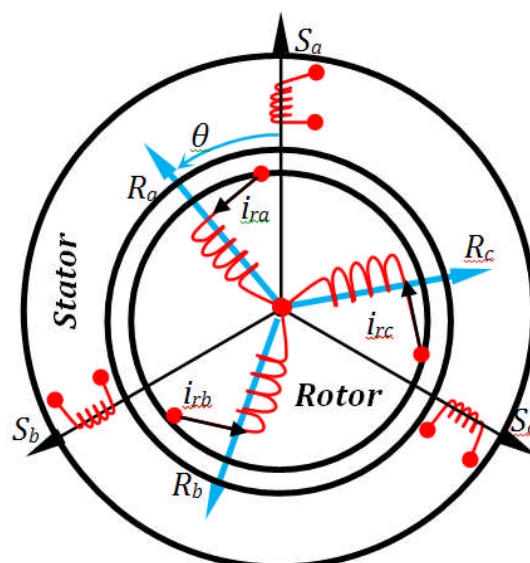


Figure I.2. Représentation spatiale des enroulements du MAS [BM14].

### I.2.3 LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS DU MAS

#### A, Les avantages

- Peu coûteux ;
- Robuste ;
- Fiable ;
- Economique ;
- Fonctionne directement sur le secteur alternatif, sans transformations préalables de l'énergie électrique qui l'alimente ;
- C'est le moteur industriel par excellence qui ne possède pas d'organes délicats comme le collecteur du moteur à courant continu et qui n'utilise pas de contacts glissants comme du MAS (pour l'excitation du rotor) ;
- Les courants qui circulent dans le stator, constituent l'unique source externe du champ magnétique ;
- Sa vitesse varie un peu quand on le charge, on dit qu'il glisse, mais ce glissement en général ne dépasse pas quelques centièmes de la vitesse à vide il est négligeable le plus souvent ;
- Son démarrage ne pose pas de problèmes pour les unités de petite puissance, par contre, pour les moteurs de fortes puissances, il faut le démarrer sous tension réduite pour éviter un appel de courant trop élevé.

#### B, Les inconvénients

- Les courants statoriques sont à la fois à générer le flux et le couple;
- Le dé couplage naturel de la machine à courant continu n'existe pas;
- On ne peut pas connaître les variables internes du rotor à cage qu'à travers le stator;
- L'inaccessibilité du rotor nous amènera à modifier l'équation vectorielle rotorique pour exprimer les grandeurs rotoriques à travers leurs actions sur le stator;
- La simplicité structurelle cache donc une grande complexité fonctionnelle du caractéristiques qui viennent d'être évoquées mais également aux non linéarités, à la difficulté d'identifications et aux variations des paramètres.

### I.3 MODELISATION DU MAS

La modélisation d'un système quelconque est indispensable lorsque nous voulons le commander, Le moteur asynchrone n'est pas un système simple, car de nombreux phénomènes compliqués interviennent dans son fonctionnement, comme la saturation, l'effet de peau ...etc. Cependant, nous n'allons pas tenir compte de ces phénomènes, car d'une part, leur formulation mathématique est difficile, d'autre part, leur incidence sur le comportement du moteur est considérée comme négligeable dans certaines conditions.

#### ➤ HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES

Le moteur asynchrone, avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie propre est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte, et comme nous l'avons déjà soulevé, il est alors nécessaire d'adopter certaines hypothèses simplificatrices [RL15].

- La machine est de constitution symétrique.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont tous négligés.
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétométriques d'entrefer.
- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas prise en compte.
- L'additivité du flux.
- La constance des inductances propres.
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique entre leurs axes magnétiques.

#### I.3.1 EQUATIONS DU MAS GENERALISEES

Le comportement du MAS est entièrement défini par trois types d'équations à savoir :

- ✓ Les équations électriques ;
- ✓ Les équations magnétiques ;
- ✓ L'équation mécanique.

## A. Les équations électriques

L'application de la loi d'Ohm généralisée, à chaque enroulement de la machine de la (figure I.2) donne les équations de tension du stator et du rotor comme suit :

$$\begin{cases} V_{as} = R_s i_{as} + \frac{d}{dt} \Phi_{as} \\ V_{bs} = R_s i_{bs} + \frac{d}{dt} \Phi_{bs} \\ V_{cs} = R_s i_{cs} + \frac{d}{dt} \Phi_{cs} \end{cases} \quad (I.1)$$

$$\begin{cases} V_{ar} = 0 = R_r i_{ar} + \frac{d}{dt} \Phi_{ar} \\ V_{rs} = 0 = R_r i_{br} + \frac{d}{dt} \Phi_{br} \\ V_{cr} = 0 = R_r i_{cr} + \frac{d}{dt} \Phi_{cr} \end{cases} \quad (I.2)$$

Avec :

- $V_{as}, V_{bs}, V_{cs}$  : Tensions appliquées aux trois phases statoriques.
- $i_{as}, i_{bs}, i_{cs}$  : Courants qui traversent les trois phases statoriques.
- $\Phi_{as}, \Phi_{bs}, \Phi_{cs}$  : Flux totaux à travers ces enroulements.
- $V_{ar}, V_{rs}, V_{cr}$  : Tensions rotoriques.
- $i_{ar}, i_{br}, i_{cr}$  : Courants rotoriques.
- $\Phi_{ar}, \Phi_{br}, \Phi_{cr}$  : Flux rotoriques.
- $R_s$  : Résistance d'une phase statorique.
- $R_r$  : Résistance d'une phase rotoriques.

Sous forme matricielle condensée ses équations peuvent s'écrire :

$$[V_{abcs}] = [R_s][i_{abcs}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{abcs}] \quad (I-3)$$

$$[V_{abcr}] = 0 = [R_r][i_{abcr}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{abcr}] \quad (I-4)$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}, \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

avec:

$$[V_{abcs}] = [V_{as} V_{bs} V_{cs}]^T, \quad [V_{abcr}] = [V_{ar} V_{br} V_{cr}]^T$$

$$[i_{abcs}] = [i_{as} i_{bs} i_{cs}]^T, \quad [i_{abcr}] = [i_{ar} i_{br} i_{cr}]^T$$

## B. Les équations magnétiques

On peut écrire les expressions du flux des phases statoriques et rotoriques comme suit :

$$[\Phi_{abcs}] = [L_{ss}][i_{abcs}] + [M_{sr}][i_{abcr}] \quad (I-5)$$

$$[\Phi_{abcr}] = [L_{rr}][i_{abcr}] + [M_{rs}][i_{abcs}] \quad (I-6)$$

Avec :

Pour le stator:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} = [L_S] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (I-7)$$

Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} = [L_r] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + [M_{rs}] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (I-8)$$

Tel que:

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T$$

Avec :

- $[L_S]$  Matrice des inductances statoriques.
- $[L_r]$  Matrice des inductances rotoriques.
- $[M_{sr}]$  Matrice des inductances mutuelles statoriques.
- $[M_{rs}]$  Matrice des inductances mutuelles rotoriques.

Où :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

Ainsi :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (I-9)$$

Tel que :

- $l_s$  : Inductance propre d'une phase statorique.
- $l_r$  : Inductance propre d'une phase rotorique.
- $M_s$  : Inductance mutuelle entre phases statoriques.
- $M_r$  : Inductance mutuelle entre phases rotoriques.
- $\theta$  : Angle électrique définit la position relative instantanée entre les axes statoriques et les axes rotoriques qui sont choisis comme axes des références.
- $M$  : Maximum de l'inductance mutuelle entre phase du stator et la phase correspondante du rotor.

### C. Equation mécanique

L'équation mécanique de la machine s'écrit :

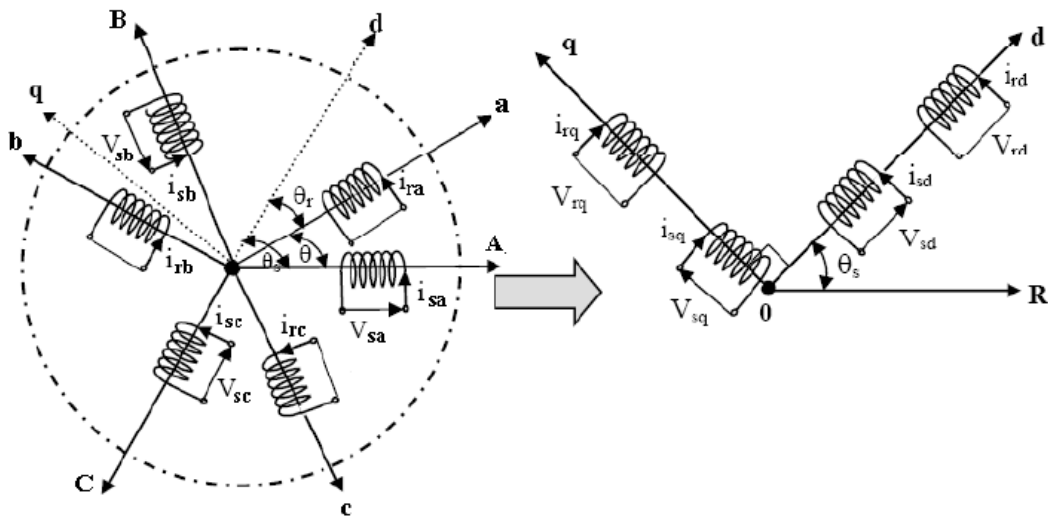
$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r - f_r \Omega \quad (I-10)$$

Avec :

- $C_e$ : Le couple électromagnétique.
- $C_r$ : Le couple résistant.
- $f_r$ : Coefficient de frottements.
- $J$ : Moment d'inertie du MAS.

### I.4. TRANSFORMATION DE PARK

La transformation de Park consiste à appliquer aux courants, tensions et flux un changement de variable faisant intervenir l'angle entre l'axe des enroulements et les axes d et q. D'après la Figure (I.3), c'est l'angle  $\theta_s$  qui doit intervenir pour les grandeurs du stator et l'angle  $\theta_r$  pour les grandeurs du rotor. On transforme donc l'enroulement triphasé statorique **(a, b, c)** et l'enroulement triphasé rotorique **(A, B, C)** en trois enroulements orthogonaux **(d, q, o)**, direct, quadrature et homopolaire, respectivement [AZ10].



**Figure I.3.** Représentation du MAS triphasé et son équivalent biphasé [AC08].

Avec :

$\theta_s$  : l'angle entre l'axe direct et l'axe statorique.

$\theta_r$  : l'angle entre l'axe direct et l'axe rotorique.

$\theta$  : l'angle entre l'axe de référence statorique et rotorique.

La transformation de Park est la même pour les courants, les tensions et les flux. Elle s'écrit pour les courants par exemple comme suit:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} = p(\theta) \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \tag{I-11}$$

$$[P] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \tag{I-12}$$

Tels que :

$\theta_a = \theta_s$ : Pour la transformation des grandeurs statoriques ;

$\theta_a = \theta_r$ : Pour la transformation des grandeurs rotoriques.

La matrice de transformation inverse est donnée par:

$$P^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \tag{I-13}$$

On peut alors exprimer les grandeurs statoriques et rotoriques comme suit :

Les grandeurs statoriques sont obtenues pour  $\theta = \theta_s$

$$\begin{bmatrix} X_{ds} \\ X_{qs} \\ X_{0s} \end{bmatrix} = p(\theta) \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (I-14)$$

- Les grandeurs rotoriques suivantes sont obtenues pour  $\theta = \theta_r$

$$\begin{bmatrix} X_{dr} \\ X_{qr} \\ X_{0r} \end{bmatrix} = p(\theta) \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (I-15)$$

Où:  $X$  est une tension, un courant ou un flux,  $X_0$  est la composante homopolaire.

### I.4.1. APPLICATION DE LA TRANSFORMATION DE PARK

Les expressions du moteur (I-1 et I-2) peuvent s'exprimer en utilisant la matrice de passage est cela en considérant que le système est équilibré :

#### A, Les équations électriques

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \Phi_{sd} - \omega_a \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \Phi_{sq} + \omega_a \Phi_{sd} \\ V_{rd} = 0 = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \Phi_{rd} - (\omega_a - \omega_r) \Phi_{rq} \\ V_{rq} = 0 = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} \Phi_{rq} + (\omega_a - \omega_r) \Phi_{rd} \end{array} \right. \quad (I-16)$$

#### B, Les équations magnétiques

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{array} \right. \quad (I-17)$$

Avec :

$L_s = l_s - m_s$  : l'inductance cyclique propre statorique.

$L_r = l_r - m_r$  : l'inductance cyclique propre rotorique.

$M = \frac{3}{2} M_{sr}$  : l'inductance cyclique mutuelle entre stator et rotor.

## C , L'équation mécanique

L'application de la transformation de Park pour l'équation mécanique donne :

$$C_e = 1,5p(\Phi_{ds}i_{qs} - \Phi_{qs}i_{ds}) \quad (I-18)$$

L'équation du mouvement du MAS s'écrit alors :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r - f_r \Omega \quad (I-19)$$

### I.4.2. REFERENTIEL LIE AU STATOR ( $\alpha, \beta$ )

Dans notre étude, nous avons opté pour un repère immobile par rapport au stator. C'est le référentiel le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées, il possède des tensions et des courants réels et peut être utilisé pour étudier les régimes de démarrage et de freinage du moteur à courant alternatif.

Le passage du système triphasé au système biphasé est assuré par la matrice de Concordia :

$$[T] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (I-20)$$

$$\begin{bmatrix} X_{sa} \\ X_{s\beta} \\ X_{s0} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} X_{ra} \\ X_{r\beta} \\ X_{r0} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} X_A \\ X_B \\ X_C \end{bmatrix}$$

#### A. Les équations du moteur dans le repère ( $\alpha, \beta$ ) :

Dans ce repère, l'application de la transformation de Concordia aux équations électriques, magnétiques et électromagnétiques données par les équations (I-22) permet d'obtenir :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + \frac{d}{dt} \Phi_{s\alpha} \\ V_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + \frac{d}{dt} \Phi_{s\beta} \\ V_{r\alpha} = 0 = R_r i_{r\alpha} + \frac{d}{dt} \Phi_{r\alpha} - \omega_r \Phi_{r\beta} \\ V_{r\beta} = 0 = R_r i_{r\beta} + \frac{d}{dt} \Phi_{r\beta} + \omega_r \Phi_{r\alpha} \end{array} \right. \quad (I-21)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{ds\alpha} = L_s i_{s\alpha} + M i_{r\alpha} \\ \Phi_{qs\beta} = L_s i_{s\beta} + M i_{r\beta} \\ \Phi_{dr\alpha} = L_r i_{r\alpha} + M i_{s\alpha} \\ \Phi_{qr\beta} = L_r i_{r\beta} + M i_{s\beta} \end{array} \right. \quad (I-22)$$

L'équation du couple estimé est donnée par :

$$C_e = 1,5p(\Phi_{ds}i_{qs} - \Phi_{ds}i_{qs}) \quad (I-23)$$

Rappelons que l'équation mécanique est donnée par :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r - f.\Omega \quad (I-24)$$

## I.5. FORME D'ÉTAT DU MODÈLE DU MAS DANS LE REPÈRE $(\alpha, \beta)$

La forme générale de l'équation d'état s'écrit de la façon suivante [DA10] :

$$\begin{cases} [\dot{X}] = [A][X] + [B][U] \\ Y = C.X \end{cases} \quad (I-25)$$

Avec :

$$[X] = [i_{s\alpha} \ i_{s\beta} \ \Phi_{s\alpha} \ \Phi_{s\beta}]^T : \text{Vecteur d'état.}$$

$$[U] = [V_{s\alpha} \ V_{s\beta}] : \text{Vecteur de commande.}$$

$[A]$ . Matrice évaluation d'état du système

$[B]$  : Matrice du système de commande

Avec :

$$X = \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ \Phi_{s\alpha} \\ \Phi_{s\beta} \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (I-26)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sigma} \left( \frac{1}{T_r} + \frac{1}{T_s} \right) & -\omega_r & \frac{1}{\sigma L_s T_r} & \frac{\omega_r}{\sigma L_s} \\ \omega_r & -\frac{1}{\sigma} \left( \frac{1}{T_r} + \frac{1}{T_s} \right) & -\frac{\omega_r}{\sigma L_s} & \frac{1}{\sigma L_s T_r} \\ -r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r_s & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (I-27)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s \sigma} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s \sigma} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (I-28)$$

Avec :

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} : \text{coefficient de dispersion de Blondel. ;}$$

$$T_s = \frac{L_s}{r_s} : \text{constante de temps statorique.}$$

$$T_r = \frac{L_r}{r_r} : \text{constante de temps rotorique.}$$

$$\omega_r = p\Omega_r \text{ la pulsation mécanique du rotor et } p \text{ le nombre de paires de pôles du MAS.}$$

## I.6. CONCLUSION

Dans ce premier chapitre nous avons pu établir un modèle mathématique du MAS triphasé dont la complexité a été réduite en utilisant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, et en utilisant le modèle diphasé équivalent obtenu par les transformations de Park et de Concordia. Le modèle biphasé écrit dans un repère lié au stator convient bien à l'implantation de la commande DTC qui sera présentée dans le chapitre suivant.

## **Chapitre II: Commande directe de couple du MAS**

## II.1. INTRODUCTION

Les méthodes de contrôle direct du couple (DTC) des MAS sont apparues dans la deuxième moitié des années 1980, introduite par I. TAKAHASHI et M. DEPENDROCK, comme concurrentielles des méthodes classiques. Ensuite plusieurs travaux sont multipliés sur ce sujet faisant développer diverses stratégies de commandes [AZ10].

La commande des machines électriques a fait l'objet de plusieurs recherches et travaux pendant longtemps, afin de profiter et exploiter leurs meilleures performances. Des commandes différentes ont été développées, pour commander le MAS. On s'intéresse à étudier la commande directe du couple (DTC), qui est le noyau de ce présent mémoire. Dans les études classiques, le MAS est alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux dans cette présente étude on va remplacer cet onduleur par un onduleur NPC à trois niveaux afin de réduire les ondulations rencontrées aux niveaux du couple et du flux. Les résultats de simulations seront illustrés ultérieurement.

## II.2. LA COMMANDE DTC

La commande DTC règle le couple du moteur par l'application des différents vecteurs de tension de l'onduleur, qui détermine son état. Les deux variables contrôlées sont le flux statorique et le couple électromagnétique qui sont commandées par des régulateurs à hystérésis. Dans une commande DTC il est préférable de travailler avec une fréquence de calcul élevée afin de réduire les oscillations de couple provoquées par les régulateurs [AC08], [TR08].

L'état de ces grandeurs nous permet de définir le vecteur de tension statorique à appliquer au MAS pour maintenir le couple et le flux dans leurs bandes d'hystérésis. Une variable intervenant également dans le choix des tensions est la position du vecteur statorique dans le plan complexe. Pour cela, le plan est divisé en six secteurs et quelque fois en douze secteurs [AH17].

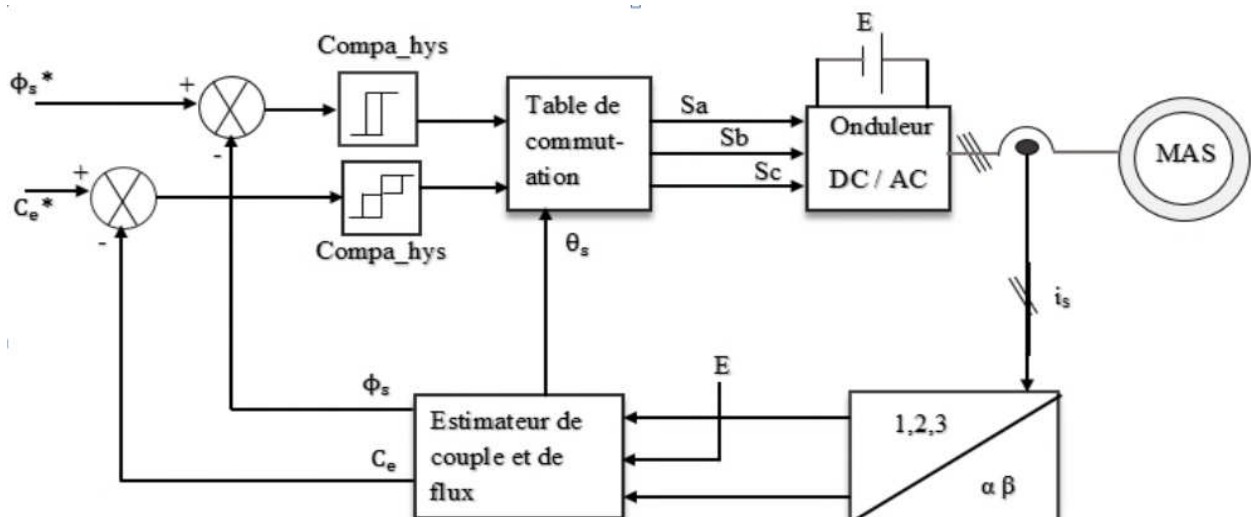


Figure II.1. Structure de la commande DTC.

### II.3. LA COMMANDE DTC

C'est une commande vectorielle qui se base comme déjà dit sur la commande de vecteur flux et de couple développé par le moteur.

#### II.3.1. CONTROLE DU VECTEUR FLUX STATORIQUE

On se place dans le repère  $(\alpha, \beta)$  lié au stator du MAS. Le flux statorique peut être obtenu par l'équation complexe suivante :

$$\bar{\Phi}_s(t) = \int_0^t (V_s - R_s I_s) dt + \bar{\Phi}_{s0} \quad (II-1)$$

En négligeant la chute de tension due à la résistance du stator pour simplifier l'étude (pour des grandes vitesses), on trouve :

$$\bar{\Phi}(t) = \bar{\Phi}_{s0} + \int_0^t V_s dt \quad (II-2)$$

Et comme, pendant une période d'échantillonnage, le vecteur de tension appliqué au MAS reste constant, on peut écrire :

$$\bar{\Phi}_s(k+1) \approx \bar{\Phi}_s(k) + V_s T_e \text{ alors } \Delta \bar{\Phi}_s \approx V_s T_e \quad (II-3)$$

avec :

- $\bar{\Phi}_s(k)$  : est le vecteur du flux statorique au pas d'échantillonnage actuel ;
- $\bar{\Phi}_s(k+1)$  : est le vecteur du flux statorique au pas d'échantillonnage suivant ;
- $\Delta \bar{\Phi}_s$  : est la variation du vecteur flux statorique  $\bar{\Phi}_s(k+1) - \bar{\Phi}_s(k)$  ;
- $T_e$  : est la période d'échantillonnage.

Pour une période d'échantillonnage constante,  $\Delta \bar{\Phi}_s$  est proportionnel au vecteur-tension appliqué au stator du MAS. La figure (II.2) montre l'évolution du vecteur flux statorique dans le plan  $(\alpha, \beta)$ .

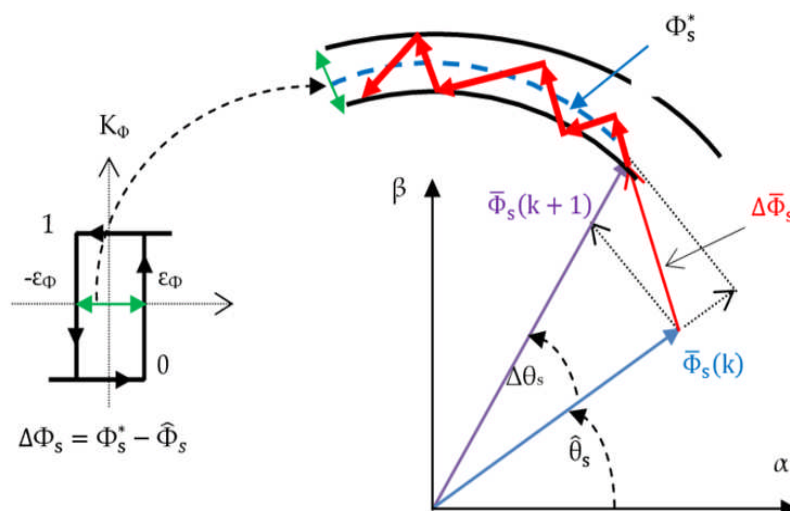


Figure II.2. Evolution du vecteur de flux statorique dans le plan  $(\alpha, \beta)$ .

Donc pour augmenter le flux statorique, il suffit d'appliquer un vecteur tension qui lui est colinéaire et dans sa direction, et vice versa

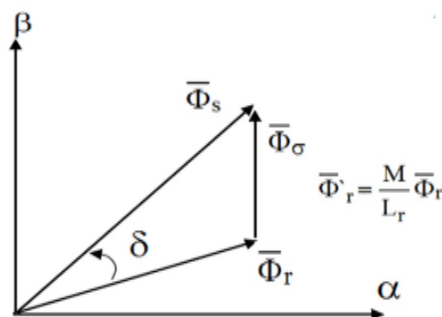
### II.3.2. CONTROLE DU VECTEUR DU COUPLE ELECTROMAGNETIQUE

Le couple électromagnétique est proportionnel au produit vectoriel entre les vecteurs des flux statorique et rotorique (voir figure II.4) selon l'expression suivante :

$$C_e = K (\bar{\Phi}_s \times \bar{\Phi}'_r) = K \|\bar{\Phi}_s\| \|\bar{\Phi}'_r\| \sin \delta \quad (\text{II-4})$$

Avec:

- $\bar{\Phi}_s$  : est le vecteur flux statorique ;
- $\bar{\Phi}_r$  : est le vecteur flux rotorique ;
- $\delta$  : angle entre les vecteurs flux statorique et flux rotorique ;
- $\bar{\Phi}'_r$  : est le vecteur flux rotorique ramené au stator ;
- $\bar{\Phi}_\delta$  :  $\sigma$  est le vecteur flux de fuites ;



**Figure II.3.** Vecteurs des flux statorique, rotorique et de fuites.

Lorsque les deux flux statorique et rotorique sont maintenus constants, par limitation du flux statorique dans une bande d'hystérésis autour de sa consigne (voir figure II.2), le couple sera fonction de l'angle de déphasage entre ces deux flux. Pour agir sur cet angle, on doit varier la position du vecteur flux statorique dans le repère  $(\alpha, \beta)$ , en appliquant un vecteur tension approprié. Ainsi, pour augmenter la valeur algébrique du couple, il suffit d'appliquer un vecteur tension en quadrature avance par rapport au flux statorique, et vice versa. [CC00]

## II.4 ESTIMATION DE FLUX ET DE COUPLE

On considère le système d'axes  $(\alpha, \beta)$  lié au stator du MAS. Les équations des tensions statoriques sont exprimées par :

$$\begin{cases} V_{s\alpha} = r_s i_{s\alpha} + \dot{\Phi}_{s\alpha} \\ V_{s\beta} = r_s i_{s\beta} + \dot{\Phi}_{s\beta} \end{cases} \quad (\text{II-5})$$

Le calcul des flux statoriques se fait selon les expressions suivantes :

$$\begin{cases} \hat{\Phi}_{s\alpha} = \int_0^t (V_{s\alpha} - r_s i_{s\alpha}) dt \\ \hat{\Phi}_{s\beta} = \int_0^t (V_{s\beta} - r_s i_{s\beta}) dt \end{cases} \quad (\text{II-6})$$

La version discrétisée de cet estimateur, définie pour une période d'échantillonnage  $T_e$ , peut être formulée de la façon suivante :

$$\begin{cases} \hat{\Phi}_{s\alpha}(n) = \hat{\Phi}_{s\alpha}(n-1) + [V_{s\alpha}(n-1) - r_s i_{s\alpha}(n-1)]T_e \\ \hat{\Phi}_{s\beta}(n) = \hat{\Phi}_{s\beta}(n-1) + [V_{s\beta}(n-1) - r_s i_{s\beta}(n-1)]T_e \end{cases} \quad (\text{II-7})$$

Le module du flux et sa phase sont obtenus par calcul comme suit :

$$\begin{cases} \hat{\Phi}_s = \sqrt{\hat{\Phi}_{s\alpha}^2 + \hat{\Phi}_{s\beta}^2} \\ \angle \hat{\Phi}_s = \arctg \frac{\hat{\Phi}_{s\beta}}{\hat{\Phi}_{s\alpha}} \end{cases} \quad (\text{II-8})$$

Une fois les deux composantes du flux sont obtenues, le couple peut être tiré facilement d'après la formule rappelée ci-dessous :

$$\hat{C}_e = \frac{3}{2} p (\hat{\Phi}_{s\alpha} i_{s\beta} - \hat{\Phi}_{s\beta} i_{s\alpha}) \quad (\text{II-9})$$

Cet estimateur du flux et du couple nécessite la connaissance préalable des composantes du courant statorique et celles de la tension. Il est retenu dans le cas d'une commande non linéaire appliquée au MAS en particulier et surtout la commande par DTC [CC00].

## II.5 DESCRIPTION DE LA STRUCTURE DE CONTROLE

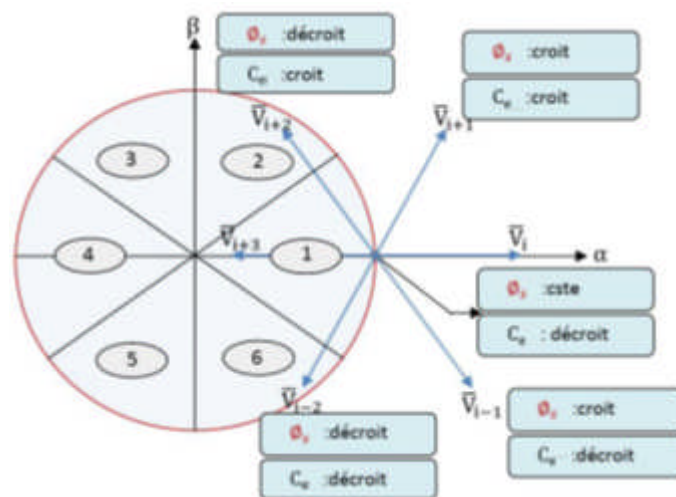
La DTC s'appuie essentiellement sur la sélection des états des interrupteurs de l'onduleur d'alimentation en utilisant une certaine condition sur les écarts de couple et de flux à leurs références.

**II.5.1 SELECTION DE VECTEUR DE TENSION**

Une sélection appropriée du vecteur tension  $V_s$  par  $(V_a, V_b, V_c)$  permet de déplacer le vecteur flux  $\phi_s$  de manière à maintenir son amplitude constante. Le choix de  $V_s$  dépend alors de la variation souhaitée pour le module du flux statorique  $\phi_s$  du sens de rotation de  $\phi_s$ , mais également de l'évolution souhaitée pour le couple [AR20].

Ainsi, nous pouvons délimiter l'espace d'évolution de  $\phi_s$  dans le référentiel (S) en le décomposant en six zones N=i, avec  $i = [1,19]$ , déterminées à partir des composantes du flux dans le plan  $(\alpha, \beta)$  comme indiqué sur la figure (II.3).

- Si  $V_{i+1}$  est sélectionné alors  $\Phi_s$  croît et  $C_e$  croît ;
- Si  $V_{i-1}$  est sélectionné alors  $\Phi_s$  croît et  $C_e$  décroît ;
- Si  $V_{i+2}$  est sélectionné alors  $\Phi_s$  décroît et  $C_e$  croît ;
- Si  $V_{i-2}$  est sélectionné alors  $\Phi_s$  décroît et  $C_e$  décroît ;



**Figure II.4.** Choix du vecteur-tension

**II.6. COMPAREUR A HYSTERESIS A TROIS NIVEAUX**

Le comparateur de couple a pour but de maintenir le couple dans sa bande d'hystérésis et d'imposer ainsi l'amplitude des ondulations du couple .Pour mieux contrôler le couple dans les quatre quadrants de fonctionnement sans intervention sur la structure ; Takahashi a proposé un correcteur à hystérésis à trois niveaux :

Ce comparateur permet de commander le moteur dans les deux sens de rotation avec un couple positif ou négatif

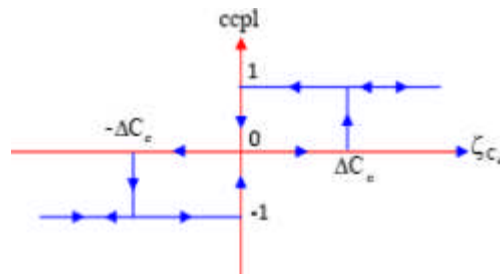


Figure II.5. Comparateur de couple à hystérésis utilisant trois niveaux

### II.7. TOPOLOGIE NPC D'UN ONDULEUR NPC A TROIS NIVEAUX

Cette structure est pratiquement, utilisée pour un onduleur à trois niveaux. Le nombre des interrupteurs dans ce cas est le double de celui d'un onduleur à deux niveaux, c'est à dire 12 interrupteurs, soit quatre interrupteurs par bras. La figure (II.5), illustre un bras d'un onduleur de types NPC (Neutral Point Clamped), à trois niveaux.

La combinaison des états des différents interrupteurs est de  $3^3$ , soit 27 états. Ces configurations correspondent à 19 états dont 16 sont actifs, les trois restant sont des séquences nulles. La (figure II.6), montre l'ensemble des vecteurs tensions délivrés par l'onduleur à trois niveaux dans le plan  $(\alpha, \beta)$ , [CC00]

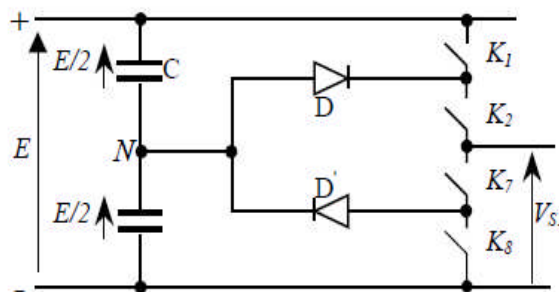


Figure II.6. Bras d'un onduleur à trois niveaux de type NPC.

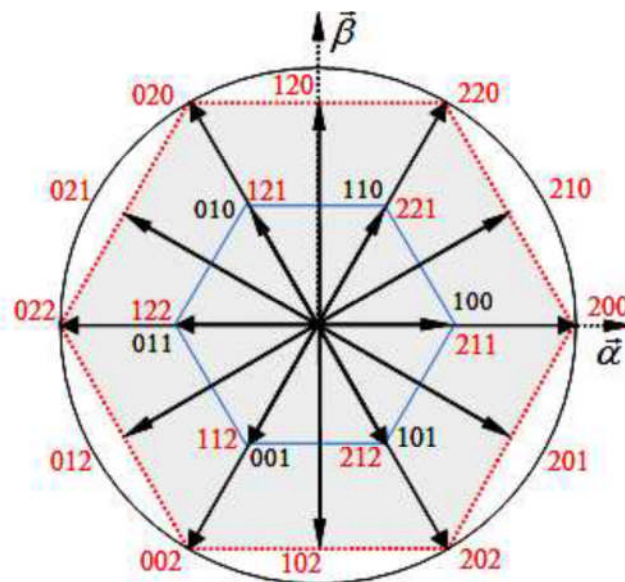
Les commutations se font par paire d'interrupteurs : (K1 K2), (K2 K7) et (K7 K8), selon le tableau suivant :

Commutations				Tension de sortie
$K_1$	$K_2$	$K_7$	$K_8$	
ON	ON	OFF	OFF	+ E/2
OFF	ON	ON	OFF	0
OFF	OFF	ON	ON	-E/2

Tableau II.1. Etat de commutation d'un NPC3N

La figure (II.6), représente les états des interrupteurs et les vecteurs des tensions délivrées par un onduleur de type NPC à trois niveaux. Le code de chaque vecteur de tension indique les états des trois demi-bras en haut de l'onduleur. Ainsi le vecteur 210 par exemple indique que :

- Les deux interrupteurs du 1<sup>er</sup> demi-bras en haut ( $K_1$  et  $K_2$ ) sont fermés, (code 2).
- Les deux interrupteurs du 2<sup>ème</sup> demi-bras en haut ( $K_3$  et  $K_4$ ) sont respectivement ouvert et fermé, (code 1)
- Les deux interrupteurs du 3<sup>ème</sup> demi-bras en haut ( $K_5$  et  $K_6$ ) sont ouverts, (code 0).



**Figure II.7.** Vecteurs de tension et états des interrupteurs correspondant d'un NPC3N

Comme on l'a déjà dit, l'utilisation de l'onduleur à trois niveaux pour alimenter le MAS, sert à minimiser les ondulations du couple électromagnétique en présentant plus de vecteurs de tension à sa sortie.

La configuration des différentes tensions du NPC3N peut être présentée comme l'indique le tableau suivant :

Combinaisons	000, 111, 222	200, 220, 020 022, 002, 202	210, 120, 021 012, 102, 201	211, 221, 121 022, 112, 212	100, 110, 010 011, 001, 101
Connexions					

**Tableau II.2.** Interconnexions possibles de la charge et de son alimentation.

## II.8. ELABORATION DE LA TABLE DE COMMUTATION

Le tableau II.3 présente le codage des séquences correspondant à chaque position du vecteur de flux et aux états des écarts de couple et de flux. Sachant que l'erreur entre le flux de référence et le flux estime, est introduite dans un comparateur a hystérésis à trois niveaux identique à celui

du couple (voir figure II.4), qui délivre (1) si cette erreur dépasse la limite inférieure, (0) si elle est dans la bande d'hystérésis et (-1) si elle dépasse la limite supérieure.

D'autre part, l'erreur entre le couple de référence et le couple estime, est introduite dans un comparateur à hystérésis à cinq niveaux (voir figure III.11). Ce dernier délivre (2) si cette erreur dépasse la Limite Supérieure Ordinaire (LSO), (1) si elle est entre cette limite et la Limite Supérieure Exceptionnelle (LSE) qui vaut 1% de LSO, (0) si elle est comprise dans la bande d'hystérésis limitée par LSE et -LSE, (-1) si elle est comprise entre -LSE et -LSO et finalement (-2) si elle est inférieure à -LSO.

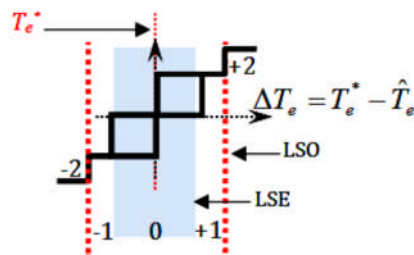


Figure II.8. Comparateur à hystérésis du couple électromagnétique.

$\Delta\phi_s$	1					0					-1				
$\Delta T_e$	2	1	0	-1	-2	2	1	0	-1	-2	2	1	0	-1	-2
S1	220	210	200	201	202	120	120	000	102	102	020	121	211	112	002
S2	020	120	220	210	200	021	021	000	201	201	022	122	221	212	202
S3	022	021	020	120	220	012	012	000	210	210	002	112	121	211	200
S4	002	012	022	021	020	102	102	000	120	120	202	212	122	221	220
S5	202	102	002	012	022	201	201	000	021	021	200	211	112	121	020
S6	200	201	202	102	002	210	210	000	012	012	220	221	212	122	022

Tableau II.3 : Table de vérité de la DTC à NPC3N

### II.10 STRUCTURE GENERALE DE LA DTC

La figure ci-dessous représente un schéma global de la commande par DTC conventionnelle sans régulateur de vitesse appliquée au MAS [BM14].

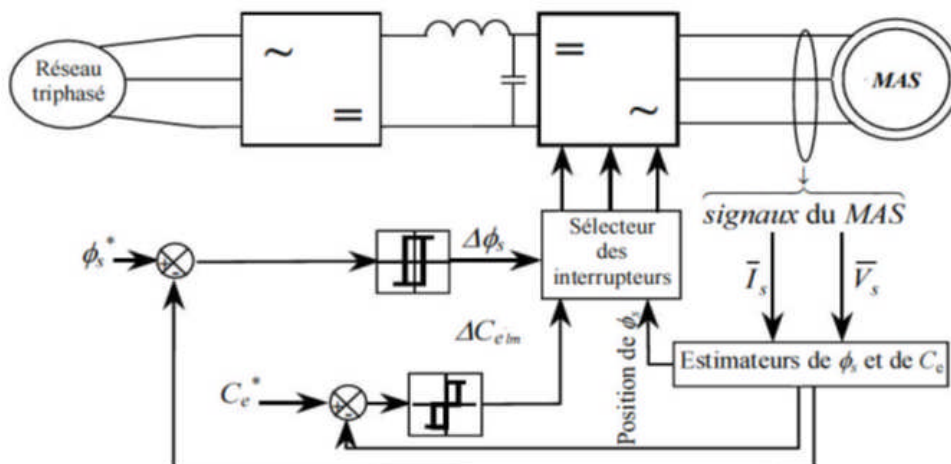


Figure II.9. Structure générale d'une DTC appliquée au MAS.

## II.11 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA DTC

### II.11.1 Les avantages

- La réponse dynamique du couple est très rapide.
- Il n'est pas nécessaire de faire la transformation des coordonnées, car les courants et les tensions sont dans un repère lié au stator.
- Utilise un modèle simplifié du moteur à induction. Il n'existe pas de bloc qui calcule la modulation de la tension (MLI).
- Il n'est pas nécessaire de faire un découplage des courants par rapport aux tensions de commande, comme dans le cas de la commande vectorielle.
- La réponse dynamique du couple est très rapide.
- Robustesse vis-à-vis des variations paramétriques.

### II.11.2 Les inconvénients

- L'existence de problèmes à basse vitesse (influence du terme résistif).
- La nécessité de disposer des estimations de flux statorique et du couple.
- L'existence des oscillations de couple.
- La fréquence de commutation n'est pas constante (utilisation des régulateurs à hystérésis), ce qui conduit à un contenu riche en harmoniques qui fait augmenter les pertes et amène à des bruits acoustiques et des oscillations de couple pouvant exciter des résonances mécaniques.

## II.12. CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre la technique de commande DTC et son implantation. L'ensemble des lois, réagissant cette commande, a été expliqué. La structure des comparateurs à hystérésis utilisés a été détaillée et enfin l'onduleur NPC à trois niveaux a été présenté dans le but de remplacer l'onduleur à deux niveaux pour alimenter le MAS et réduire ainsi les ondulations du couple et du flux. Dans ce qui suit on présentera les réseaux de neurones afin de les utiliser à la place des blocs conventionnels et réduire ainsi le volume de fichier de simulation.

## **Chapitre III: Table de sélection neuronale**

### III.1 INTRODUCTION

Les réseaux de neurones artificiels, nés il y a environ une cinquantaine d'années, sont toujours en cours de développement. Cet axe de recherche a attiré l'attention de beaucoup de chercheurs de différentes disciplines. Ces réseaux de neurones artificiels sont issus de la combinaison entre la neurobiologie comme idée de base, la physique comme champs d'application et les mathématiques et l'informatique autant que moyens de réalisation. [OD15], [BS13], [ZH09]. Dans ce chapitre nous visons à concevoir des blocs à base des réseaux neuronaux pour remplacer la table de sélection des tensions et les comparateurs à hystérésis.

### III.2 HISTORIQUE

1943 : Mc Culloch et Pitts présentent le premier neurone formel.

1949 : Hebb propose un mécanisme d'apprentissage.

1958 : Rosenblatt présente le premier réseau de neurones artificiels : le Perceptron. Il est inspiré du système visuel, et possède deux couches de neurones : perceptive et décisionnelle. Dans la même période, le modèle de l'Adaline (Adaptive Linear Element) est présenté par Widrow Ce sera le modèle de base des réseaux multicouches.

1969 : Minsky et Papert publient une critique des perceptrons en montrant leurs limites, ce qui va faire diminuer la recherche sur le sujet.

1972 : Kohonen présente ses travaux sur les mémoires associatives.

1982 : Hopfield démontre l'intérêt d'utiliser les réseaux récurrents pour la compréhension et la modélisation des fonctions de mémorisation.

1986 : Rumelhart popularise l'algorithme de rétro propagation du gradient, conçu par Werbos, qui permet d'entraîner les couches cachées des réseaux multicouches Les réseaux neuronaux ont été depuis été beaucoup étudiés, et ont trouvé énormément d'applications [AM07].

### III.3 GENERALITES

Le principe des réseaux de neurones artificiels (Artificiel Neural Network ANN) est né dans les années 40 à partir d'une analogie avec le système nerveux humain. Les premiers travaux datent de 1943 et sont l'œuvre de W. S. McCulloch et W. 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 neurones interconnectés. 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 [SC09].

### III.4. DEFINITIONS

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. Toute structure hiérarchique de réseaux est évidemment un réseau.

### III.5. CREATION DE LA TABLE DE SELECTION NEURONALE

Les étapes pour créer le réseau neuronal qui va remplacer la table de vérité conventionnelle :

Déclaration de la matrice d'entrée et celle de sortie (cible)

- ✓ Créer une matrice composée de trois entrées, la première entrée est l'erreur de flux et la deuxième entrée est l'erreur de couple et la troisième entrée est la position du vecteur flux.

**Ent**=[1 2 1;1 2 2;1 2 3;1 2 4;1 2 5;1 2 6;1 1 1;1 1 2;1 1 3;1 1 4;1 1 5;1 1 6;1 0 1;1 0 2;1 0 3;1 0 4;1 0 5;1 0 6;1 -1 1;1 -1 2;1 -1 3;1 -1 4;1 -1 5;1 -1 6; 1 -2 1;1 -2 2;1 -2 3;1 -2 4;1 -2 5;1 -2 6; 0 2 1;0 2 2;0 2 3;0 2 4;0 2 5;0 2 6; 0 -2 1;0 -2 2;0 -2 3;0 -2 4;0 -2 5;0 -2 6; -1 2 1;-1 2 2;-1 2 3;-1 2 4;-1 2 5;-1 2 6; -1 1 1;-1 1 2;-1 1 3;-1 1 4;-1 1 5;-1 1 6; -1 0 1;-1 0 2;-1 0 3;-1 0 4;-1 0 5;-1 0 6; -1 -1 1;-1 -1 2;-1 -1 3;-1 -1 4;-1 -1 5;-1 -1 6; -1 -2 1;-1 -2 2;-1 -2 3;-1 -2 4;-1 -2 5;-1 -2 6]'

- ✓ La deuxième matrice représente les états des interrupteurs de l'onduleur

**Sor**=[2 2 0;0 2 0;0 2 2;0 0 2;2 0 2;2 0 0; 2 1 0;1 2 0;0 2 1;0 1 2;1 0 2;2 0 1; 2 0 0;2 2 0;0 2 0;0 2 2;0 0 2;1 2 0;0 2 1;0 1 2;1 0 2;2 0 1;2 1 0;1 0 2;2 0 1;2 1 0;1 2 0;0 2 1;0 1 2;0 2 0;0 2 2;0 0 2;2 0 0;2 0 0;2 0 2;2 0 0;2 0 1;2 1 0;1 0 2;2 0 1;2 1 0;1 2 0;1 2 2;1 1 2;2 1 2;2 1 1;2 2 1;1 2 1;0 1 2;1 0 2;2 0 1;2 1 0;1 2 0;0 2 1;0 0 2;2 0 2;2 0 0;2 2 0;0 2 0;0 2 2]'

- ✓ Sauvegarder **Ent** et **Sor** dans un fichier scripte et l'exécuter pour les charger en mémoire.
- ✓ Lancer NNTOOL dans l'espace de travail de Matlab en tapant NNTOOL (Figure III.1)
- ✓ Emporter les deux vecteurs : **Ent** comme input Data et **Sor** comme Target Data (Figure III.2)

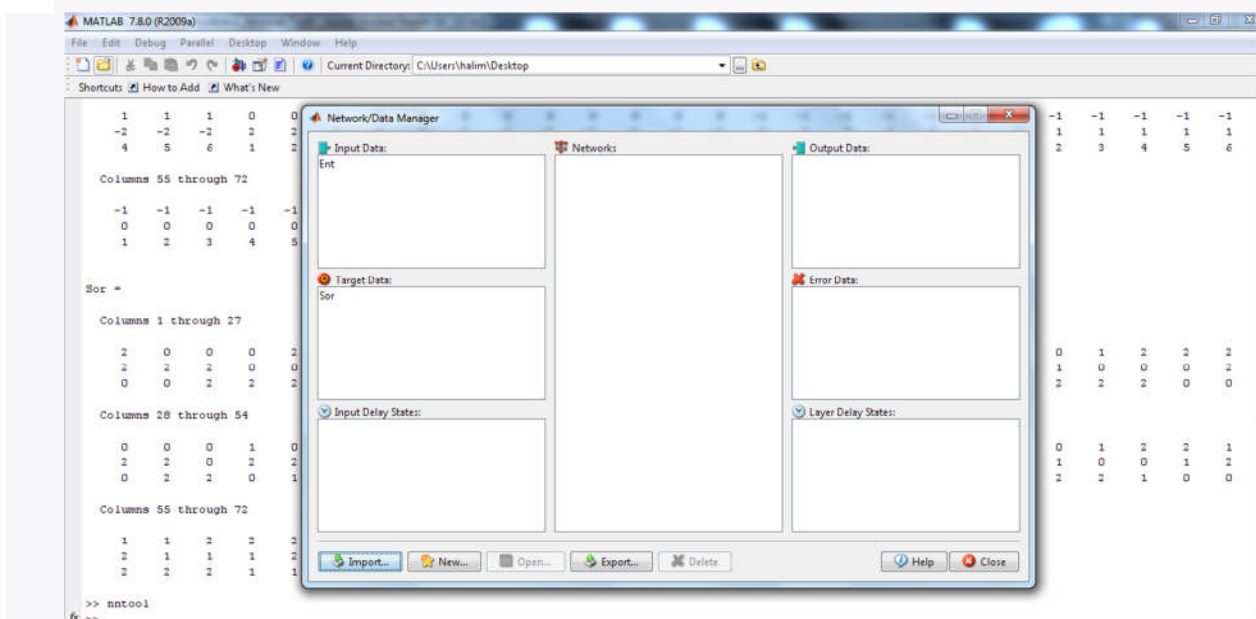


Figure III.1. NNTOOL pour créer la TVN sous Matlab.

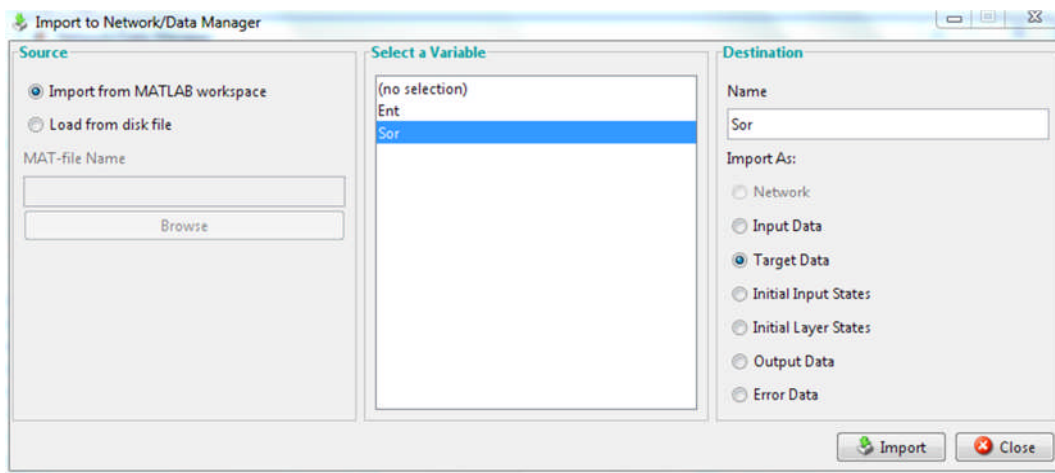
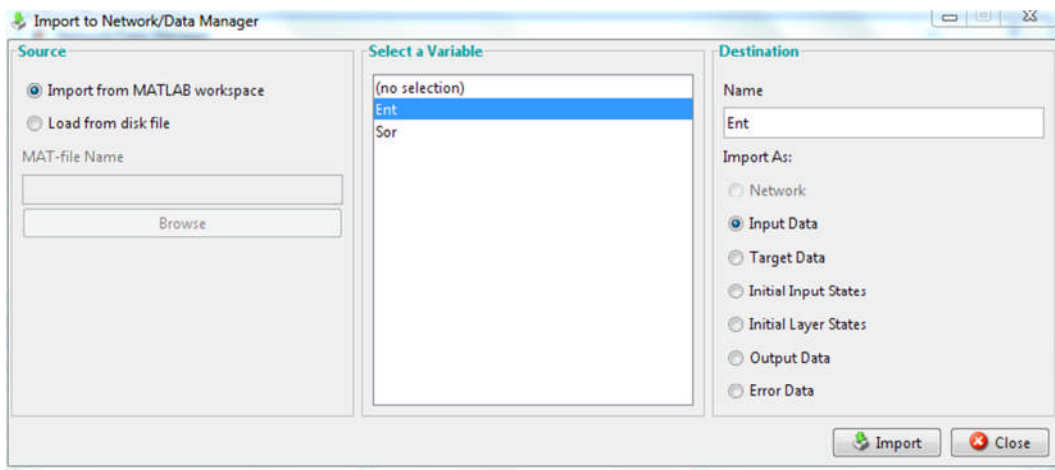


Figure III.2. Imports du Input data **Ent** et Target data **Sor**.

- ✓ Créer un nouveau réseau et le nommé **net** par exemple et sélectionner le type de réseau neuronal **Generalized regression** et sélectionner Input data (**Ent**) et Target data (**Sor**)

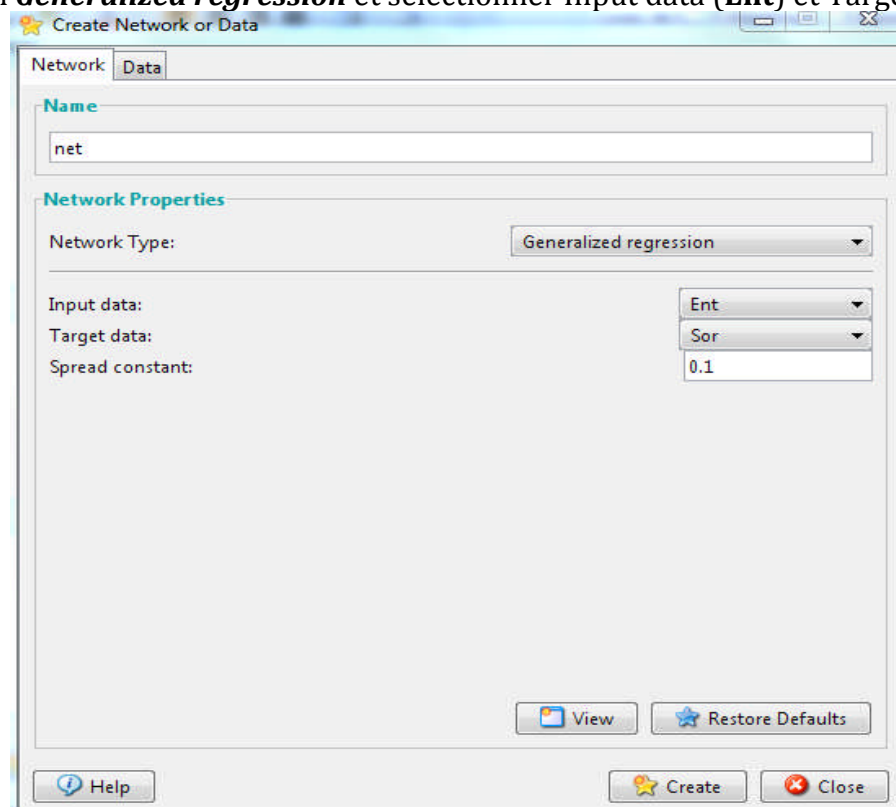
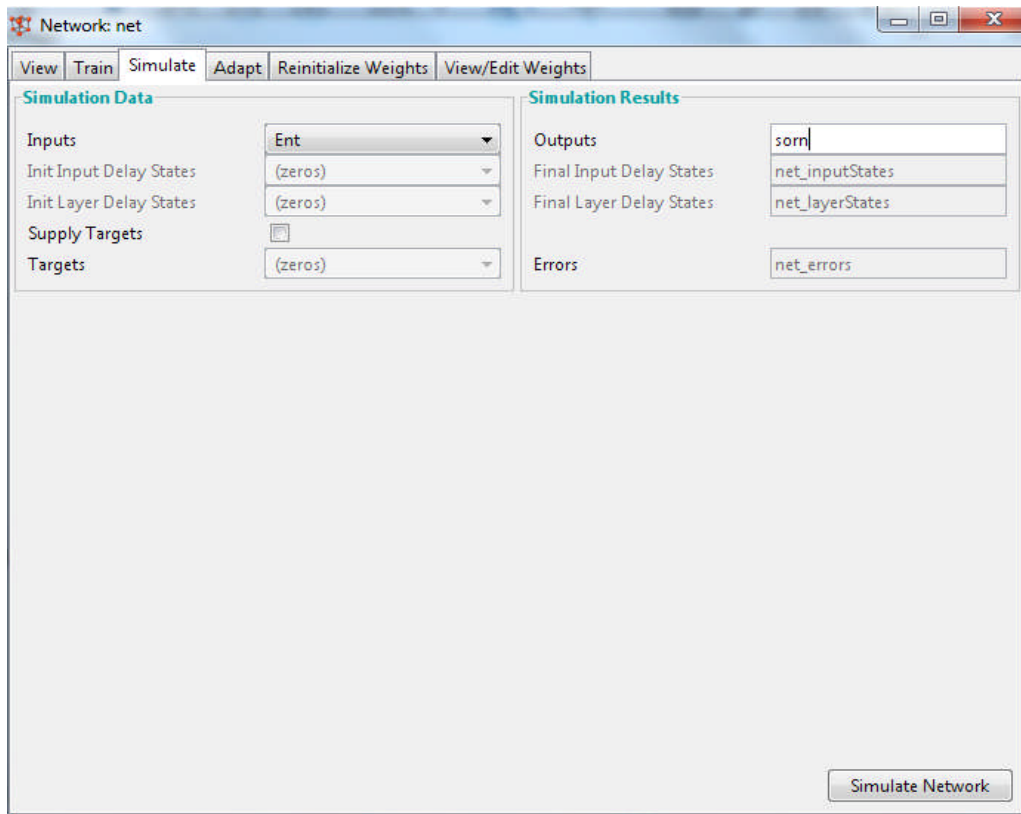


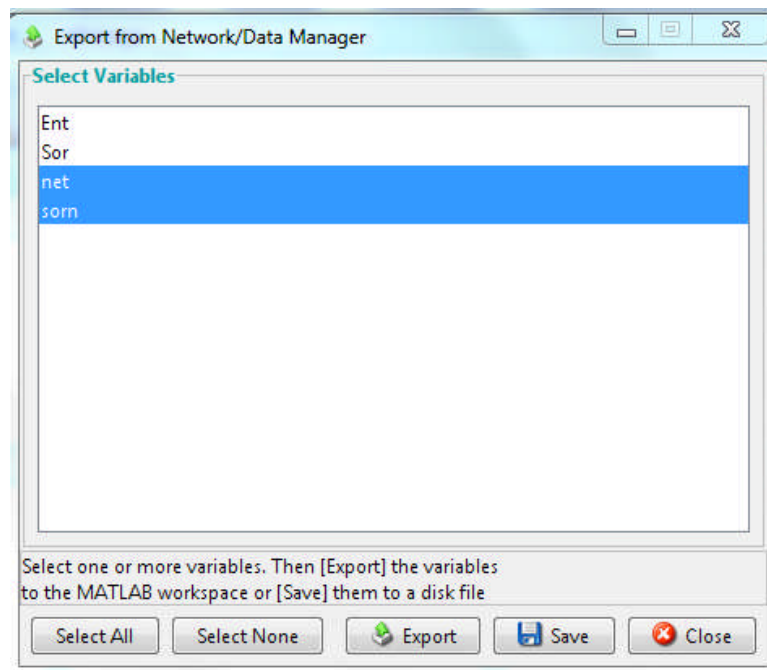
Figure III.3. Paramètres de **net** créé.

- ✓ Appuyer sur le bouton **create**, pour compléter le travail entre dans **net** pour charger input par **Ent** et Appuyer sur le bouton **simulate network** comme le montre la Figure III.5.



**Figure III.4.** Phase d'apprentissage.

Une fois la simulation est faite on export le résultat pour le comparer à la cible qui est la matrice **Sor**. Lorsque les deux matrice sont identique ou au moins proche d'une façon acceptable on peut dire que le réseau créé est validé et prêt à l'utilisation.



**Figure III.5.** Export des variables **net** et **sorn** dans l'espace de travail.

- ✓ Ensuite on crée sa boîte de Simulink en tapant dans l'espace de travail: **gensim (net,-1)** :

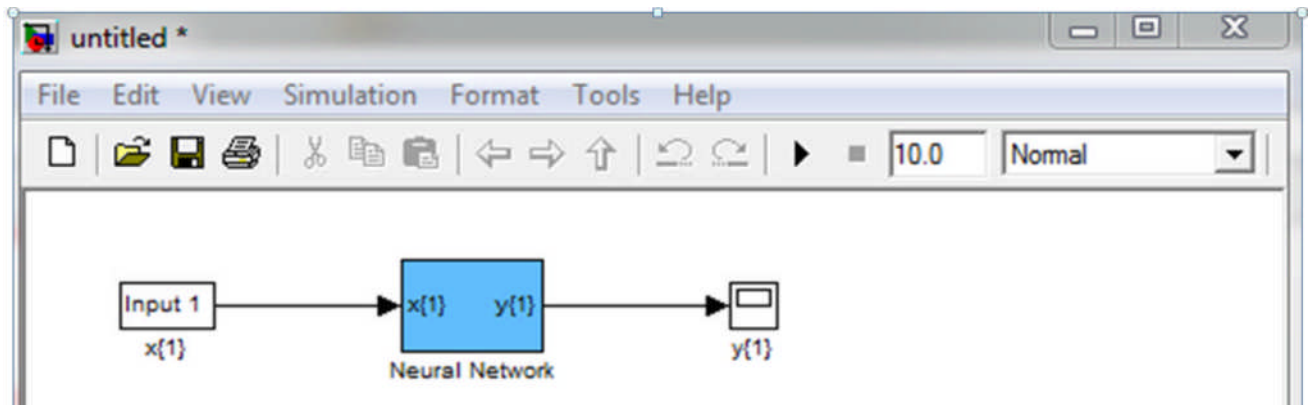


Figure III.6. Bloc RNA créé.

- ✓ Le bloc en bleu est prêt à l'emploi et peut remplacer la table de vérité conventionnelle comme la montre la figure ci-dessous :

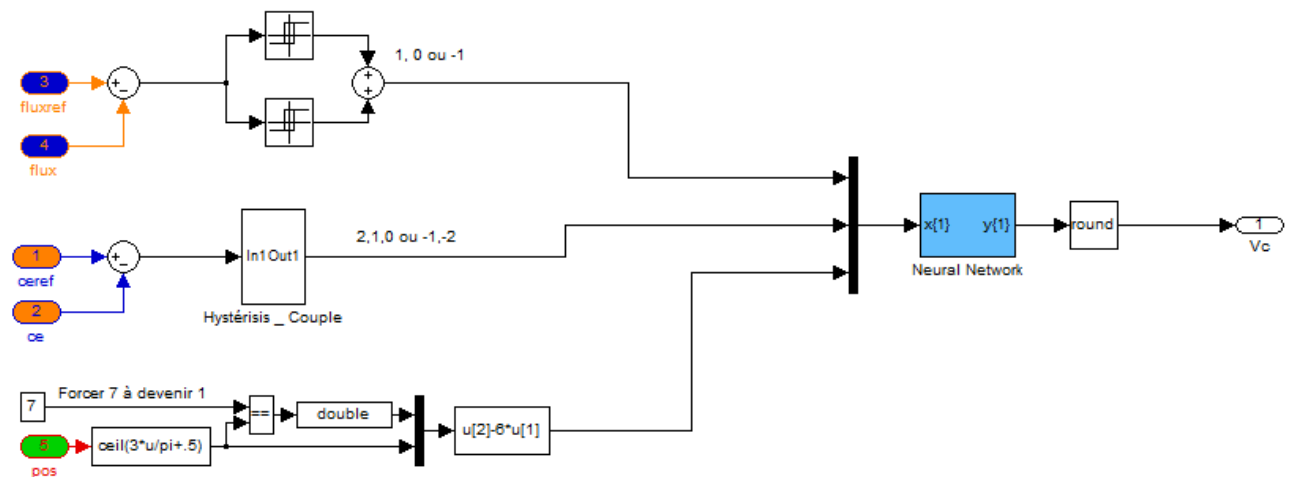


Figure III.7. Schéma blocs de la TVN créé.

### III.6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté une méthode pour créer un bloc neuronal identique dans son fonctionnement à la table de sélection conventionnelle de la DTC. Ce bloc neuronal est validé par comparaison de sa sortie avec les états des interrupteurs obtenus à la sortie de la table conventionnelle. Dans ce qui suit, on va créer un autre bloc neuronal qui va remplacer les comparateurs à hystérésis et nous présenterons les résultats de simulation.

## **Chapitre IV : Etude Comparative entre DTC et DTCN**



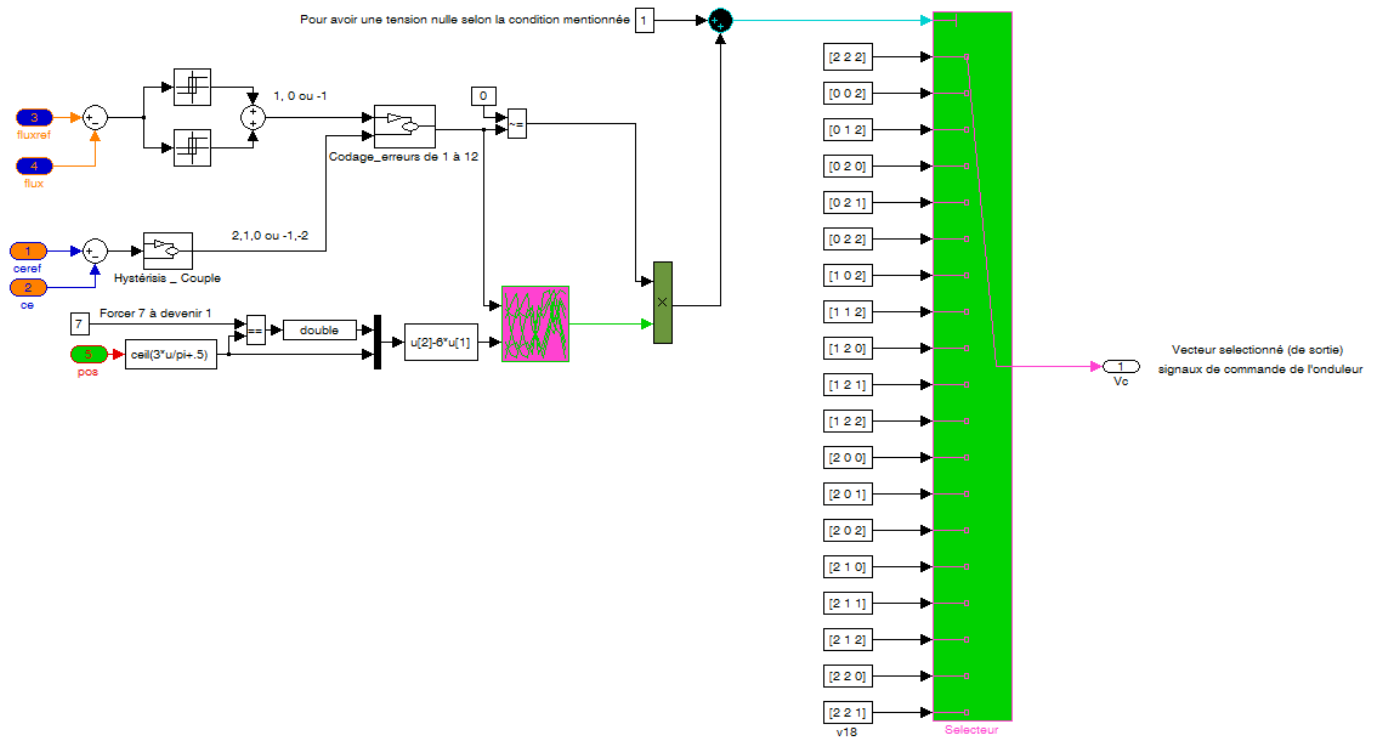


Figure IV.2. Bloc de la table de vérité avec normalisation des écarts de flux et du couple par comparateurs à hystérésis.

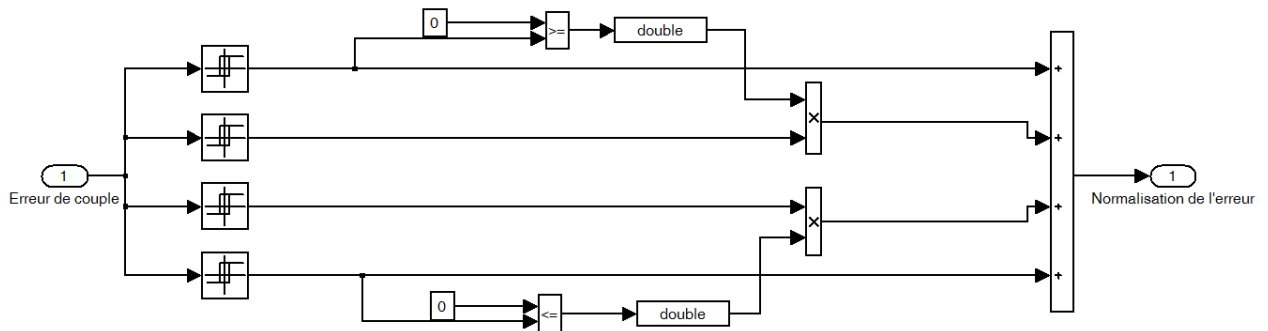


Figure IV.3. Bloc Hystérésis de Couple.

Les étapes pour créer le réseau neuronal qui remplace les deux comparateurs à hystérésis du couple et du flux de la DTC conventionnelle sont comme suit :

- Représenter le vecteur **ent** comme (erreur de flux et erreur de couple) et **sor** comme (normalisation de l'erreur de flux et l'erreur couple) ;
- Exporter le vecteur **ent** et **sor** dans l'espace de travail de Matlab (figure IV.4);
- Calcul de transposé : **ent1= ent'** et **sor1=sor'** ;
- Lancer NNTOOL dans l'espace de travail de Matlab en tapant NNTOOL (figure IV.5);
- Emporter les deux vecteurs : **ent1** comme input Data et **sor1** comme Target Data (figure IV.6);

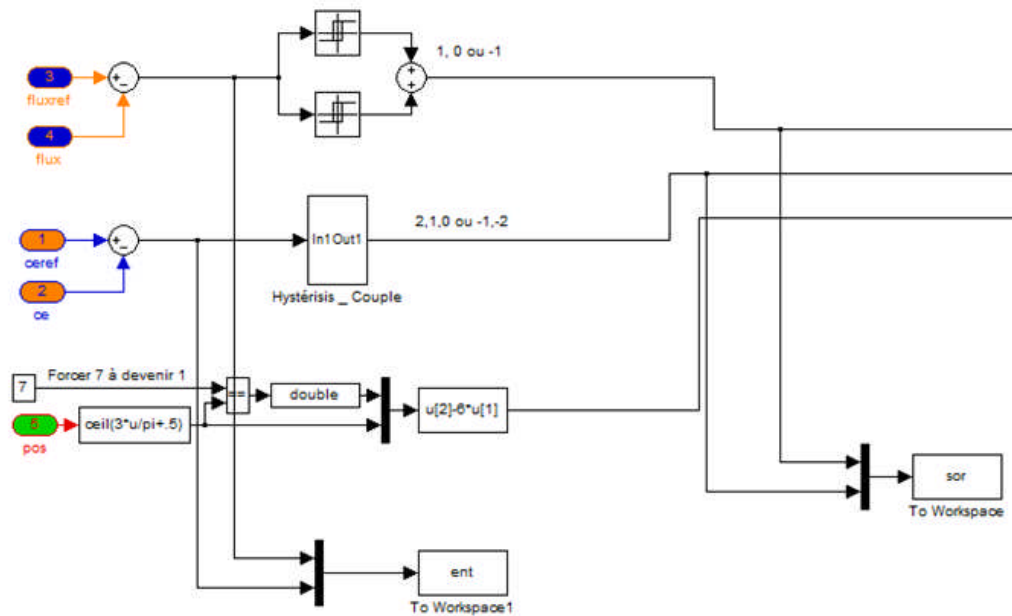


Figure IV.4. Sauvegarde des vecteurs pour l'apprentissage et la conception du CHN.

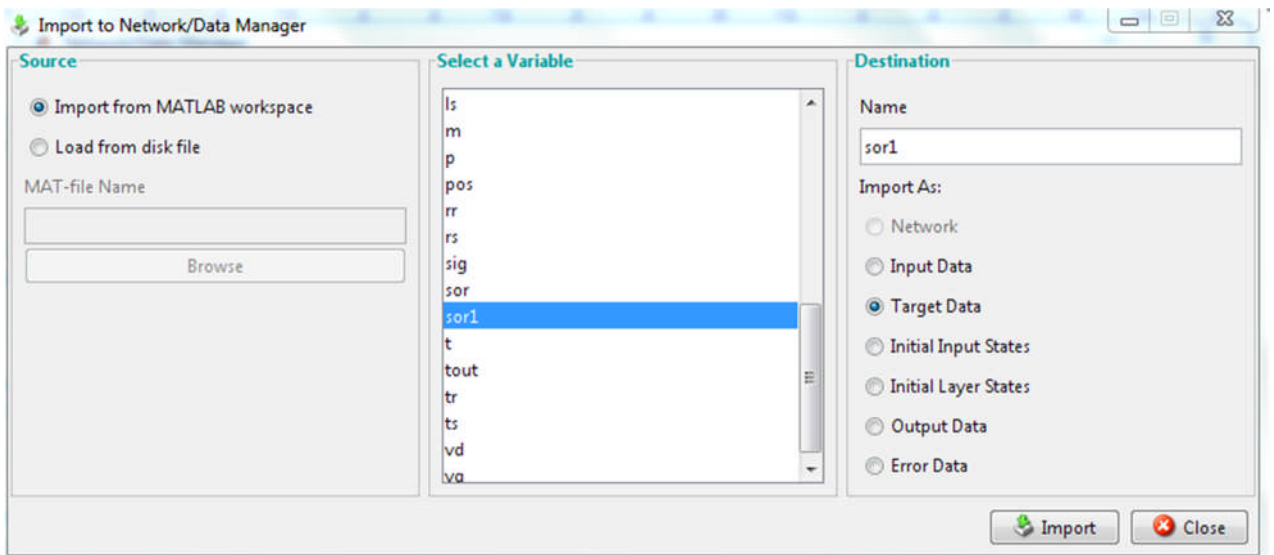
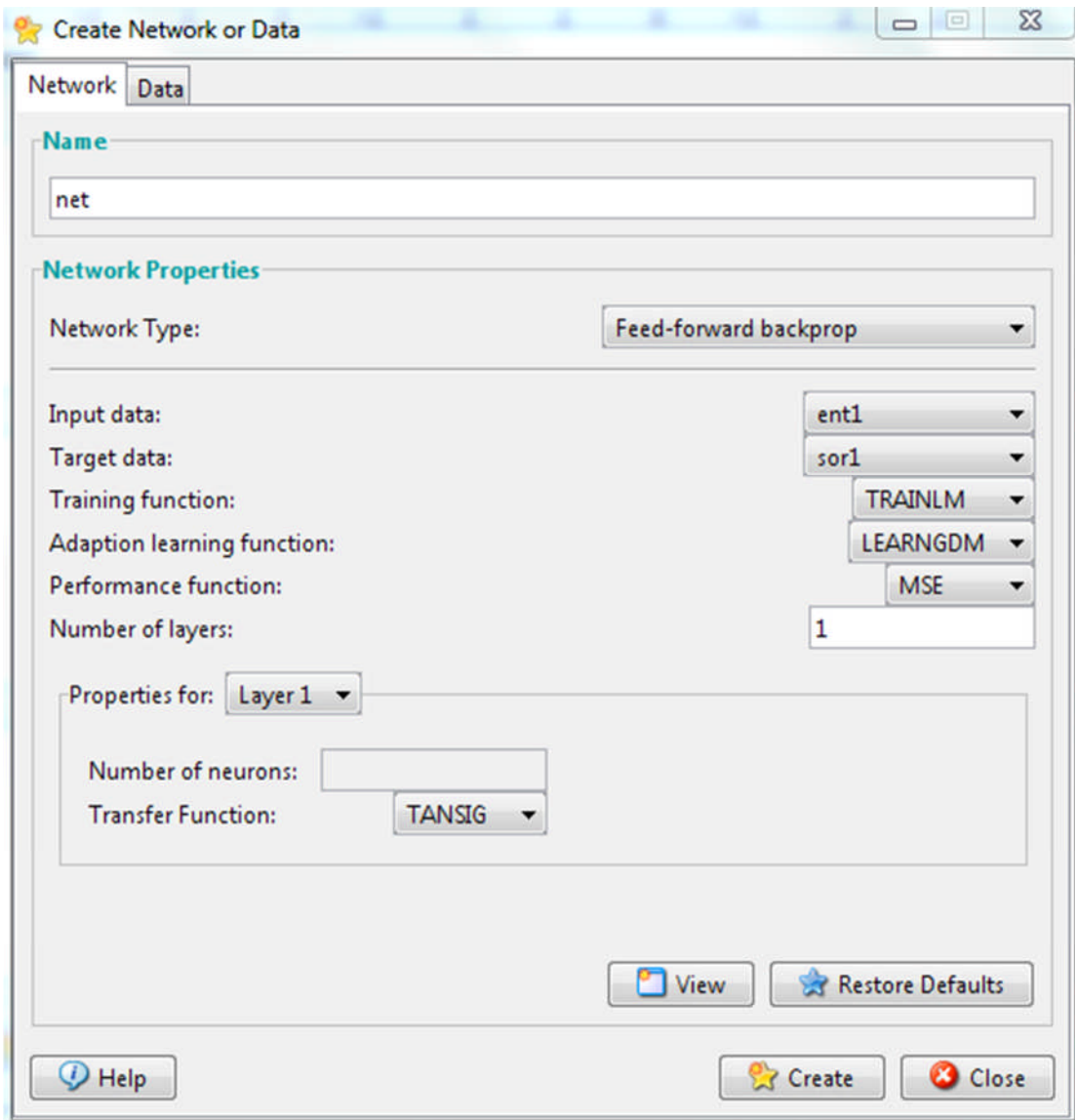


Figure IV.5. Imports du input data **ent1** et Target data **sor1**.

- Créer un nouveau réseau et le nommer **net** et sélectionner le type de réseau neuronal **Feed-forward backprop** qui est par défaut et sélectionner Input data (**ent1**) et Target data (**sor1**). On laisse toutes les cases par défaut et met une seule couche comme la montre la figure ci-dessous:



**Figure IV.6.** Paramètres de **net** créé.

- Appuyer sur le bouton **Create**, ensuite dans l'anglet **Train**, sélectionner l'entrée et nommer le vecteur de sortie network1-output puis appuyer sur **Train Network**, la figure ci-dessous indique la phase d'apprentissage :

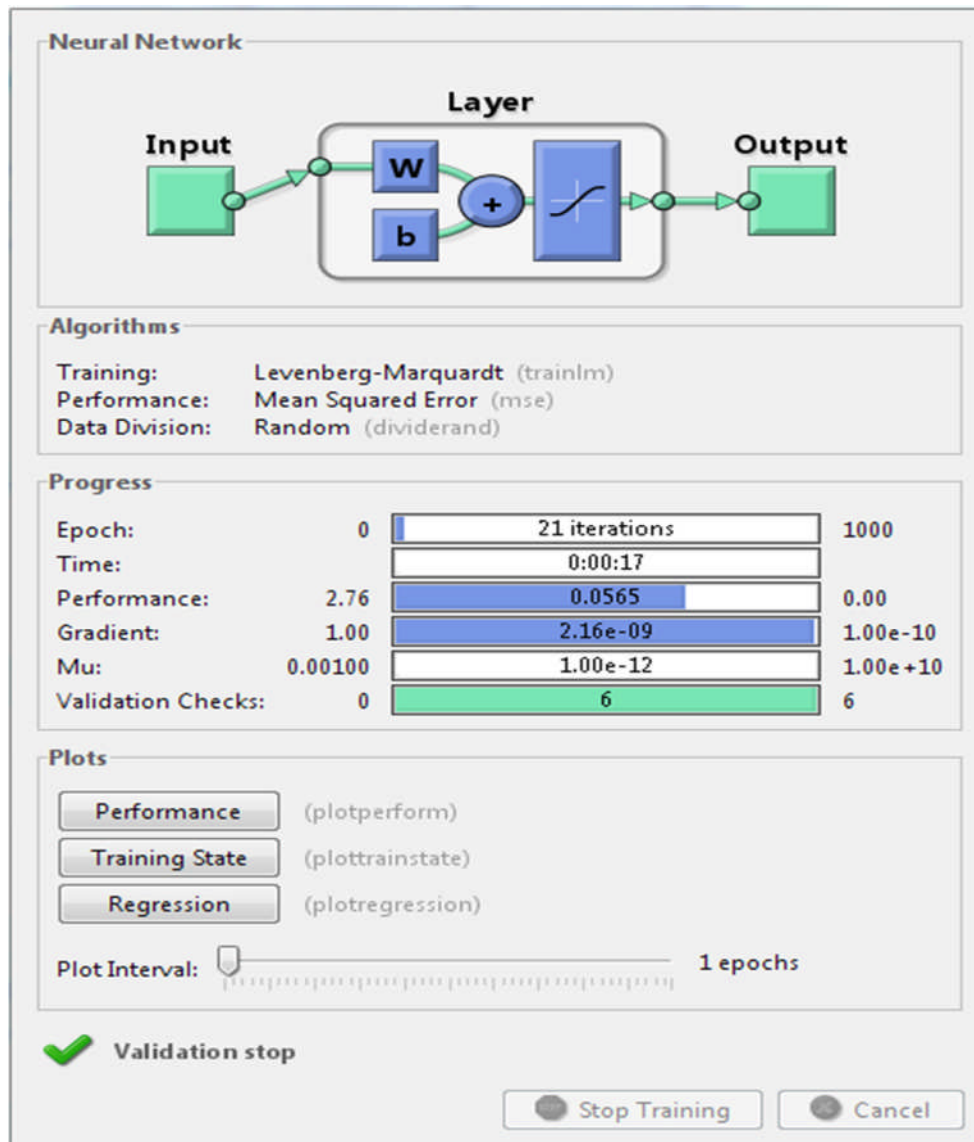


Figure IV.7. L'opération et l'évolution d'apprentissage.

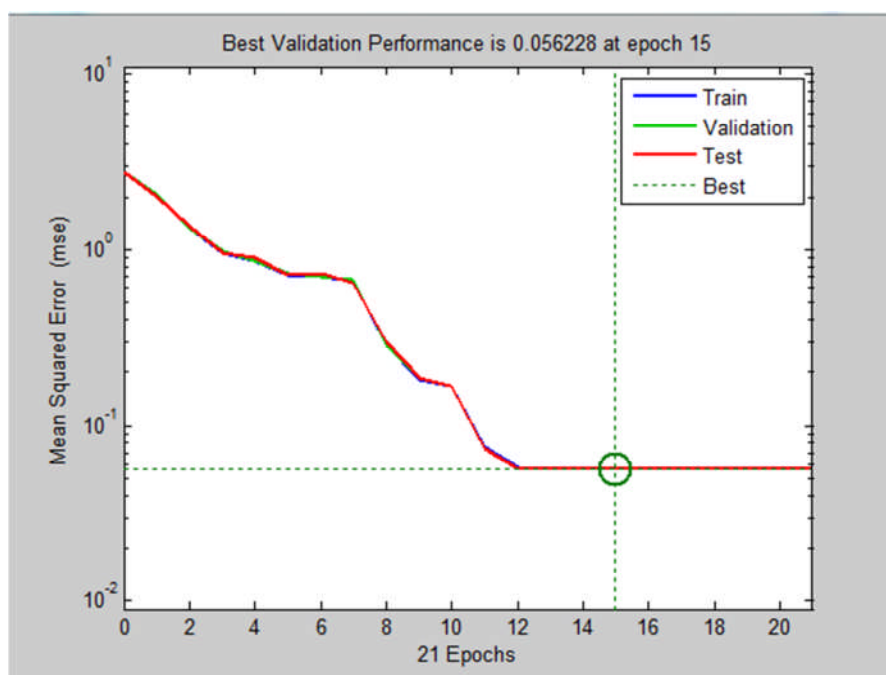
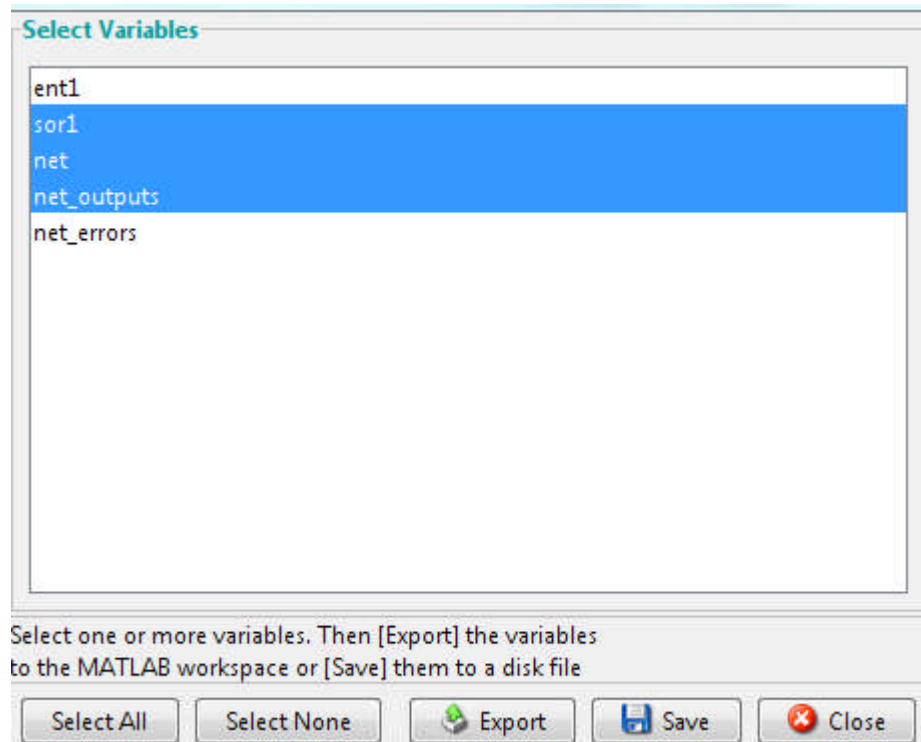


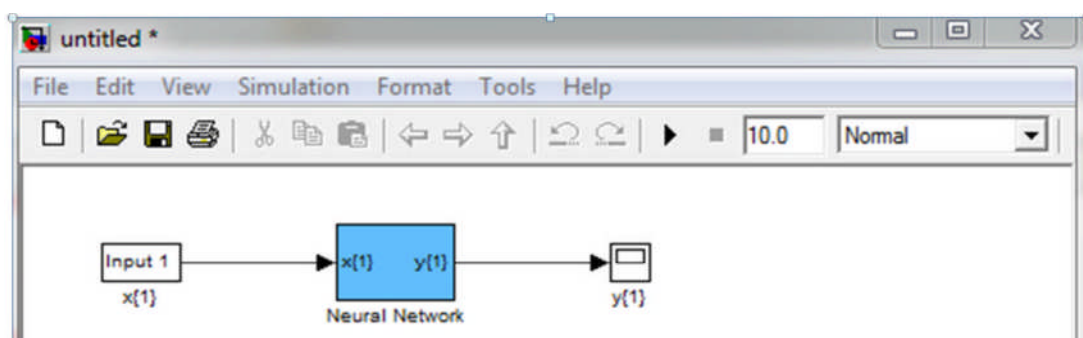
Figure IV.8. Convergence de la sortie de RNA vers sa cible (Target).

- Une fois la convergence est acceptable, appuyer sur **Export** pour vérifier la conformité de la sortie du réseau **net** output avec le vecteur cible **sor1**



**Figure IV.9.** Export des variables **sor1**, **net** et **network-outputs** dans l'espace de travail de Matlab.

- Dans l'espace de travail de Matlab, vérifier l'écart entre la cible et le vecteur de sortie Neuronal
- Ensuite créer sa boîte de Simulink en tapant : **gensim (net,-1)** dans l'espace de travail de Matlab.



**Figure IV.10.** Bloc RNA créé.

- Le bloc en bleu est prêt à l'emploi, les deux blocs de la figure ci-dessous sont les comparateurs à hystérésis et la table de vérité conventionnelle.

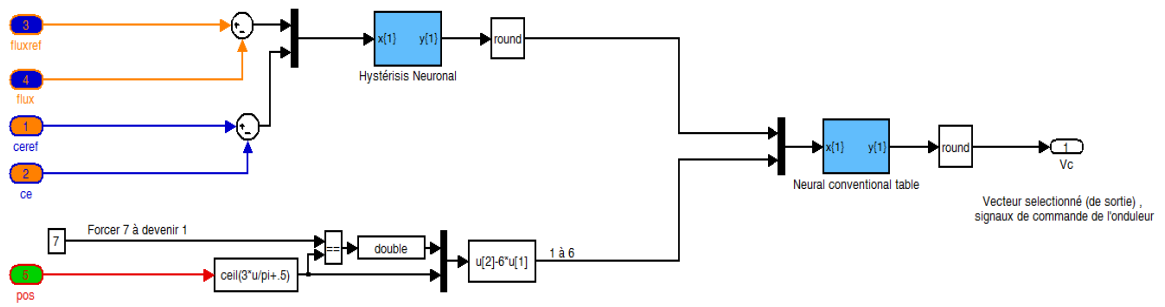


Figure IV.11. Schéma Bloc des CHN et TVN associés à la DTC.

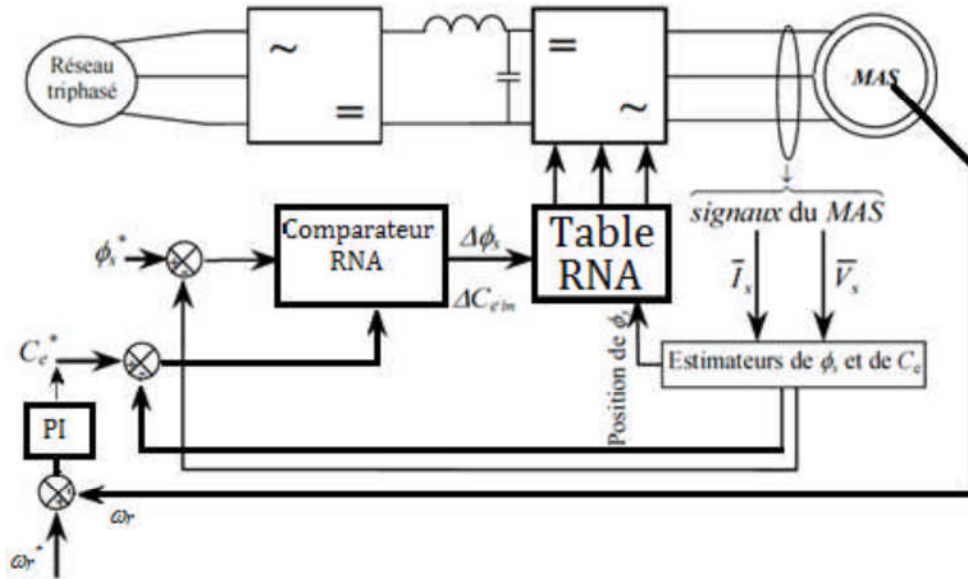


Figure IV.12. Schéma global de la DTC équipée par des blocs neuronaux [BM14].

### IV.3 RESULTATS DE SIMULATION

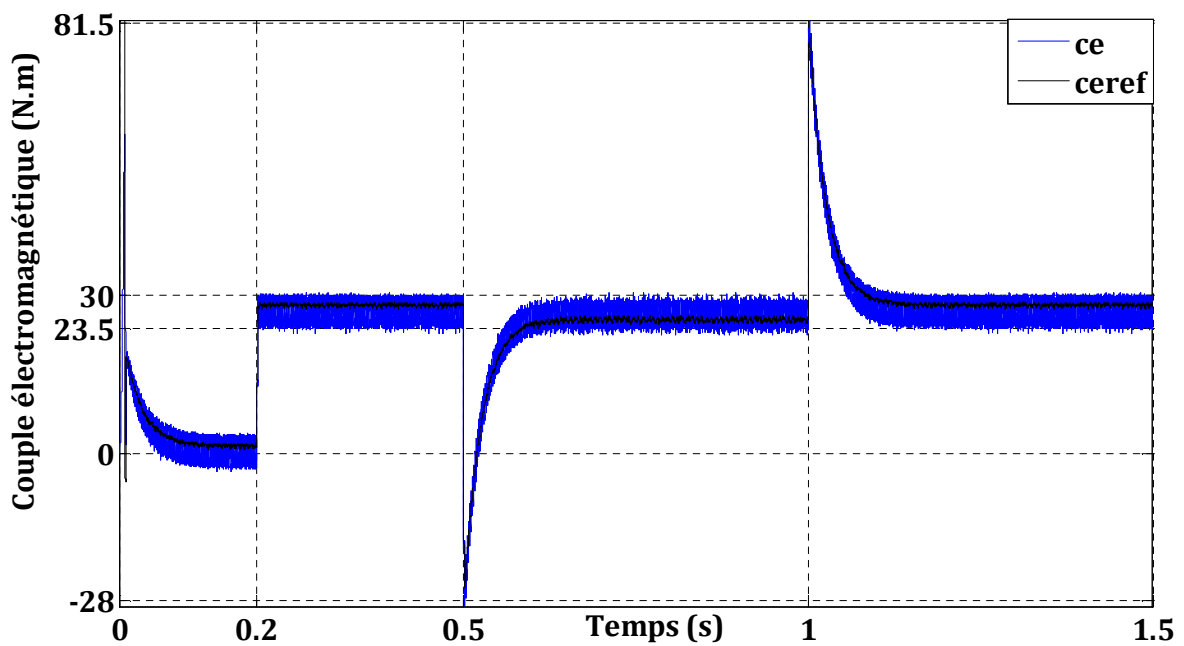


Figure IV.13.1 : Le couple électromagnétique pour une DTC.

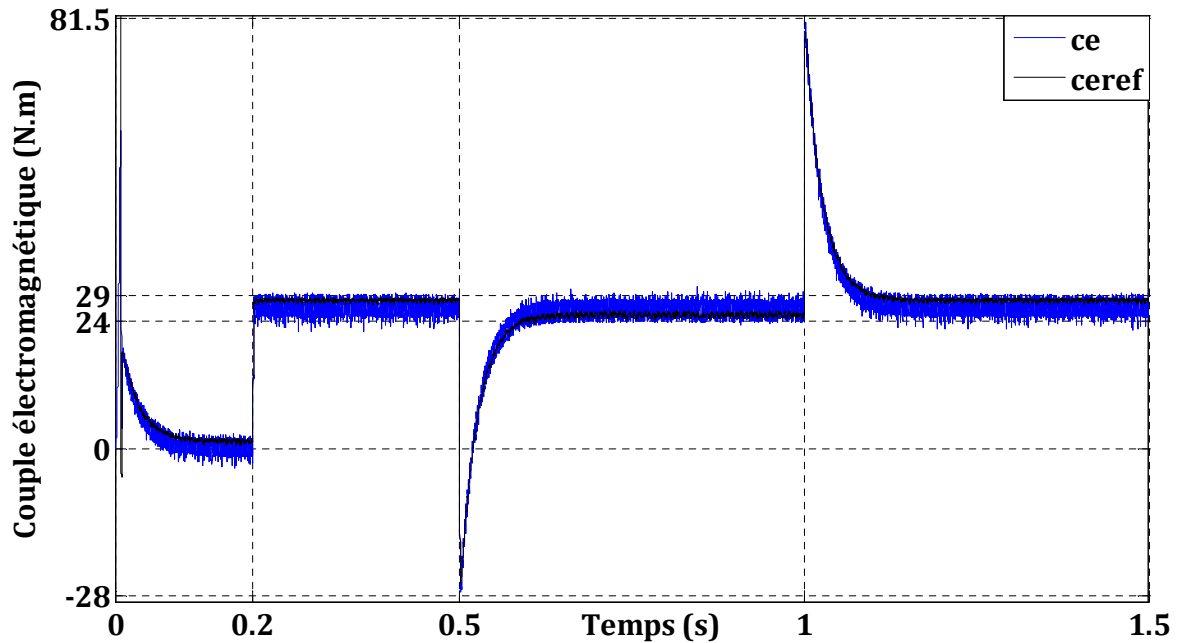


Figure IV.13.2. Le couple électromagnétique pour une DTCN.

Les résultats de la simulation des figures précédentes montrent que l'utilisation des blocs neuronaux n'affecte la DTC que dans le sens positif. En plus de la réduction de volume de fichier de simulation, nous pouvons constater une légère amélioration aux niveaux des ondulations. La cause probable de cette amélioration est le calcul fait par les RN associés.

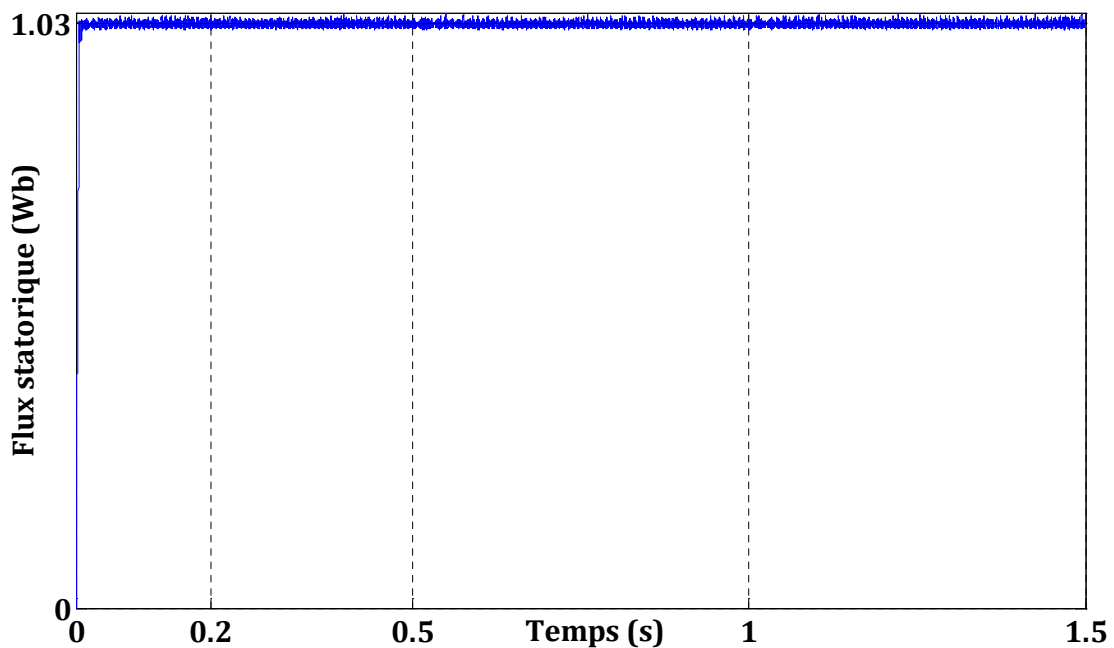


Figure IV.14.1. Le module de flux statorique pour une DTC.

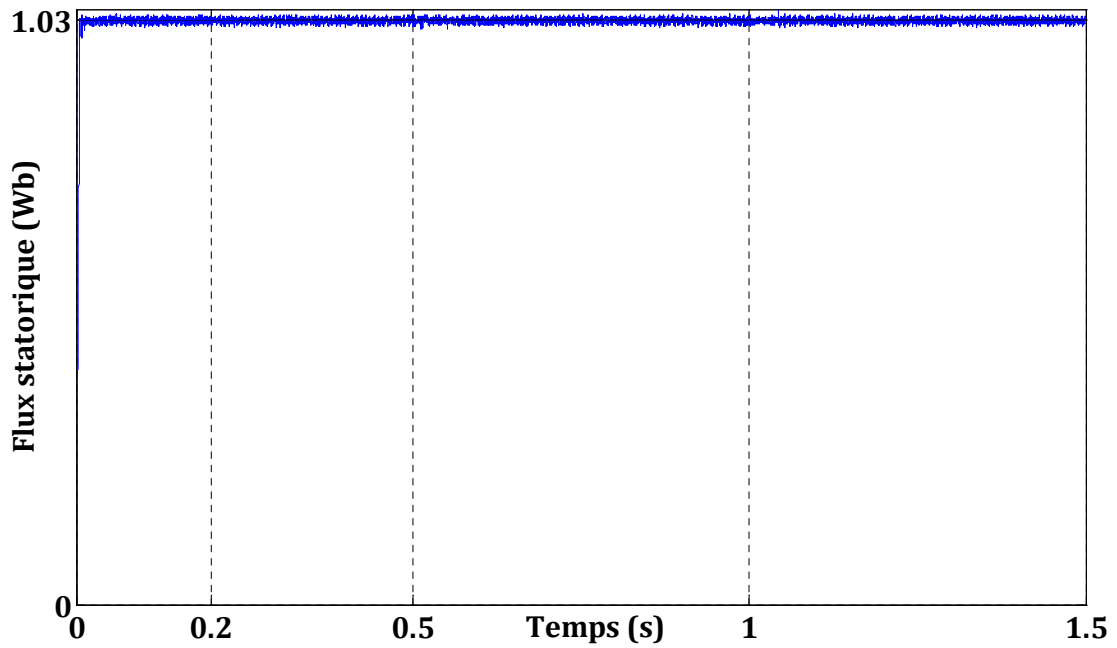


Figure IV.14.2. Le module de flux statorique pour une DTCN

La même remarque pour les résultats de flux statoriques concernant les ondulations, mais à noter aussi que le flux n'est pas affecté par la variation de la vitesse ou du couple ce qui justifié par le découplage entre ces grandeurs.

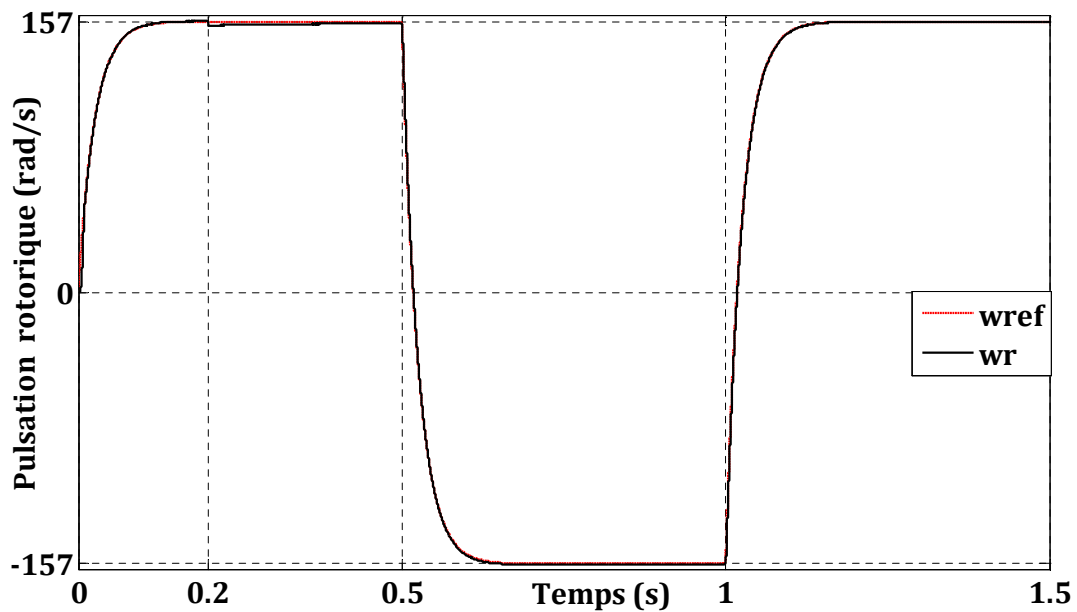
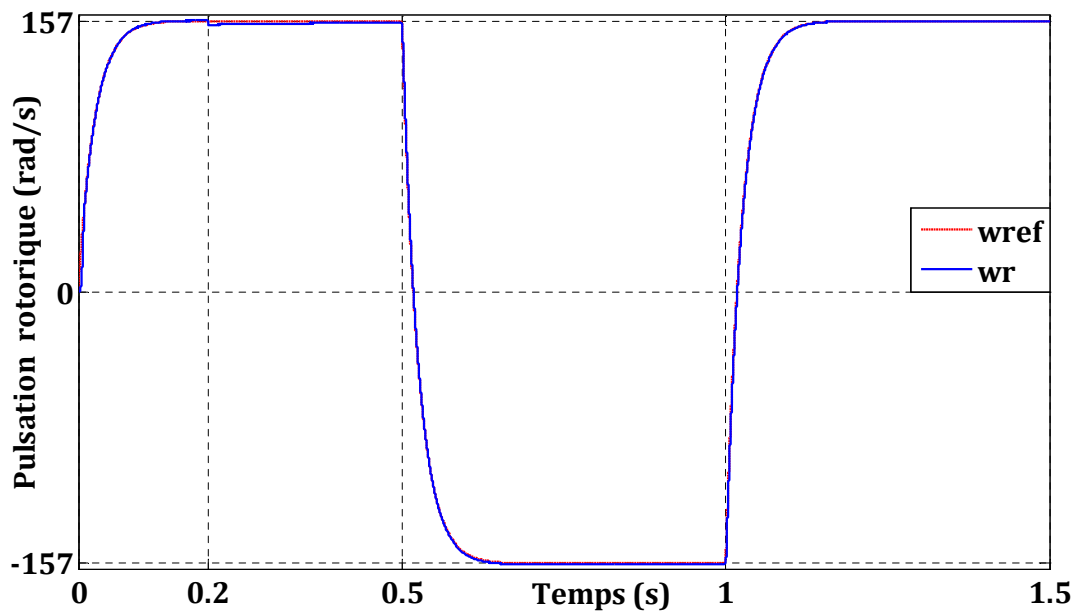


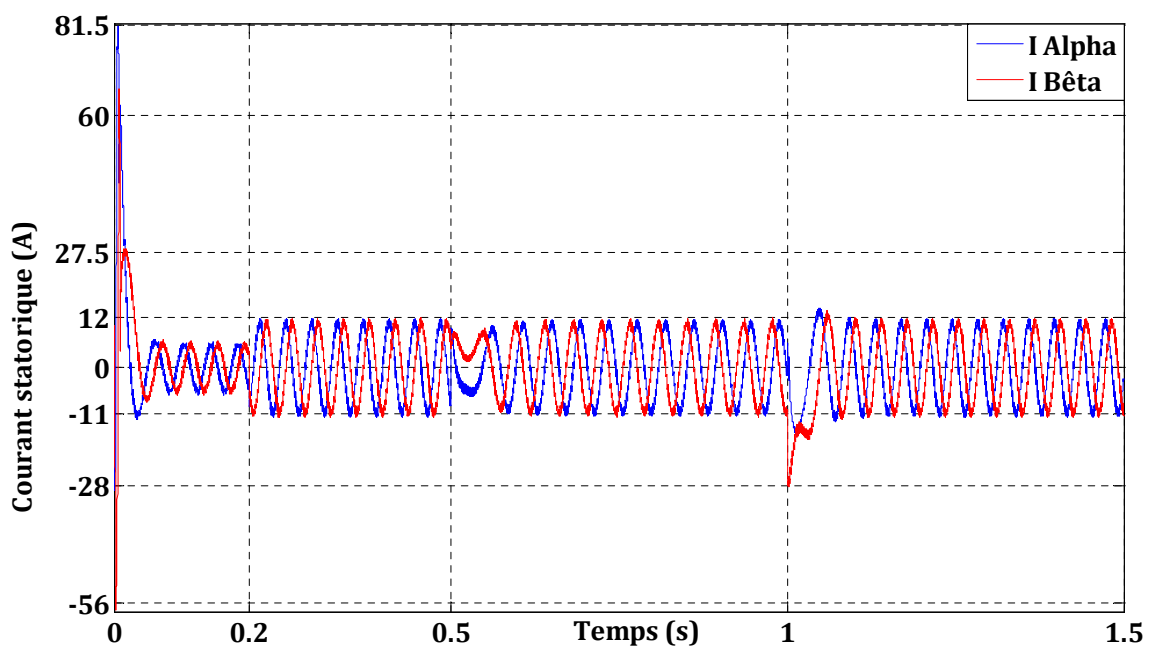
Figure IV.15.1. La vitesse de rotation pour une DTC.



**Figure IV.15.2.** La vitesse de rotation pour une DTCN.

Pour la dynamique du système que la plus part des applications s'intéresse, les allures nous montrent que les deux cas sont semblables. Avec une légère amélioration dans la DTCN. La vitesse suit sa référence adéquatement ce qui confirme le bon choix des gains du régulateur PI utilisé.

Nous pouvons remarquer aussi que la boucle de vitesse ne s'influe pas par le type de dispositif d'alimentation car la dynamique est essentiellement liée à l'actionneur entraîné .



**Figure IV.16.1.** Les courants absorbés pour une DTC.

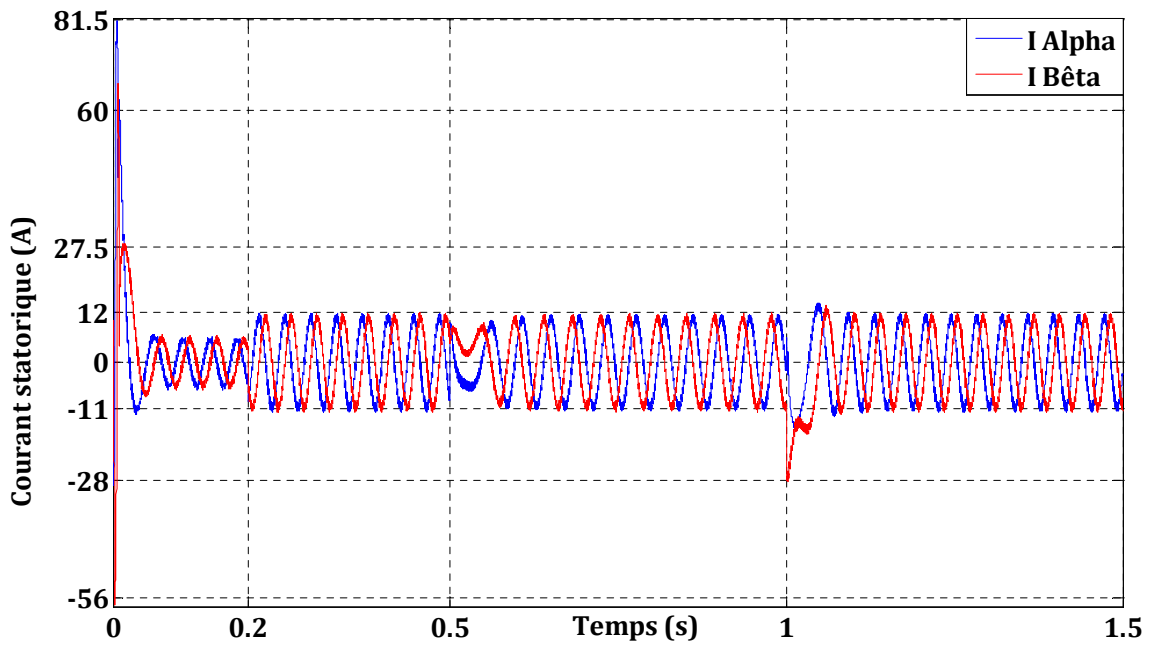


Figure IV.16.2. Les courants absorbés pour une DTCN.

En examinant l'évolution des courants absorbés par le MAS, Les mêmes constatations sont enregistrées pour le courant statorique illustré par les figures IV.17. 1 et 2.

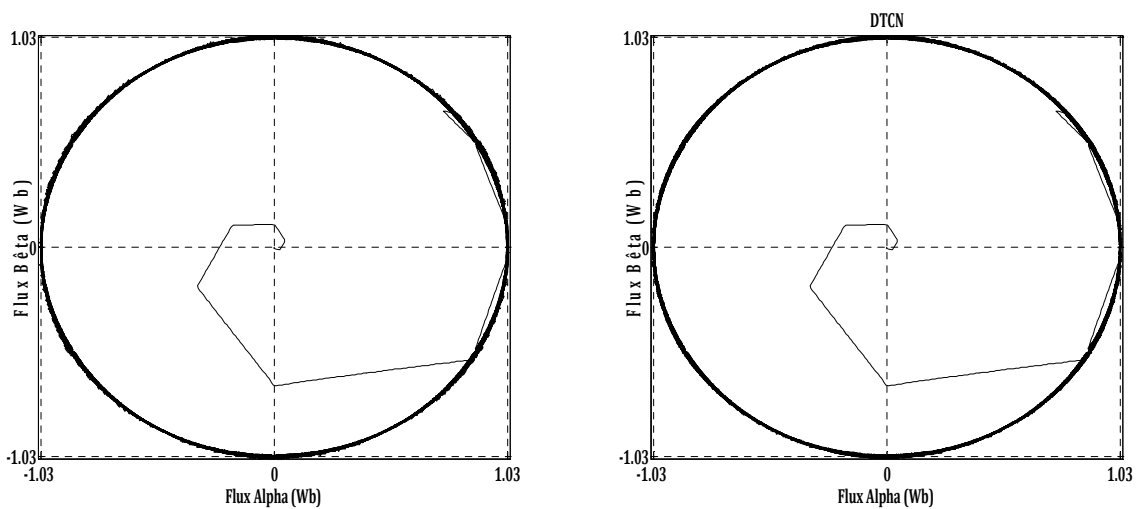


Figure IV.17. La trajectoire du vecteur de flux statorique.

On remarque que l'évolution du flux statorique dans le plan  $(\alpha, \beta)$  suit une trajectoire circulaire, on peut dire que les épaisseurs des cercles sont égales.

Les résultats de ces simulations sont obtenus en utilisant les paramètres suivants :

Paramètres	Valeur (SI)
<b>MAS</b>	
Puissance kW	4
$p$	2
$R_s$	1.3
$r_r$	0.91
$L_s$	0.19
$L_r$	0.18
Mutuelle : M	0.18
J	0.09
$f_r$	0.03
<b>PI</b>	
$K_p$	10.8
$K_i$	30.3
<b>Bande d'hystérésis</b>	
Couple	0.15
Flux	0.00416
Pas d'échantillonnage h	$3 \cdot 10^{-5}$

**Tableau. IV.1.** Paramètres du système simulé.

#### IV.4 CONCLUSION

Ce chapitre consacré à la création des blocs neuronaux capable de jouer le même rôle des comparateurs à hystérésis et la table de sélection conventionnelle, nous a conduit à des résultats satisfaisants qui montrent l'efficacité de cette solution, cette étude nous a permis d'apprendre d'un côté l'implantation de la DTC et savoir la modélisation de chaque partie et d'autre côté la conception des blocs neuronaux en utilisant NNTOOL sous Matlab.

# **CONCLUSION GENERALE**

### CONCLUSION GENERALE

L'objectif principal de ce mémoire consiste à présenter la DTC qui est une méthode de commande vectorielle simple, et étudier son comportement avec l'association des réseaux neuronaux artificiels qui remplacent les comparateurs à hystérésis et la table conventionnelle.

Dans la première partie nous avons abordé la modélisation du moteur asynchrone en se basant sur les équations électrique et mécanique qui régissent son comportement dynamique.

Dans le deuxième chapitre, nous avons exposé les principes du contrôle direct du couple. En effet, cette stratégie est basée sur la détermination directe de la séquence de commande appliquée à l'onduleur par l'utilisation des régulateurs à hystérésis et une table optimale dont la fonction est de contrôler l'amplitude de flux statorique et le couple. Nous avons aussi opté à remplacer l'onduleur ordinaire par un onduleur NPC à trois niveaux dans le but de minimiser les ondulations aux niveaux du couple et du flux.

Ensuite, et au chapitre trois, on a introduit les réseaux neuronaux pour concevoir une table qui remplace la TVC.

Le chapitre quatre a été consacré à la conception des blocs neuronaux qui remplacent les comparateurs à hystérésis. Les résultats obtenus par simulation nous ont montré que cette solution est très intéressante et donne des réponses très satisfaisantes à la commande DTC.

Enfin, nous suggérons d'étudier le temps de calcul pour voir une idée sur la rapidité de la DTCN, parce que le temps de calcul peut influencer d'une manière nuisible l'implantation hardware de la commande s'il est lent.

# **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [AC08] A. Chikhi, «Commande Directe du Couple du Moteur Asynchrone-Apport de la Logique Floue», Mémoire de Magister, Université de Batna, Algérie, 2008.
- [AH17] Abdelkarim Hamza et Elgharbi Kamel, «Commande Directe du Couple DTC-SVM d'une Machine Asynchrone (MAS)», Mémoire de Master, Université de M'Sila, Algérie, 2017.
- [AM07] Ammar, M. Y, «Mise en œuvre de réseaux de neurones pour la modélisation de cinétiques réactionnelles en vue de la transposition batch/continu», Thèse de Doctorat, Toulouse, INPT, 2007.
- [AR20] Aissat Radia et Belkacemi Zoulikha «Commande directe du couple de la machine asynchrone sans capteurs à courant alternatif», Mémoire de Master, Université Abderrahman Mira de Béjaïa, 2020.
- [AZ10] A. Zekkour, «Contrôle Direct du Couple du Moteur à Induction sans Capteur de Vitesse Associé à un Observateur Adaptatif», Mémoire d'Ingénieur en Électrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2010.
- [BM14] Bachir Mokhtari, «DTC Intelligente Appliquée à la Commande de la Machine Asynchrone», Thèse de Doctorat, Université de Batna, Algérie, 2014.
- [BS13] Bouhafna Sebti, «Commande par DTC d'un Moteur Asynchrone Apport des Réseaux de Neurones», Mémoire de Magister, Université de Batna, 2013
- [CC00] C. Carlos, «Modélisation Contrôle Vectoriel et DTC, commande des moteurs asynchrones», Edition Hermes Science Europe 2000.
- [MI14] Messai Med Ibrahim Redouani Med Mokhtar, «Contrôle Direct du Couple d'une Machine Asynchrone», Mémoire de Master, Université d'El-Oued, Algérie, 2014.
- [OD15] O. Djoudi, R.Aboubaker «Application des réseaux de neurone pour la caractérisation géométrique d'un défaut 3D par courant de Foucault », Mémoire Master, Université Kasdi Merbah de Ouargla, 2015
- [RL15] Rabia Lakhder : «Identification des paramètres d'un moteur asynchrone à cage », Mémoire Master, Université Kasdi Merbah 2015.
- [SC09] S. Chekroun «Commande neuro-floue sans capteur de vitesse d'une machine asynchrone triphasée », Mémoire de Magister, Ecole supérieur d'enseignement technologique d'Oran 2009
- [TR08] Toufouti Riad «Contribution A La Commande Directe Du Couple De La Machine Asynchrone», Thèse de doctorat, Université Mentouri de Constantine, Algérie, 2008
- [ZH09] Zighem Hocine Lebba Lahcen, «commande DTC par réseaux de neurones d'un moteur à induction alimenté par un onduleur de tension», Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie, 2009.