

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département d'électrotechnique

N° : ...../2024

## **MEMOIRE DE MASTER**

**DOMAINE: Sciences et Technologies**

**FILIERE : ELECTROTECHNIQUE**

**SPECIALITE : COMMANDES ELECTRIQUES**

### **Thème**

**Application des réseaux de neurones pour la commande directe  
du couple d'une machine asynchrone**

**Présenté Par : BELOUED BESSMA**

**Encadré Par : N. LOURCI**

**BERKACHE RIHEM**

**Date de soutenance : 01 / 07 / 2024**

**Président : Djafer Lalili**

**Garde :**

**Univ MSB jijel**

**Encadreur : Nabil Lourci**

**Garde : MCB**

**Univ MSB jijel**

**Examineur : Abdelaziz Maouche**

**Garde : MCB**

**Univ MSB jijel**

**Promotion : 2023 /2024**

## **REMERCIEMENTS**

*Notre premier remerciement va à Allah **Soubhanou watahala** notre créateur qui nous a donné la force et la persévérance pour réaliser ce travail.*

*Le travail faisant l'objet de ce Mémoire de Master a été réalisé au sein du « **Département d'Electrotechnique** ».*

*À notre encadrant **Dr. Lourci Nabil** à qui nous exprimons nos profondes gratitudes et nos sincères remerciements, pour la confiance qu'il nous a accordé, pour son soutien, ses critiques constructives et ses conseils qui nous ont permis d'évoluer dans notre travail.*

*Nous ne terminions pas sans remercier vivement les **membres du jury** pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer notre travail.*

*Nous sommes reconnaissantes, sans exception, à tous nos enseignants de l'option **commandes électriques** qui ont contribué à notre formation durant nos études.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à*

*Ma mère et mon père, grâce à qui j'ai atteint ce niveau. Que Dieu  
vous protège.*

*Mon grand-père, que Dieu le guérisse, et ma grand-mère, que Dieu  
vous accorde une longue vie.*

*Mes frères, Hani et TaKi Eddine, et mes sœurs, Khadija et Sahar.*

*Mes oncles et mes tantes maternels.*

*Mes tantes et mon oncle paternels abdlakrime.*

*Toute ma famille.*

*Mon amie Rihem.*

*Tous mes amis (Afaf, Djihane et Randa).*

*Bessma*

# *Dédicace*

بسم الله الرحمن الرحيم

(و فوق كل ذي علم عليم) صدق الله العظيم

*Je tiens à remercier DIEU de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail*

*À celui qui a transmis le message, a rempli son devoir avec sincérité, et a conseillé la nation. Notre seigneur Mohammed, que la paix soit sur lui.*

*Le voyage s'est achevé... Ce n'était pas facile et ce n'était pas censé l'être. Ce n'était pas mon rêve, mais c'était la volonté d'Allah pour moi. J'ai traversé ses moments doux et amers et j'ai accompli ce modeste travail.*

*Et au moment le plus glorieux, À celui qui a une conduite noble, une pensée éclairée, à celui qui m'a encouragé à persévérer toute ma vie, à l'homme le plus remarquable dans ma vie, mon premier soutien mon cher père.*

*À celle qui a préféré mes besoins aux siens, celle qui m'a guidé sur le chemin de la vie, celle qui m'a comblé de tendresse et d'amour, celle sur qui je me suis appuyé et qui a un cœur généreux Ma chère maman.*

*À mon pilier solide qui ne vacille pas... À ceux que j'ai été béni d'avoir comme soutien et refuge éternel, mes sœurs nada et aya Mes frères youcef et adem.*

*À ma grand-mère, que Dieu lui accorde la guérison, et à mon grand-père, que Dieu prolonge sa vie. À toute ma famille noble, chacun selon son nom et sa position particulière, spécialement mes oncle et mes tantes.*

*À l'ami des moments, pas seulement des années, compagnon de chemin et d'ambitions lointaines. À ma binôme bessma et tous mes amies à l'université.*

*Rihem*

## Sommaire

|  |          |
|--|----------|
| <b>Introduction générale.....</b>  | <b>1</b> |
| <br><b>Chapitre I : modélisation d'une machine asynchrone</b>                      |          |
| Introduction .....   | 3        |
| I/ Moteur asynchrone triphasé.....   | 3        |
| I.1/ constitution de MAS .....   | 3        |
| I.2/ Caractéristique d'une MAS .....   | 4        |
| I.3/ Modélisation d'une MAS.....   | 4        |
| I.3.1/ Modèle dynamique dans le repère triphasé abc .....                          | 5        |
| I.3.2/ Modèle dynamique dans le repère biphasé .....                               | 8        |
| I.3.2.1/ Transformation de repère de Park (d, q) .....                             | 8        |
| I.3.2.2/ Transformation de Concordia et de Clark (repère $(\alpha, \beta)$ ) ..... | 11       |
| I.4/ Simulation et interprétation d'une MAS.....                                   | 11       |
| Conclusion.....  | 13       |
| <br><b>Chapitre II : Commande directe du couple d'une MAS</b>                      |          |
| Introduction .....   | 14       |
| II.1/ Onduleur triphasé à deux niveaux .....                                       | 14       |
| II.1.1/ Structure de l'onduleur .....  | 14       |
| II.1.2/ Modélisation de l'onduleur .....   | 15       |
| II.1.3/ Modulation vectorielle d'un onduleur triphasé à deux niveaux .....         | 16       |
| II.1.3.1/Etat de l'onduleur .....  | 16       |
| II.1.3.2/Vecteur de tension statorique .....                                       | 17       |
| II.2/ Commande directe du couple DTC.....  | 19       |
| II.2.1/ Principe de commande DTC .....   | 19       |
| II.2.2/ Stratégie de commande directe de couple et de flux .....                   | 20       |
| II.2.2.1/Contrôle le flux statorique.....  | 20       |

|  |    |
|--|----|
| II.2.2.2/Contrôle du couple électromagnétique.....   | 20 |
| II.2.2.3/Sélection de vecteur de tension .....   | 21 |
| II.2.2.4/Estimation du flux statorique et du couple électromagnétique .....                | 22 |
| II.2.2.5/Elaboration du correcteur du flux statorique et du couple électromagnétique ..... | 24 |
| II.2.2.6/Elaboration la table de commande .....  | 25 |
| II.3/ Simulation et interprétation .....   | 25 |
| Conclusion.....  | 30 |
| <br><b>Chapitre III : Application de réseau de neurone par la DTC d'une MAS</b>            |    |
| Introduction .....   | 31 |
| Historique .....   | 31 |
| III.1/ Théorie de réseau de neurone .....  | 32 |
| III.1.1/ Le neurone biologie .....   | 32 |
| III.1.1.1/ constitution d'un neurone biologie.....   | 32 |
| III.1.1.2/ Principe de fonctionnement d'un neurone biologie .....                          | 33 |
| III.1.2/ Le neurone artificiel .....   | 33 |
| III.1.2.1/ Constitution de neurone artificiel.....   | 33 |
| III.1.2.2/ Analogie entre le neurone biologique et le neurone artificiel .....             | 34 |
| III.1.2.3/ Les fonctions d'activation .....  | 35 |
| III.1.3/ Le réseau de neurone artificiel .....   | 35 |
| III.1.3.1/ Topologie des réseaux de neurones.....  | 36 |
| III.1.4/ L'apprentissage .....   | 37 |
| III.1.4.1/ L'apprentissage supervisé .....   | 37 |
| III.1.4.2/ L'apprentissage non supervisé .....   | 38 |
| III.1.5/ Modèle des réseaux de neurones .....  | 38 |
| III.1.5.1/ Le perceptron .....   | 38 |
| III.1.5.2/ ADALINE et MADALINE.....  | 38 |

---

|  |           |
|--|-----------|
| III.1.5.3/ Réseau de neurone à fonction de base radiale .....      | 39        |
| III.1.5.4/ Réseau de neurone multicouche à propagation avant ..... | 39        |
| III.2/ Application du réseau de neurone sur la DTC .....           | 41        |
| III.2.1/ Principe de la DTC-ANN.....                               | 41        |
| III.2.2/ La structure de contrôleur neurale.....                   | 42        |
| III.2.3/Paramètres de l’algorithme LM de la DTC-ANN.....           | 43        |
| III.2.4/ Résultat de simulation et interprétation.....             | 43        |
| III.2.5/ Comparaison entre la DTC classique et la DTC-ANN .....    | 48        |
| Conclusion.....  | 49        |
| <b>Conclusion générale .....</b>                                   | <b>50</b> |

## **Bibliographie**

## *Liste des symboles*

### *Paramètres du modèle*

|          |   |
|----------|---|
| $R_s$    | Résistance statorique.                                      |
| $R_r$    | Résistance rotorique.                                       |
| $L_s$    | L'inductance propre d'une phase statorique.                 |
| $L_r$    | L'inductance propre d'une phase rotorique.                  |
| $M_{sr}$ | La mutuelle inductance entre phase statorique et rotorique. |
| $J$      | Moment d'inertie du rotor.                                  |
| $P$      | Nombre de paires de pôles.                                  |

### *Variables électriques et mécaniques de la machine*

|             |  |
|-------------|--|
| $E$         | Tension continue à l'entrée de l'onduleur      |
| $V_s$       | La tension statorique                          |
| $V_r$       | La tension rotorique                           |
| $I_s$       | Le courant statorique                          |
| $I_r$       | Le courant rotorique                           |
| $\varphi_s$ | Le flux du stator                              |
| $\varphi_r$ | Le flux rotorique                              |
| $\omega_s$  | La pulsation statorique                        |
| $\omega$    | La pulsation mécanique                         |
| $\omega_r$  | La pulsation de glissement                     |
| $\theta$    | L'angle électrique entre le rotor et le stator |
| $C_r$       | Couple de charge                               |

### *Indices*

|                |   |
|----------------|---|
| a, b, c        | Variables exprimées dans le repère fixe triphasé                              |
| d,q            | Variables exprimées dans le repère fixe (d,q) tournant à la vitesse synchrone |
| $\alpha,\beta$ | Variables exprimées dans le repère fixe biphasé ( $\alpha,\beta$ )            |

## **Liste des figures**

### **Chapitre I : modélisation d'une machine asynchrone**

|   |    |
|---|----|
| Figure I.1 : Constitution d'un MAS .....  | 2  |
| Figure I.2 : Représentation triphasé d'une MAS.....   | 5  |
| Figure I.3 : Représentation biphasé de MAS d'un repère de Park.....   | 8  |
| Figure I.4 : Les performances de la machine asynchrone triphasée avec application d'une charge ( $C_r = 10 N.m$ ) à $t = 3 s$ ..... | 12 |

### **Chapitre II : Commande directe du couple d'une MAS**

|  |    |
|--|----|
| Figure II.1: Association onduleur triphasé.....  | 15 |
| Figure II.2 : Etat de l'onduleur .....   | 17 |
| Figure II.3 : Diagramme vectorielle.....   | 18 |
| Figure II.4 : Représentation de la commande DTC d'une MAS .....  | 19 |
| Figure II.5: Vecteurs actifs des tensions statoriques et secteurs .....                                  | 22 |
| Figure II.6: Correcteur de flux à hystérésis.....  | 24 |
| Figure II.7: Résultat de simulation de la commande DTC .....   | 27 |
| Figure II.8: Résultat de simulation de la commande DTC, avec changement de vitesse référence à 0.6s..... | 29 |
| Figure II.9: Résultat de simulation de la commande DTC, avec changement de couple résistant à 0.6s ..... | 30 |

### **Chapitre III : Application de réseau de neurone par la DTC d'une MAS**

|   |    |
|---|----|
| Figure III.1 : Neurone biologique .....                               | 33 |
| Figure III.2 : Neurone artificiel.....                                | 34 |
| Figure III.3 : Réseau non bouclé .....                                | 36 |
| Figure III.4 : Réseau bouclé .....                                    | 37 |
| Figure III.5 : Schéma de neurone multicouche à propagation avant..... | 40 |
| Figure III.6 : Gradient de l'erreur totale.....                       | 41 |
| Figure III.7 : La structure de commande DTC-ANN.....                  | 42 |
| Figure III.8 : Le Schéma de Contrôleur neurale.....                   | 43 |
| Figure III.9 : La structure interne de contrôleur neurale .....       | 43 |
| Figure III.10: Résultat de simulation de la commande DTC-ANN .....    | 45 |

Figure III.11: Résultat de simulation de la commande DTC-ANN, avec changement de vitesse  
référence à 0.6s..... 46

Figure III.12: Résultat de simulation de la commande DTC-ANN, avec changement de couple  
résistant à 0.6s ..... 48

---

## ***Liste des tableaux***

### ***Chapitre I : modélisation d'une machine asynchrone***

|   |    |
|---|----|
| Tableau I .1 : paramètre électrique et mécanique du MAS ..... | 12 |
|---|----|

### ***Chapitre II : Commande directe du couple d'une MAS***

|  |    |
|--|----|
| Tableau II.1 : Correspondance entre les états de l'onduleur et les positions du vecteur de tension ..... | 18 |
|--|----|

|   |    |
|---|----|
| Tableau II.2 : Choix des vecteurs de tension (table de commande)..... | 25 |
|---|----|

### ***Chapitre III : Application de réseau de neurone par la DTC d'une MAS***

|  |    |
|--|----|
| Tableau III.1 : transition entre le neurone biologie et le neurone artificiel..... | 34 |
|--|----|

|  |    |
|--|----|
| Tableau III.2 : Les fonctions d'activations..... | 35 |
|--|----|

|   |    |
|---|----|
| Tableau III.3: Paramètres de l'algorithme LM pour DTC-ANN ..... | 43 |
|---|----|

## ***Résumé***

Dans ce travail, nous avons mené une étude sur la machine asynchrone où nous avons rencontré des difficultés pour régler la vitesse. Pour résoudre ce problème, nous avons utilisé l'une des techniques de commande, parmi lesquelles nous avons employé la commande directe du couple (DTC). Cependant, avec cette technique, nous avons observé un manque de précision dans le contrôle en raison de l'utilisation des bandes d'hystérésis. Nous avons donc opté pour les remplacer par des techniques d'intelligence artificielle, parmi lesquelles nous avons utilisé les réseaux neuronaux, qui permettent d'atteindre des niveaux de performance élevés.

## ***Abstract***

In this work, we conducted a study on the asynchronous machine where we encountered difficulties in speed control. To solve this problem, we used one of the control techniques, among which we employed Direct Torque Control (DTC). However, with this technique, we observed a lack of precision in control due to the use of hysteresis bands. Therefore, we decided to replace them with artificial intelligence techniques, among which we used neural networks, which achieve high levels of performance.

## **ملخص**

في هذا العمل قمنا بدراسة على الآلة غير المتزامنة حيث واجهنا صعوبات في ضبط السرعة. لحل هذه المشكلة، استخدمنا إحدى تقنيات التحكم، ومن بينها استخدمنا التحكم المباشر في عزم الدوران (DTC). ومع ذلك، مع هذه التقنية لاحظنا عدم الدقة في التحكم بسبب استخدام نطاقات التباطؤ. ولذلك اخترنا استبدالها بتقنيات الذكاء الاصطناعي، والتي استخدمنا من بينها الشبكات العصبية، التي تتيح تحقيق مستويات عالية من الأداء.

## ***Introduction générale***

Depuis longtemps, les machines électriques sont utilisées pour convertir l'énergie électrique en énergie mécanique, qui sont des convertisseurs électromécaniques réversibles. Cette tendance s'est renforcée au fil du temps dans les secteurs industriel, tertiaire et domestique. Actuellement, elle représente la majeure partie de la consommation énergétique industrielle destinée à la production de force motrice. Les technologies modernes des systèmes d'entraînement requièrent de plus en plus un contrôle précis et continu de la vitesse, du couple, de la position, etc., tout en assurant la stabilité, la rapidité et le rendement maximal possible. [Begag\_20]

A l'heure actuelle, la machine asynchrone détrône la machine à courant continu dans le domaine de la variation de vitesse. En effet, de part sa robustesse, l'absence du collecteur mécanique et de son faible coût, elle s'avère une solution adéquate pour la plupart des industriels. En outre, les stratégies de contrôle et de commande dont elle peut être dotée lui procurent des comportements et des performances équivalents à ceux de la machine à courant continu. [Ghers\_06]

Les progrès conjoints de l'électronique de puissance et de l'électronique numérique ont permis d'aborder la commande à vitesse variable dans diverses applications. Conjointement à ces avancées technologiques, la communauté scientifique a développé plusieurs approches de commande pour maîtriser en temps réel le fonctionnement des machines électriques surtout la machine asynchrone, où ils ont compté sur la commande directe du couple (DTC). [Mokhtari\_14]

Au milieu des années 1980, une stratégie de contrôle des machines asynchrone qui est le contrôle direct du couple (DTC) est apparue pour concurrencer le contrôle traditionnel. La commande a été présentée par TAKAHASHI et M. DEPENBROCK. Son principe repose sur la détermination directe des impulsions de commande appliquées aux interrupteurs de l'onduleur de tension afin de maintenir le couple électromagnétique et le flux statorique dans deux bandes d'hystérésis prédéfinies. [Mehimeh\_23]

La DTC classique offre plusieurs avantages, mais elle présente aussi de nombreux inconvénients, le plus important d'entre eux c'est l'ondulation du couple électromagnétique et

le flux. Pour améliorer ces performances, nous utilisons une technique d'intelligence artificielle qui est les réseaux de neurones.

L'objectif de ce travail est de présenter des simulations d'un moteur asynchrone commandé par la DTC classique, puis par la DTC amélioré par les réseaux de neurones artificiels.

Le mémoire est organisé en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la modélisation de la machine asynchrone. Nous explorons la modélisation du Moteur Asynchrone Triphasé. D'abord, nous étudions le modèle triphasé qui comprend trois équations électriques, magnétiques et mécanique. Après, nous utilisons diverses transformations biphasées spécifiques au MAS pour simplifier les équations précédentes. Ensuite, nous faisons la simulation du MAS lorsqu'il est directement connecté au réseau électrique.

Dans le deuxième chapitre, nous étudierons d'abord la technique de Commande Directe du Couple (DTC) en commençant par la structure et la modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux. Nous examinerons le principe de fonctionnement de cette technique, puis nous l'appliquerons à la machine asynchrone.

Au troisième chapitre, nous aborderons une vue d'ensemble sur les réseaux neuronaux, leurs structures et leurs types, puis et en vue d'obtenir de meilleurs résultats que le contrôle classique, nous avons remplacé la DTC classique par la DTC neuronale.

# *Chapitre I*

## *Modélisation de la machine asynchrone*

## ***Introduction***

Les moteurs asynchrones triphasés sont les plus couramment utilisés dans l'industrie en raison de leur simplicité, de leur robustesse et de leur coût relativement bas c'est la machine la plus utilisée pour réaliser des variateurs de vitesse [Bernard\_06]. Cependant, l'un de leurs inconvénients est leur difficulté à régler la vitesse, contrairement aux moteurs à courant continu (MCC). [Bapio\_10]

Pour résoudre ce problème, plusieurs techniques de commande sont utilisées, notamment la commande directe du couple DTC (Direct Torque Control), offrant ainsi un moyen efficace de régler la vitesse des moteurs asynchrones.

Dans ce chapitre, nous présentons la modélisation du MAS (Moteur Asynchrone Triphasé). Initialement, nous examinons le modèle triphasé qui est constitué de trois équations électriques, magnétiques et mécaniques. Pour simplifier ces équations, nous utilisons différentes transformations biphasées et les appliquons au MAS. Ensuite, nous abordons la simulation du MAS connecté directement aux réseaux électriques.

### ***I/ Moteur asynchrone triphasé***

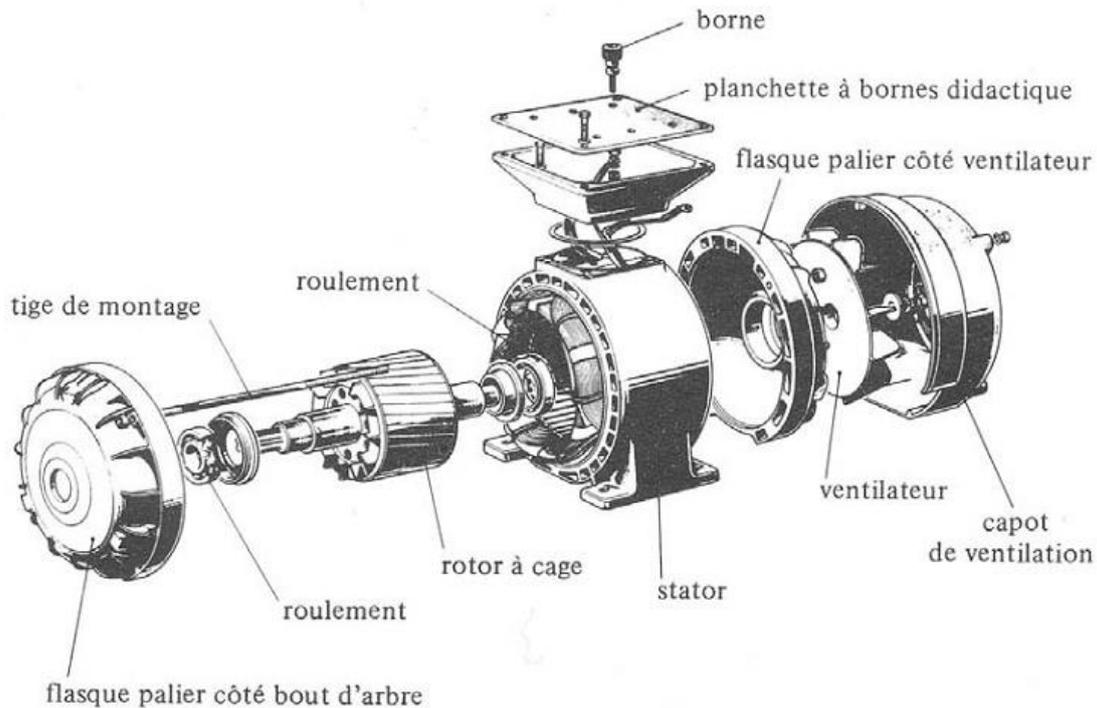
#### ***I.1/ constitution du MAS***

La machine est constituée principalement de deux parties : le stator et le rotor. [Madjahed\_23]

***Le stator***, également appelé inducteur, est la partie fixe de la machine. Il est composé de trois enroulements décalés de  $120^\circ$  et est couplé de manière identique à la source d'alimentation réseau triphasé.

***Le rotor***, appelé induit, est la partie mobile (tournante) de la machine. Il est court-circuité et n'est pas relié à la source externe. Il existe deux types de rotor : le rotor à cage d'écureuil et le rotor bobiné.

Le rotor est inséré à l'intérieur du stator et les deux sont séparés par un vide appelé ***entrefer***.



**Figure I.1** : Constitution d'un MAS

## ***I.2/ Caractéristiques d'une MAS***

La machine asynchrone possède deux principales caractéristiques. [Madjahed\_23]

**Le glissement** est la différence relative entre la vitesse de rotation du rotor  $\Omega_r$  et la vitesse de synchronisme  $\Omega_s$ , exprimée par l'équation suivante :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} \quad , \quad \Omega_s = \frac{60 \cdot f}{P} \quad (\text{I. 1})$$

**Le couple électromagnétique** est le rapport entre la puissance transmise du stator au rotor et la vitesse de rotation  $\Omega_r$ , formulé comme suit :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_r} \quad (\text{I. 2})$$

## ***I.3/Modélisation d'une MAS***

Les hypothèses simplificatrices couramment utilisées dans la mise en place des différents modèles de la MAS, Le modèle de la machine asynchrone sera établi en tenant compte des considérations de base suivantes : [Gdaim\_13]

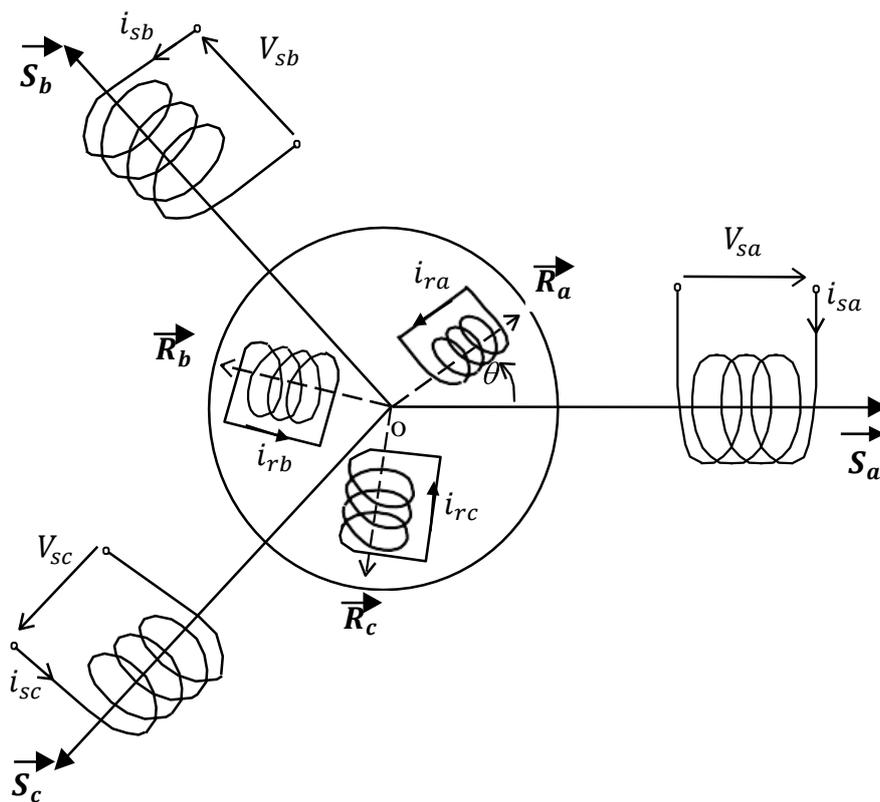
- Le circuit magnétique n'est pas saturé et a une perméabilité constante,

- La répartition dans l'entrefer de la force magnétomotrice et celle du flux sont sinusoïdales.
- Les pertes fer par hystérésis et courants de Foucault sont négligés.
- Les effets des encoches sont négligés.

### ***I.3.1/ Modèle dynamique dans le repère triphasé abc***

La machine asynchrone représentée par la figure (I.2) se compose des: [Meroufel\_09]

- Un circuit statorique fixe comportant trois phases identiques  $S_a, S_b, S_c$  décalées entre elles de  $120^\circ$ .
- Un circuit rotorique mobile comportant trois phases identiques  $R_a, R_b, R_c$  en court circuits décalées entre elles de  $120^\circ$ .
- $\theta$  représente l'angle entre les phases statoriques et les phases rotoriques.



**Figure I.2 :** Représentation triphasé d'une MAS

### Equations électriques

En appliquant la loi d'Ohm et la loi de Faraday sur chaque phase du stator et du rotor, on peut écrire les équations des tensions des enroulements statoriques et rotoriques comme suit: [Madjahed\_23] et [Bouhafna\_13]

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s \cdot I_{sa} + \frac{d}{dt} \varphi_{sa} \\ V_{sb} = R_s \cdot I_{sb} + \frac{d}{dt} \varphi_{sb} \\ V_{sc} = R_s \cdot I_{sc} + \frac{d}{dt} \varphi_{sc} \end{cases} \quad (I.3)$$

$$\begin{cases} V_{ra} = R_r \cdot I_{ra} + \frac{d}{dt} \varphi_{ra} \\ V_{rb} = R_r \cdot I_{rb} + \frac{d}{dt} \varphi_{rb} \\ V_{rc} = R_r \cdot I_{rc} + \frac{d}{dt} \varphi_{rc} \end{cases} \quad (I.4)$$

La forme matricielle des équations électrique :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad (I.5)$$

$$\text{Donc : } [V_{sabc}] = [R_s] \cdot [I_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{sabc}] \quad (I.6)$$

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} \quad (I.7)$$

$$\text{Donc : } [V_{rabc}] = [R_r] \cdot [I_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{rabc}] \quad (I.8)$$

$V_{sabc}$  ,  $V_{rabc}$  : La tension appliquée aux trois phases statoriques et rotoriques.

$I_{sabc}$  ,  $I_{rabc}$  : Le courant des trois phases statoriques et rotoriques.

$\varphi_{sabc}$  ,  $\varphi_{rabc}$  : le flux statorique et rotorique.

$R_s$  ,  $R_r$  : la résistance d'une phase statorique et rotorique.

### Equations magnétiques

Après avoir posé l'hypothèse de la linéarité du circuit magnétique, les équations des flux statorique et rotorique s'expriment comme suit : [Chikhi\_08]

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\varphi_r] = [L_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s] \end{cases} \quad (I.9)$$

$$\text{Avec : } [L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}; [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (I.10)$$

La matrice des inductances stator-rotor s'écrit :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}] = L_m \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (I.11)$$

La forme matricielle des équations des flux statorique et rotorique :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + L_m \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \quad (I.12)$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + L_m \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad (I.13)$$

Avec :

$L_m$  : l'inductance mutuelle maximale entre phases statorique et rotorique.

$L_s$  et  $L_r$  : l'inductance propre d'une phase statorique et rotorique.

$M_s$  et  $M_r$  : l'inductance mutuelle entre phases statoriques et entre phases rotoriques.

$\theta$  : L'angle mesuré entre l'axe magnétique de la phase statorique et la phase rotorique.

En remplaçant l'équation (I.6) et (I.8) dans l'équation (I.9), on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} \{ [L_{ss}][I_s] \} + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}][I_r] \} \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} \{ [L_{rr}][I_r] \} + \frac{d}{dt} \{ [M_{rs}][I_s] \} \end{cases} \quad (I.14)$$

### Equation mécanique

L'équation mécanique est donnée par l'expression suivante : [Hechelef\_17]

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - K_f \Omega \tag{I.15}$$

Avec :

$C_{em}$  : Couple électromagnétique.

$J$  : moment d'inertie des masses tournantes.

$C_r$  : Couple résistant imposé à l'arbre de la machine.

$\Omega$  : vitesse rotorique.

$K_f$  : Coefficient de frottement.

### 1.3.2/ Modèle dynamique dans le repère biphasé

Pour passer d'un repère triphasé à un repère biphasé, il existe plusieurs transformations :

#### 1.3.2.1/ Transformation de Park (d, q)

La transformation de Park est une transformation qui permet de passer du repère fixe (a, b, c) à un repère tournante (d, q, o) à une vitesse angulaire  $\omega$ . Le but de cette transformation est d'éliminer la dépendance de la position dans les matrices d'inductance mutuelle et de simplifier la modélisation du système. [Madjahed\_23] et [Meroufel\_09].

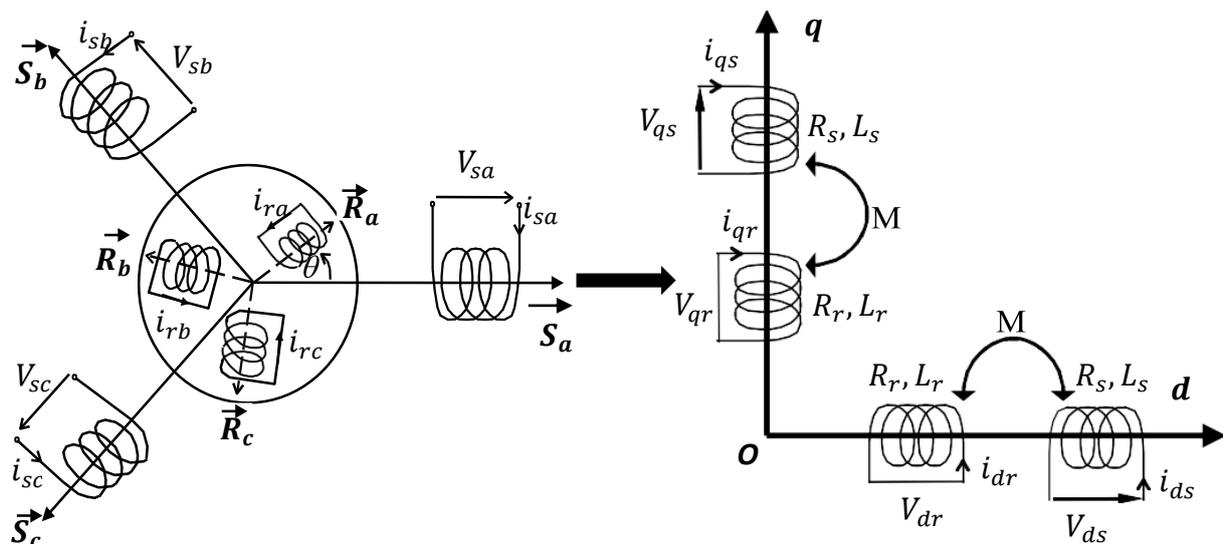


Figure I.3 : Représentation biphasé de la MAS dans le repère de Park

La transformation de Park est donnée comme suit :

$$\text{La transformation directe : } \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} = [P] \cdot \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (\text{I. 16})$$

$$\text{La transformation inverse : } \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [P]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} \quad (\text{I. 17})$$

$X_a, X_b, X_c$  : sont les valeurs de tension et de courant et flux des grandeurs triphasées.

$X_d, X_q$  : sont les valeurs de tension et de courant et flux des grandeurs biphasées.

$X_o$  : est la composante homopolaire.

$[P]$  : est la matrice de Park.

$[P]^{-1}$  : est la matrice inverse de Park.

Les matrice de Park et la matrice inverse de Park sont données par :

$$[p] = K \begin{bmatrix} \cos(\theta_p) & \cos(\theta_p - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_p + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_p) & -\sin(\theta_p - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_p + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}, [P]^{-1} = [P]^T \quad (\text{I. 18})$$

Le coefficient K peut être arbitrairement choisis. Cependant deux valeurs sont fréquemment utilisées :

$K = \frac{2}{3}$  : Permet de garder la valeur maximal de la tension et du courant inchangée lors de la transformation d'axe.

$K = \sqrt{\frac{2}{3}}$  : Permet de garder inchangée la puissance instantanée lors de la transformation.

$\theta_p$  : Est l'angle entre l'axe  $d$  du système biphasé et l'axe de référence dans le système triphasé.

### ***Application de la transformation de Park sur la MAS***

Dans le repère de Park (d, q) tournant à la vitesse angulaire  $\omega_p = \frac{d\theta_p}{dt}$ , les équations électriques et magnétiques et mécaniques sont écrits comme suit : [Meroufel\_09].

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_p \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_p \varphi_{ds} \end{cases} \quad (\text{I. 19})$$

$$\begin{cases} 0 = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_p - \omega_r) \varphi_{qr} \\ 0 = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_p - \omega_r) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (I.20)$$

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} ; \quad \begin{cases} \varphi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M i_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (I.21)$$

$$C_{em} = P \cdot \frac{L_m}{L_r} (\varphi_{dr} \cdot i_{qs} - \varphi_{qr} \cdot i_{ds}) \quad (I.22)$$

Avec :

$\omega_p$  : La vitesse de rotation du repère biphasé.

$\omega_r$  : La vitesse électrique du rotor de la machine.

$L_s = l_s - M_s$  : inductance cyclique statorique.

$L_r = l_r - M_r$  : inductance cyclique rotorique.

$M_{sr} = M_{rs} = M$  : Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

Il existe trois choix du référentiel en fonction de la position de l'angle  $\theta_p$ . On peut lier le repère biphasé au stator, au rotor ou au champ tournant. Dans notre cas, on va choisir un référentiel lié au stator, donc l'angle  $\theta_p = 0$ , et par conséquent la vitesse angulaire égale zéro. En remplaçant dans les équations électriques du stator et du rotor (I.19) et (I.20), on aboutit aux équations suivantes :

$$\frac{d\theta_{ps}}{dt} = \omega_p, \omega_p = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_{ps}}{dt} = 0$$

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \end{cases} \quad (I.23)$$

$$\frac{d\theta_{pr}}{dt} = \omega_p - \omega_r, \omega_p = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_{pr}}{dt} = -\omega_r$$

$$\begin{cases} 0 = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} + \omega_r \varphi_{qr} \\ 0 = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} - \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad (I.24)$$

Le référentiel fixe est intéressant lorsqu'on veut étudier la variation de la fréquence d'alimentation, associée ou non à la variation de la vitesse de rotation.

### ***1.3.2.2/ Transformation de Concordia et de Clark ( $\alpha, \beta$ )***

Cette transformation permet de passer des axes réels  $a, b, c$  du stator à un repère orthogonal  $\alpha, \beta, o$ . À l'aide de la matrice de passage  $[C]$ , on écrit : [Hechelef\_17]

$$\text{La transformation directe : } \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_o \end{bmatrix} = [C] \cdot \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (\text{I. 25})$$

$$\text{La transformation inverse : } \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [C]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_o \end{bmatrix} \quad (\text{I. 26})$$

$X$  : Représente la tension ou courant ou flux.

Si on pose  $\theta_p = 0$  dans l'équation (I.16), la matrice de passage et la matrice inverse sont données comme suit :

$$[C] = K \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}, [C]^{-1} = [C]^T \text{ avec } K = \left\{ 1, \frac{2}{3}, \sqrt{\frac{2}{3}} \right\} \quad (\text{I. 27})$$

Ces transformations sont utilisées dans la commande directe du couple DTC.

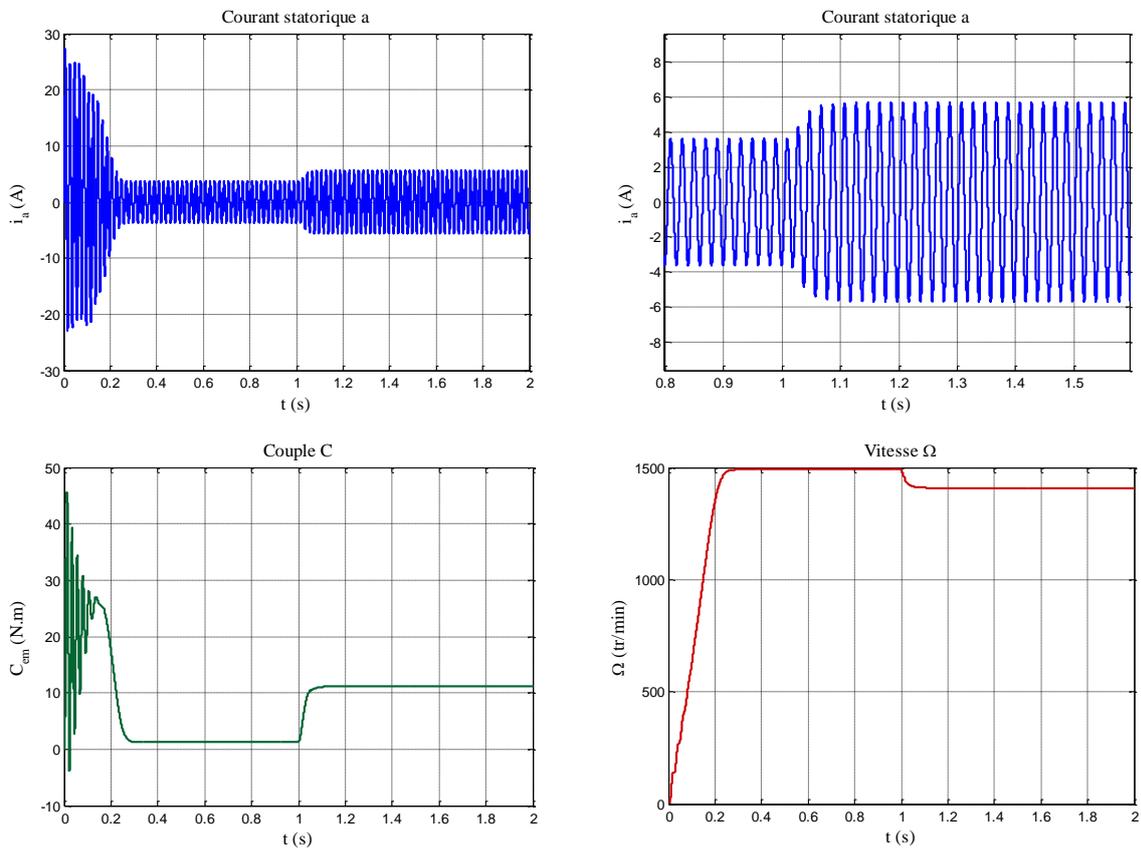
## ***1.4/ Simulation et interprétations***

Le moteur asynchrone est alimenté directement par une source de tension triphasé équilibrée, chaque phase étant décalée de  $120^\circ$  par rapport aux autres et ayant une fréquence de 50 Hz. Les performances du moteur asynchrone sont observées et interprétées à la fois à vide et en charge

Les paramètres du MAS sont indiqués au tableau. I.1

| <i>Paramètre</i> | <i>Valeur</i>           |
|------------------|-------------------------|
| $R_s$            | 4.805 $\Omega$          |
| $R_r$            | 3.805 $\Omega$          |
| $L_s$            | 0.274 H                 |
| $L_r$            | 0.274 H                 |
| $L_m$            | 0.258 H                 |
| $K_f$            | 0.008 N.m.s             |
| $J$              | 0.031 kg.m <sup>2</sup> |
| $P$              | 2                       |

**Tableau I.1** : Paramètres électriques et mécaniques du MAS



**Figure I.4** : Les performances de la machine asynchrone triphasée avec application d’une charge ( $C_r = 10 \text{ N.m}$ ) à  $t = 1 \text{ s}$ .

Le fonctionnement à vide d'une machine asynchrone se caractérise par l'absence de charge mécanique sur le rotor. Dans cette situation, le courant statorique est plus faible que le courant nominal et le couple électromagnétique est plus faible que le couple nominal, car le rotor n'a pas à supporter de charge mécanique. Après un certain temps, le couple devient approximativement nul, conformément à l'expression suivante :

$$C_{em} = J \frac{d\Omega}{dt} + K_f \Omega$$

La vitesse de rotation augmente rapidement et se stabilise à 1500 tr/min, cela correspond également à la vitesse de synchronisme, définie par l'expression suivante :

$$\Omega_s = \frac{60 \cdot f}{P} ; f = 50Hz \text{ et } P = 2$$

En revanche, lors du fonctionnement en charge d'une machine asynchrone, c'est-à-dire lorsque la machine est couplée à une charge mécanique avec un couple résistant ( $C_r = 10 \text{ N.m}$ ) , le courant statorique et le couple électromagnétique augmentent, ce qui entraîne une chute de la vitesse à 1400 tr/min.

## **Conclusion**

En conclusion, la modélisation d'une machine asynchrone est une étape essentielle dans la compréhension de son fonctionnement et dans la conception de systèmes électriques complexes. Dans ce chapitre, on a étudié la modélisation de la machine asynchrone. Au début, l'étude portera sur les caractéristiques de la machine asynchrone et les hypothèses approuvées pour le modèle dynamique dans le repère triphasé et biphasé. Par la suite, on a établi un modèle biphasé de la machine basé sur le choix au référentiel au stator.

On a aussi réalisé un modèle de simulation de la machine asynchrone dans l'environnement MATLAB/SIMULINK. Premièrement avec un démarrage à vide, puis avec application d'une charge de 10 N.m. Les résultats de simulations obtenues montrent la justesse du modèle développé.

## *Chapitre II*

### *Commande directe du couple d'une MAS*

## ***Introduction***

En raison de son coût modeste et de sa facilité de construction, ainsi que de l'utilisation des techniques de variation de vitesse, la popularité de la machine asynchrone ne cesse de croître dans les secteurs de l'entraînement à vitesse variable [Yantour\_06]. Le contrôle de la machine asynchrone en couple a été introduit en 1985 par I. Takahashi. La DTC est une technique de commande exploitant la possibilité d'imposer un couple et un flux aux machines asynchrones d'une manière découplée. [Gdaim\_13].

La commande directe du couple consiste à la détermination directe de la séquence de commande appliquée aux interrupteurs de l'onduleur qui alimente la machine, sans passer par un modulateur des largeurs d'impulsions. La détermination de cette séquence de commande est basée sur l'utilisation des comparateurs à hystérésis, ayant comme objectifs de contrôler l'amplitude et la position du flux statorique, ainsi que le couple électromagnétique. [Lalili\_22]

Dans ce chapitre, nous étudierons la commande DTC en débutant par la structure et la modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux. Ensuite, nous associons l'onduleur à la machine asynchrone. Pour appliquer la commande DTC sur la machine asynchrone, on doit d'abord étudier le principe de cette commande et en dernier, nous voyons les facteurs nécessaires à la mise en œuvre de cette commande.

### ***II.1/ Onduleur triphasé à deux niveaux***

#### ***II.1.1/ Structure de l'onduleur***

L'onduleur de tension est un convertisseur statique constitué de trois cellules de commutation généralement à transistor ou à thyristor GTO pour les grandes puissances. On montre que chaque groupe transistor-diode, assemblés en parallèle, forme un interrupteur (demi-bras) commandé à l'ouverture et à la fermeture. Chaque demi-bras possède son complémentaire.

Pour modéliser l'onduleur de tension, voir (figure II.1), on considère son alimentation comme une source parfaite, supposée être constituée d'un générateur de f.é.m. égale à  $E$  et un point de milieu fictif  $O$ .

Le principe de fonctionnement s'exprime par la séquence imposée aux interrupteurs qui réalise la modulation de largeur des impulsions des tensions appliquées aux enroulements statoriques de la machine. [Chikhi\_08]

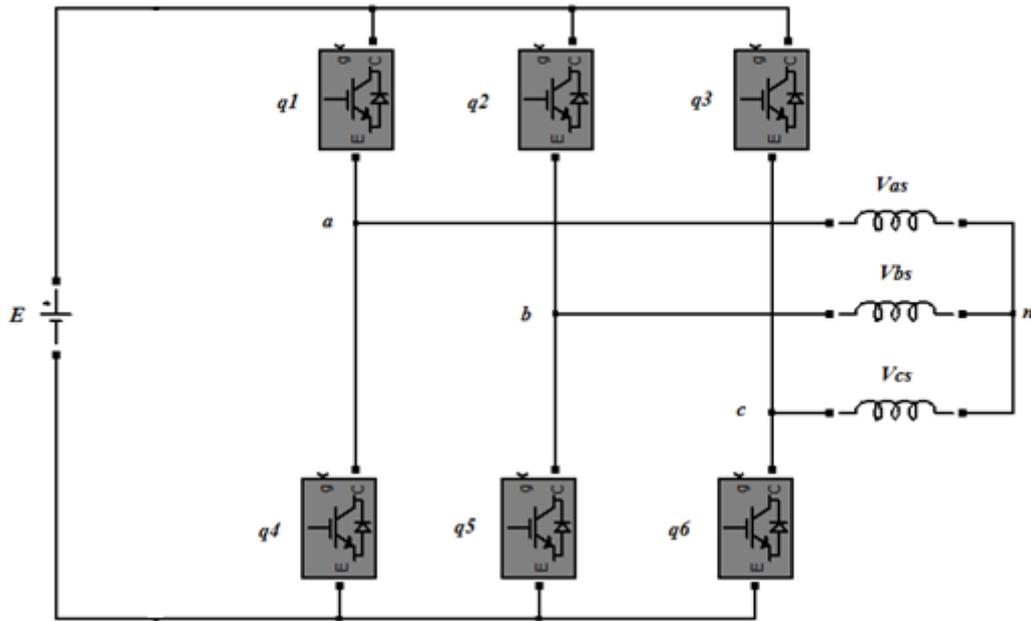


Figure II.1: Association onduleur triphasé MAS

### II.1.2/ Modélisation de l'onduleur

Les tensions composées  $V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}$  peuvent être exprimées d'une part en fonction des tensions d'entrée de l'onduleur  $V_{ao}, V_{bo}, V_{co}$  et d'autre part en fonction des tensions de phases  $V_{an}, V_{bn}, V_{cn}$  [Gdaim\_13] :

**A partir du point milieu o :**

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (\text{II. 1})$$

**A partir du neutre n :**

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{an} - V_{bn} \\ V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \\ V_{ca} = V_{cn} - V_{an} \end{cases} \quad (\text{II. 2})$$

La charge connectée à l'onduleur est triphasée équilibrée, on a donc la relation :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II. 3})$$

Les relations précédentes permettent de déduire le système d'équations suivant reliant les tensions de phase aux bornes de la charge aux tensions d'entrée de l'onduleur :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(2.V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(2.V_{bo} - V_{ao} - V_{co}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(2.V_{co} - V_{ao} - V_{bo}) \end{cases} \quad (\text{II. 4})$$

Sous la forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 5})$$

Les tensions de sortie de l'onduleur (tensions statoriques de la machine) sont exprimées en fonction de la tension continue de son entrée E et des fonctions de commutation de ces interrupteurs  $q_1, q_2, q_3$  [Lalili\_22] :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 6})$$

### ***II.1.3/ Modulation vectorielle de l'onduleur triphasé à deux niveaux***

La modulation vectorielle des largeurs d'impulsions est basée sur la notion du vecteur de tension, qui est un vecteur virtuel calculé à partir d'un système de tensions polyphasées. Les signaux de commande des interrupteurs de l'onduleur sont générés en fonction de la position de ce vecteur. [Lalili\_22]

#### ***II.1.3.1/ Etat de l'onduleur***

L'onduleur triphasé possède à huit états possibles : 000, 100, 110, 010, 011, 001, 101, 111

Chaque état correspond à une configuration donnée des bras de l'onduleur.

***Etat1*** : interrupteur fermé.

***Etat0*** : interrupteur ouvert.

La figure (II.2) donne les configurations correspondantes aux huit états possibles de l'onduleur.

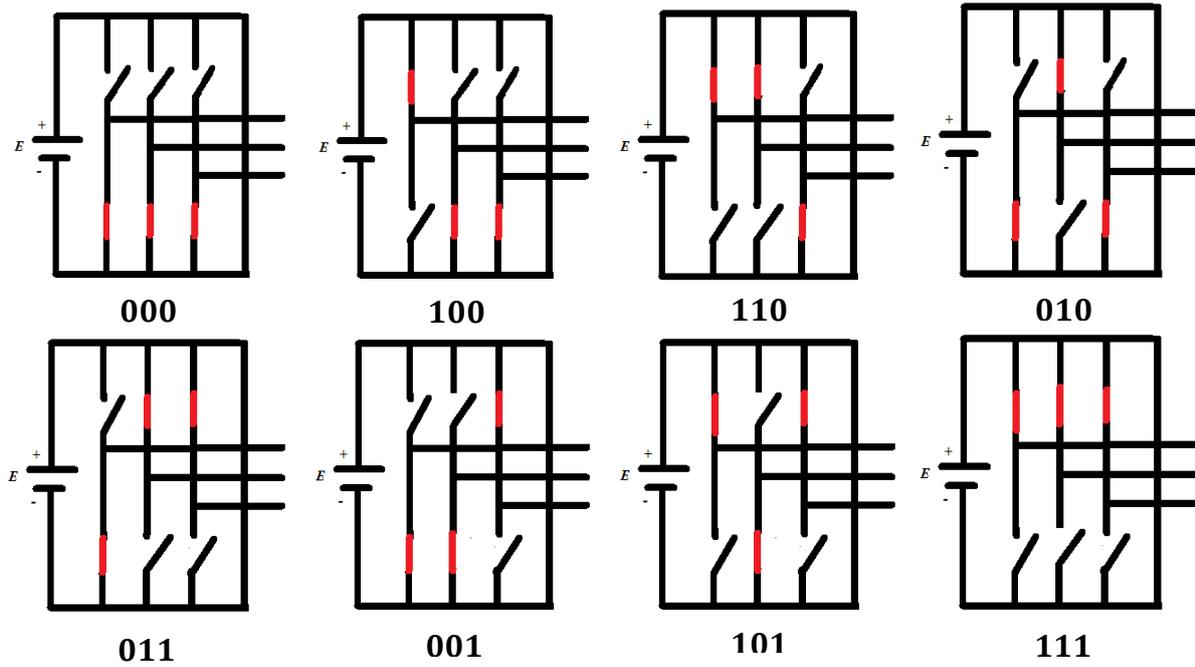


Figure II.2 : Etats de l'onduleur

### II.1.3.2/ Vecteur de tension statorique

Le vecteur de tension correspondant à la tension de sortie de l'onduleur (I. 4) est exprimé par :

$$V^s = \frac{2}{3}(V_{as} + aV_{bs} + a^2V_{cs}) \quad ; \quad a = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (\text{II. 7})$$

En appliquant la transformation de Clark sur la tension de l'onduleur, on obtient le vecteur de tension composé par les deux composantes  $V_\alpha^s, V_\beta^s$  :

$$V^s = V_\alpha^s + j \cdot V_\beta^s \quad (\text{II. 8})$$

La définition du vecteur des huit tensions se fait à partir de l'expression suivante :

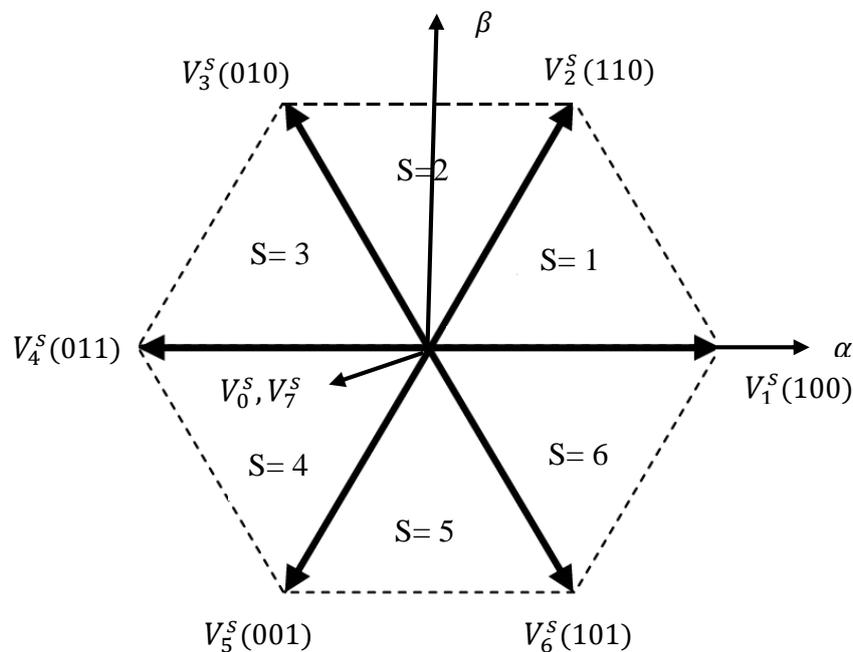
$$V_k^s = \begin{cases} \frac{2}{3} \cdot E \cdot e^{j(k-1)\frac{\pi}{3}} & \text{pour } k = 1, \dots, 6 \\ 0 & \text{pour } k = 0, 7 \end{cases} \quad (\text{II. 9})$$

Le tableau (II.1) résume la correspondance entre les états de l'onduleur et les positions du vecteur de tension.

| Signaux de commande<br>$q_1, q_2, q_3$ | $V_{as}$      | $V_{bs}$      | $V_{cs}$      | vecteur de tension<br>$V_k^s$ |
|--|---------------|---------------|---------------|-------------------------------|
| 000                                    | 0             | 0             | 0             | $V_0^s$                       |
| 100                                    | $2.V_{dc}/3$  | $-V_{dc}/3$   | $-V_{dc}/3$   | $V_1^s$                       |
| 110                                    | $V_{dc}/3$    | $V_{dc}/3$    | $-2.V_{dc}/3$ | $V_2^s$                       |
| 010                                    | $-V_{dc}/3$   | $2.V_{dc}/3$  | $-V_{dc}/3$   | $V_3^s$                       |
| 011                                    | $-2.V_{dc}/3$ | $V_{dc}/3$    | $V_{dc}/3$    | $V_4^s$                       |
| 001                                    | $-V_{dc}/3$   | $-V_{dc}/3$   | $2.V_{dc}/3$  | $V_5^s$                       |
| 101                                    | $V_{dc}/3$    | $-2.V_{dc}/3$ | $V_{dc}/3$    | $V_6^s$                       |
| 111                                    | 0             | 0             | 0             | $V_7^s$                       |

**Tableau II.1** : Correspondance entre les états de l'onduleur et les positions du vecteur de tension.

La représentation des huit positions du vecteur de tension divisant le plan biphasé stationnaire  $\alpha\beta$  en six secteurs est donnée par la figure (II.3)



**Figure II.3** : Diagramme vectorielle

Ce diagramme pour utiliser d'un la commande directe du couple DTC

## II.2/ Commande directe du couple DTC

### II.2.1/ Principe de commande DTC

Le principe de la commande DTC est la régulation directe du couple électromagnétique de la machine, par l'application des différents vecteurs de tension à l'onduleur, qui détermine son état. Les deux variables contrôlées sont : le flux et le couple électromagnétique qui sont habituellement commandés par des comparateurs à hystérésis. Il s'agit de maintenir les grandeurs de flux et du couple à l'intérieur de ces bandes d'hystérésis. La sortie de ces régulateurs détermine le vecteur de tension optimal à appliquer à chaque instant de commutation. [Benbouhenni\_17]. Pour contrôler le flux et le couple électromagnétique, on utilise la mesure des grandeurs électriques qui sont les courants et les tensions statoriques et la vitesse de rotation. [Hubert\_06]

Les principaux éléments constitutifs de la commande DTC sont énumérés ainsi : [Gdaim\_06]

- Des estimateurs du flux statorique et du couple électromagnétique.
- La table de commande de Takahashi,
- Les comparateurs à hystérésis,
- Un régulateur de vitesse.

La figure (II.4) représente le schéma bloc de la commande DTC

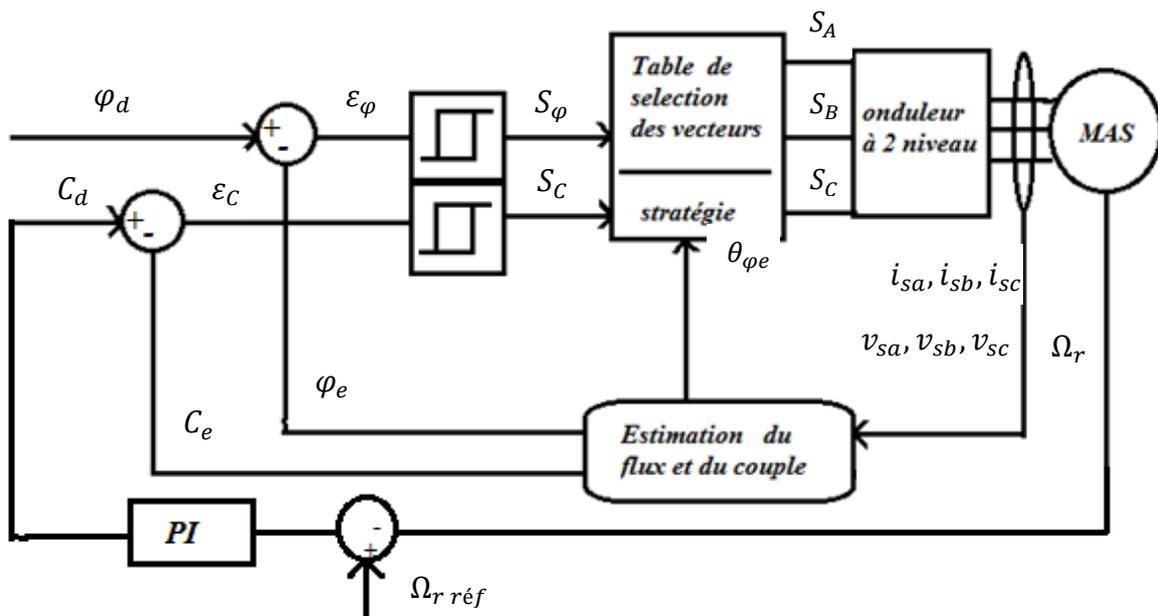


Figure II.4 : Représentation de la commande DTC d'une MAS

## II.2.2/ Stratégie de commande directe du couple et du flux

### II.2.2.1/ Contrôle du flux statorique

Dans le repère fixe  $(\alpha, \beta)$  lié au stator, le flux statorique est estimé à partir de l'équation suivante : [Gdaim\_06]

$$\vec{V}_s = R_s \cdot \vec{i}_s + \frac{d\vec{\varphi}_s}{dx} \quad (\text{II. 10})$$

Soit encore :

$$\vec{\varphi}_s = \vec{\varphi}_{s0} + \int_0^t (\vec{V}_s - R_s \cdot \vec{i}_s) dt \quad (\text{II. 11})$$

La chute de tension due à la résistance du stator peut être négligée, la relation simplifiée s'écrit donc :

$$\vec{\varphi}_s \approx \vec{\varphi}_{s0} + \int_0^t \vec{V}_s dt \quad (\text{II. 12})$$

Pendant une période d'échantillonnage, le vecteur de tension appliqué au MAS reste constant, on peut écrire alors :

$$\vec{\varphi}_s(k+1) \approx \vec{\varphi}_s(k) + \vec{V}_s(k)T_e \quad (\text{II. 13})$$

Ou encore :

$$\Delta\varphi_s = \vec{\varphi}_s(k+1) - \vec{\varphi}_s(k) = \vec{V}_s(k)T_e \quad (\text{II. 14})$$

Avec :

$\vec{\varphi}_s(k)$  : Vecteur du flux statorique au pas d'échantillonnage actuel ;

$\vec{\varphi}_s(k+1)$  : Vecteur du flux statorique au pas d'échantillonnage suivant ;

$\Delta\varphi_s$  : Variation du vecteur flux statorique ;

$T_e$  : Période d'échantillonnage.

### II.2.2.2/ Contrôle du couple électromagnétique

En faisant intervenir les flux statorique et rotorique, le couple électromagnétique est exprimé par : [Gdaim\_06]

$$C_{em} = \frac{3}{2} P(\vec{\varphi}_s \times \vec{\varphi}_r) = \frac{3}{2} P|\vec{\varphi}_s| \cdot |\vec{\varphi}_r| \cdot \sin\delta \quad (\text{II. 15})$$

Avec :

$\vec{\varphi}_s$  : Vecteur de flux statorique.

$\vec{\varphi}_r$  : Vecteur de flux rotorique ramené au stator.

$\delta$  : Angle entre les vecteurs des flux statorique et rotorique.

Le couple dépend des amplitudes des deux vecteurs  $\vec{\varphi}_s$  et  $\vec{\varphi}_r$  et de leur position relative.

L'estimation du couple est effectuée à partir des grandeurs statoriques  $\varphi_{s\alpha}, \varphi_{s\beta}, i_{s\alpha}, i_{s\beta}$  par la relation suivante :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P(\varphi_{s\alpha} \times i_{s\beta} - \varphi_{s\beta} \times i_{s\alpha}) \quad (\text{II. 16})$$

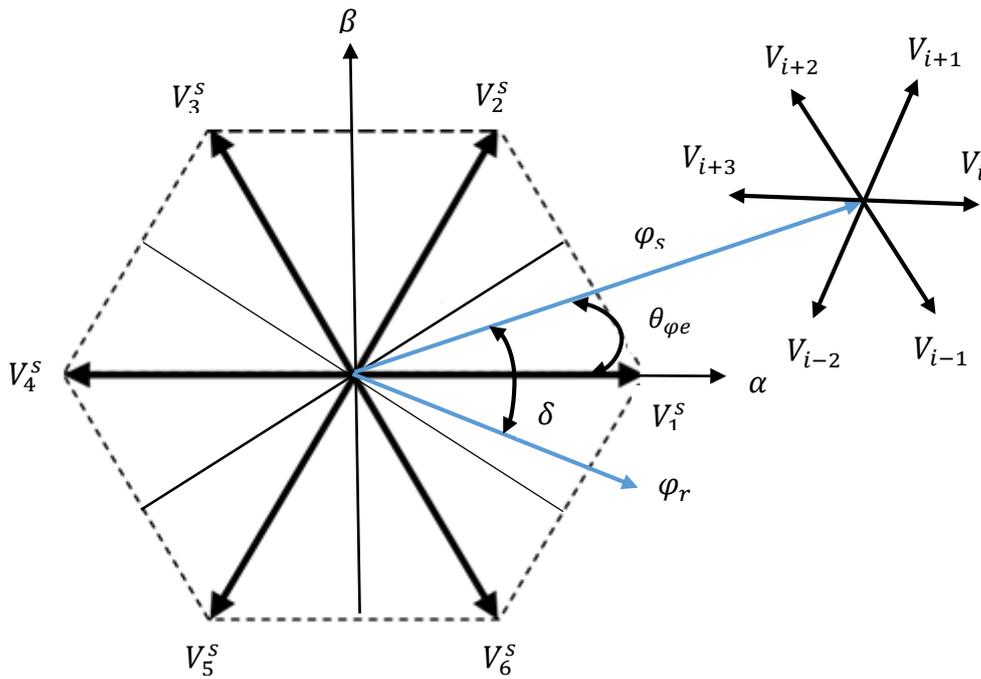
### II.2.2.3/ Sélection du vecteur de tension

Le choix du vecteur tension statorique  $\vec{V}_s$  dépend de la variation souhaitée pour le module du flux statorique  $\vec{\varphi}_s$ , du sens de rotation et également de l'évolution souhaitée pour le couple électromagnétique. [Chikhi\_08]

Dans le repère  $(\alpha, \beta)$  lié au stator, on peut délimiter l'espace en le décomposant en six zones appelées secteurs comme illustré par la figure (II.5). L'axe  $(\alpha)$  est choisi confondu avec l'axe de la phase (a) du stator.

Lorsque le flux  $\varphi_s$  se trouve dans une zone  $i$  ( $i=1, \dots, 6$ ), le contrôle du flux et du couple peut être assuré en sélectionnant l'un des huit vecteurs tensions suivants :

- Si  $V_{i+1}$  est sélectionné alors  $\varphi_s$  croît et  $C_{em}$  croît .
- Si  $V_{i-1}$  est sélectionné alors  $\varphi_s$  croît et  $C_{em}$  décroît.
- Si  $V_{i+2}$  est sélectionné alors  $\varphi_s$  décroît et  $C_{em}$  croît.
- Si  $V_{i-2}$  est sélectionné alors  $\varphi_s$  décroît et  $C_{em}$  décroît.
- Si  $V_0$  ou  $V_7$  est sélectionné, alors la rotation du flux  $\varphi_s$  est arrêtée, d'où une décroissance du couple alors que le module du flux  $\varphi_s$  reste inchangé.



**Figure II.5:** Vecteurs actifs des tensions statoriques et secteurs

Le niveau d'efficacité du vecteur de tension sélectionné dépend de la position du vecteur du flux à l'intérieur de son secteur.

Quel que soit la tendance désirée du flux et du couple (croissance ou décroissance), les deux vecteurs  $V_i$  et  $V_{i+3}$  ne sont jamais sélectionnés, car ils provoquent une évolution «très rapide» du flux. [Lalili\_22]

#### II.2.2.4/ Estimation du flux statorique et du couple électromagnétique

La commande directe de couple nécessite l'estimation de la position du flux statorique pour pouvoir déduire le secteur S, ainsi que le module du flux et du couple électromagnétique, pour pouvoir les comparer au flux et au couple de référence. [Lalili\_22]

##### *Estimation du flux statorique*

Les composantes du flux statorique  $\varphi_{s\alpha}$  et  $\varphi_{s\beta}$  peuvent être estimées à partir des deux équations de tensions statoriques dans le repère biphasé fixe  $\alpha, \beta$  :

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{s\alpha} \\ \varphi_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 17})$$

On déduit les expressions des flux :

$$\begin{cases} \varphi_{s\alpha} = \int (V_{s\alpha} - R_s \cdot i_{s\alpha}) dt \\ \varphi_{s\beta} = \int (V_{s\beta} - R_s \cdot i_{s\beta}) dt \end{cases} \quad (\text{II. 18})$$

Le flux estimé est défini par son module et sa position donnés par la relation suivante :

$$\begin{cases} \varphi_s = \sqrt{\varphi_{s\alpha}^2 + \varphi_{s\beta}^2} \\ \theta = \arctg \frac{\varphi_{s\alpha}}{\varphi_{s\beta}} \end{cases} \quad (\text{II. 19})$$

Les estimations des composantes du flux  $\varphi_{s\alpha}, \varphi_{s\beta}$  dépendent des deux composantes du courant  $i_{s\alpha}$  et  $i_{s\beta}$  et de la tension  $V_{s\alpha}$  et  $V_{s\beta}$ . Pour obtenir ces composantes, on applique la transformation de Park sur les courants et les tensions de phase statorique mesurés, en imposant un angle de transformation nul (repère fixe lié au stator).

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 20})$$

En tenant compte que :  $i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0$

On simplifie et on trouve à la fin :

$$\begin{cases} i_{s\alpha} = \sqrt{\frac{3}{2}} i_{sa} \\ i_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} (2 i_{bs} + i_{cs}) \end{cases} \quad (\text{II. 21})$$

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 22})$$

En tenant compte des tensions composées :

$$\begin{cases} v_{ab} = v_{sa} - v_{sb} \\ v_{ca} = v_{sa} - v_{sc} \\ v_{bc} = v_{sb} - v_{sc} \end{cases}$$

On simplifie et on trouve à la fin :

$$\begin{cases} v_{s\alpha} = \frac{1}{\sqrt{6}}(v_{ab} + v_{ac}) \\ v_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}}v_{bc} \end{cases} \quad (\text{II. 23})$$

### Estimation du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique est exprimé en fonction des composantes du flux statorique  $\varphi_{s\alpha}$ ,  $\varphi_{s\beta}$  et des composantes du courant statorique  $i_{s\alpha}$  et  $i_{s\beta}$  par la relation suivante :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P(\varphi_{s\alpha} \cdot i_{s\beta} - \varphi_{s\beta} \cdot i_{s\alpha}) \quad (\text{II. 24})$$

### II.2.2.5/ Elaboration du correcteur du flux statorique et du couple électromagnétique

#### Correcteur du flux

Le rôle du correcteur du flux est d'imposer à l'amplitude du flux statorique  $\varphi_s$  de suivre une amplitude de référence  $\varphi_{s\text{ref}}$ . Ce correcteur de flux est un comparateur à hystérésis à deux niveaux, permettant au flux d'évoluer à l'intérieur d'une bande de tolérance autour du flux de référence de façon à maintenir  $|\varphi_{s\text{ref}} - \varphi_s| \leq \Delta\varphi_s$ . La structure de ce comparateur est indiquée à la figure (II.6).

$\Delta\varphi_s$  : Largeur d'hystérésis du correcteur.

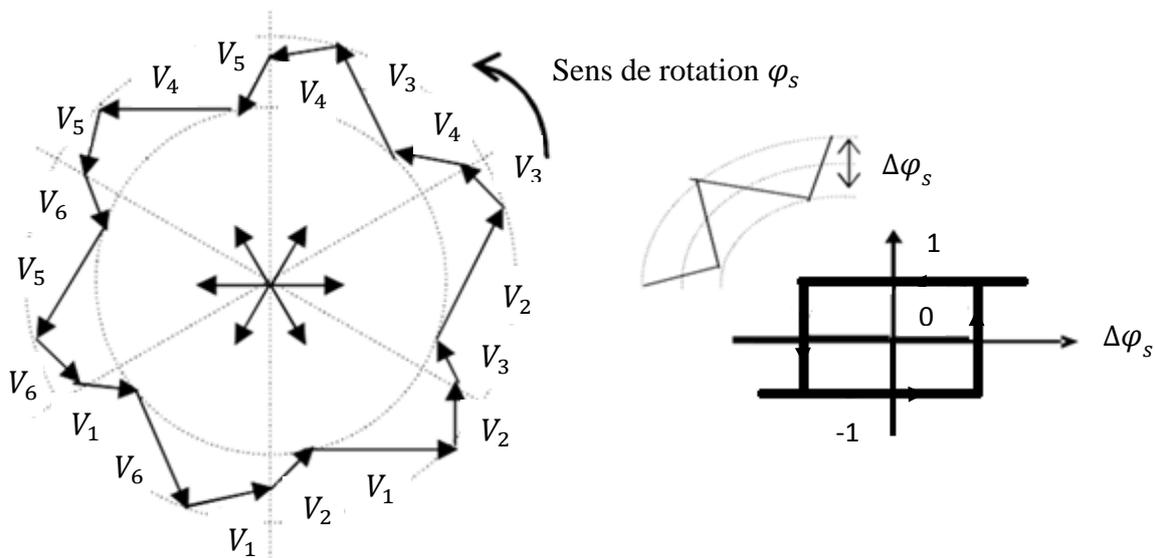


Figure II.6: Correcteur à hystérésis du flux

### Correcteur du couple électromagnétique

Son rôle est de maintenir le couple  $C_{em}$  à l'intérieur d'une bande de tolérance autour de sa référence  $C_{em\ ref}$  de façon à maintenir  $|C_{em\ ref} - C_{em}| \leq \Delta C_{em}$ . A la différence au flux, le couple peut être positif ou négatif, suivant le sens de rotation de la machine. Cette différence donne deux possibilités pour réaliser un correcteur de couple :

- Un comparateur à hystérésis à deux niveaux
- Un comparateur à hystérésis à trois niveaux.

#### II.2.2.6/ Elaboration de la table de commande

Le vecteur à appliquer doit être choisi en fonction de l'action recherchée tant sur le flux que sur le couple. Pour cela, il suffit de rechercher le vecteur commun à l'action désirée tant sur le flux que sur le couple. Cela est récapitulé dans le tableau (II.2).

| Variable du flux      | Variable du couple   | Secteur |       |       |       |       |       | Type de comparateur du couple |              |
|-----------------------|----------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------------------|--------------|
|                       |                      | 1       | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |                               |              |
| $\Delta\varphi_s = 1$ | $\Delta C_{em} = 1$  | $V_2$   | $V_3$ | $V_4$ | $V_5$ | $V_6$ | $V_1$ | 2                             | 3<br>niveaux |
|                       | $\Delta C_{em} = 0$  | $V_7$   | $V_0$ | $V_7$ | $V_0$ | $V_7$ | $V_0$ | niveaux                       |              |
|                       | $\Delta C_{em} = -1$ | $V_6$   | $V_1$ | $V_2$ | $V_3$ | $V_4$ | $V_5$ |                               |              |
| $\Delta\varphi_s = 0$ | $\Delta C_{em} = 1$  | $V_3$   | $V_4$ | $V_5$ | $V_6$ | $V_1$ | $V_2$ | 2                             | 3<br>niveaux |
|                       | $\Delta C_{em} = 0$  | $V_7$   | $V_0$ | $V_7$ | $V_0$ | $V_7$ | $V_0$ | niveaux                       |              |
|                       | $\Delta C_{em} = -1$ | $V_5$   | $V_6$ | $V_1$ | $V_2$ | $V_3$ | $V_4$ |                               |              |

Tableau II.2 : Choix des vecteurs de tension (table de commande)

### II.3/ Simulation et interprétation

On présente dans ce paragraphe les résultats de simulation de la commande DTC classique d'une MAS alimentée par un onduleur de tension triphasé à deux niveaux. Un programme de simulation, établi sous l'environnement Matlab, nous a permis de reproduire fidèlement le comportement des divers grandeurs électrique et mécanique. On a utilisé les mêmes grandeurs nominales et les mêmes paramètres de la machine asynchrone disponible dans le chapitre I.

Le premier test concerne le fonctionnement de la MAS en régime nominal. Pour une consigne du flux égal à 1 Wb, une consigne de vitesse égal 160 rad/s et un couple résistant nul. Le deuxième test concerne le changement de la vitesse de référence à 0.6 s de 160 rad/s à 50 rad/s. La troisième test concerne l'application d'un couple résistant de 10 N.m à 0.6 s. Les figures (II.7) et (II.8) et (II.9) illustrent l'évolution temporelle du couple, du flux statorique, des courants statoriques et de la vitesse de rotation.

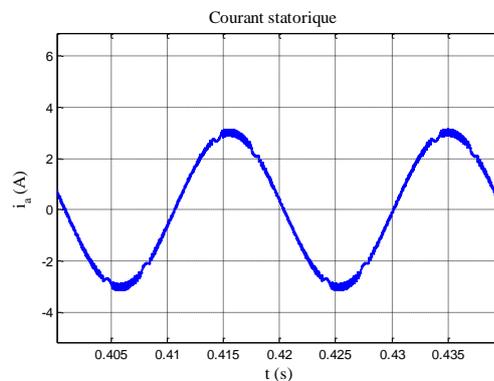
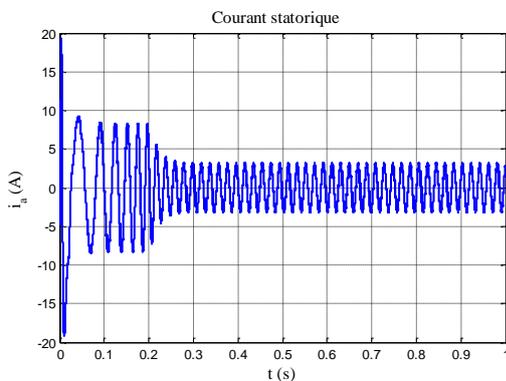
Le courant statorique varie en fonction de la charge mécanique. Il présente une forte amplitude au démarrage allant jusqu'à 18 A, puis il se stabilise à sa valeur nominale. Il augmente après 0.6 s lorsqu'on applique la charge mécanique, plus la charge est élevée plus le courant est élevé pour fournir le couple nécessaire à la rotation de la charge.

La tension de sortie de l'onduleur est une tension alternative d'amplitude 400V est une d'ondes carrées.

Le flux statorique est maintenu à un niveau optimal pour la charge et la vitesse de rotation souhaitées. Le contrôle du flux est souvent réalisé, par la tension d'alimentation du stator. Le flux statorique atteint immédiatement sa valeur de référence de 1 Wb avec une légère oscillation de 0.01 Wb d'amplitude autour de sa valeur de référence.

Le couple électromagnétique peut être contrôlé en ajustant le courant statorique. Il suit le couple de référence à vide, en appliquant un couple résistant de 10 N.m ou un changeant la vitesse de référence.

La vitesse suit référence. Lorsqu'on applique un couple résistant, elle chute un peu et revient rapidement à sa valeur de référence.



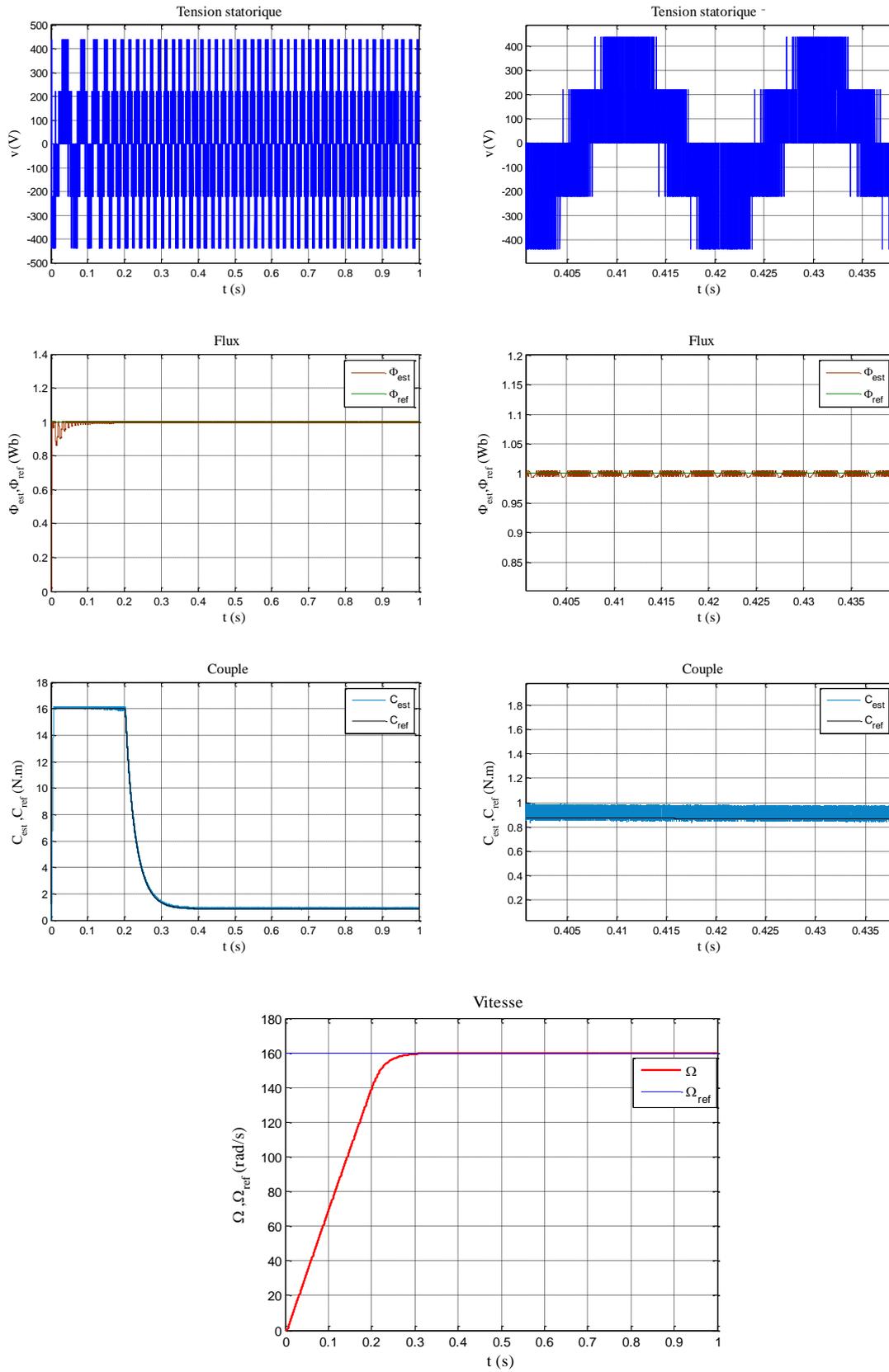
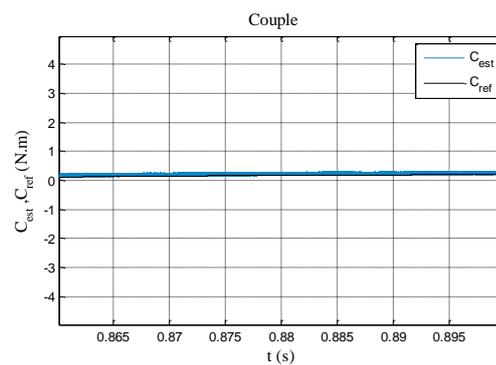
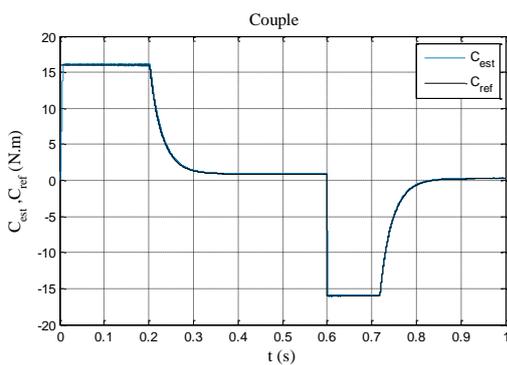
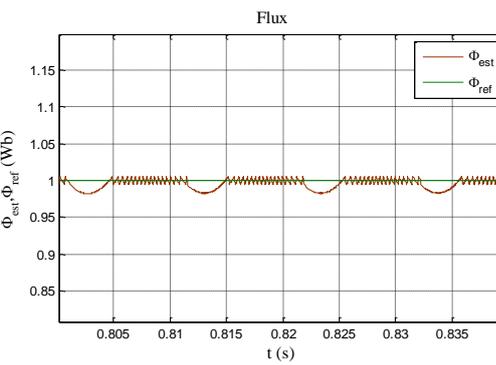
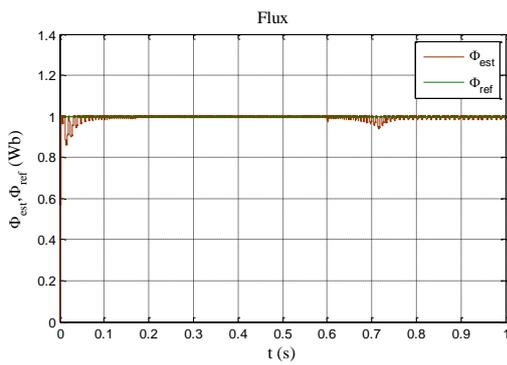
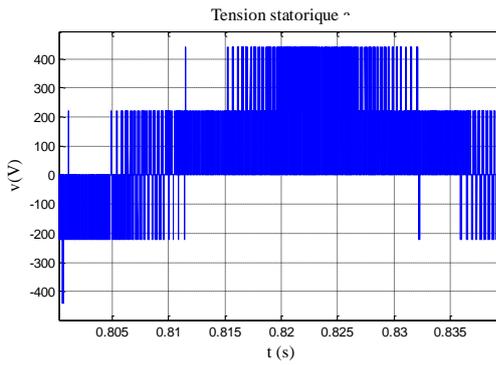
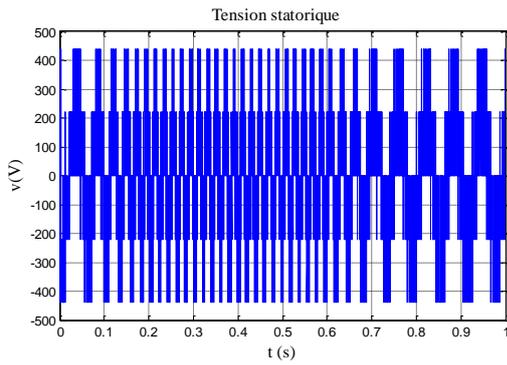
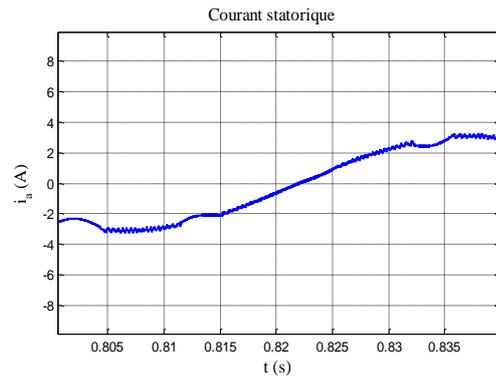
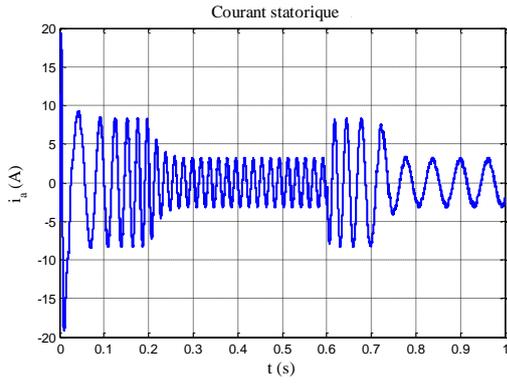
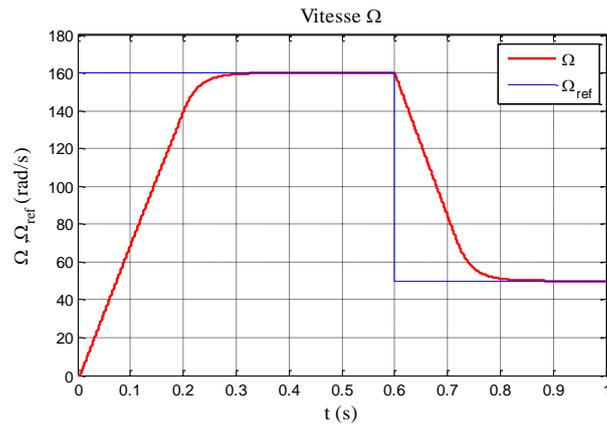
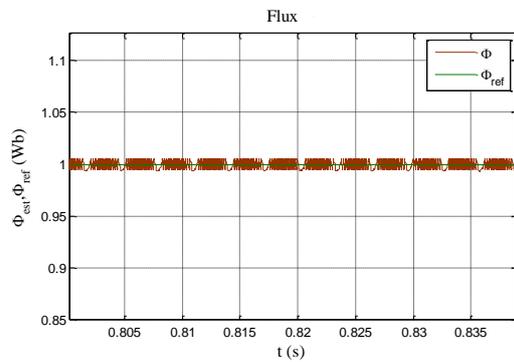
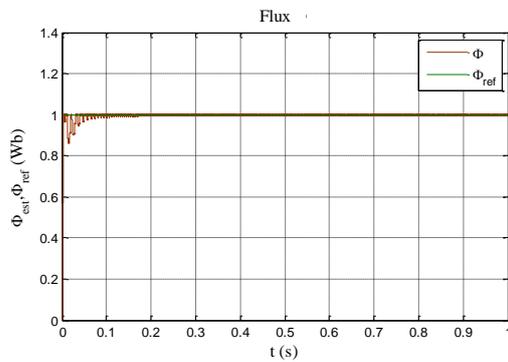
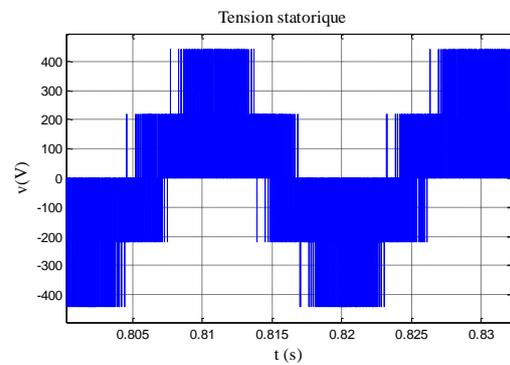
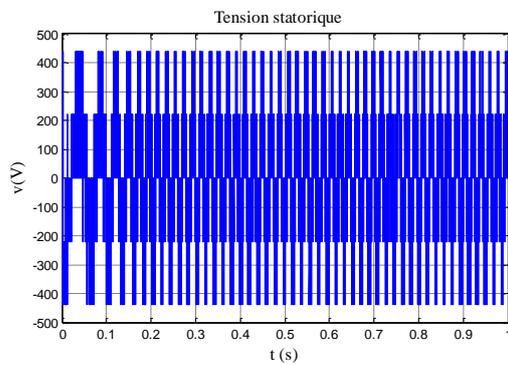
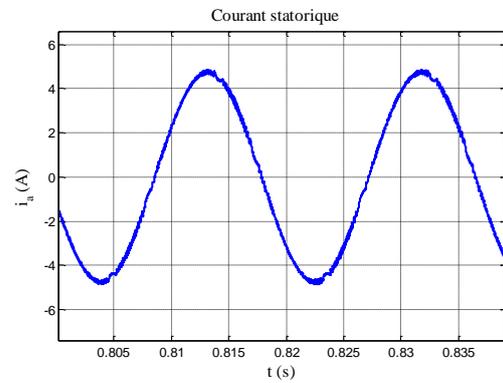
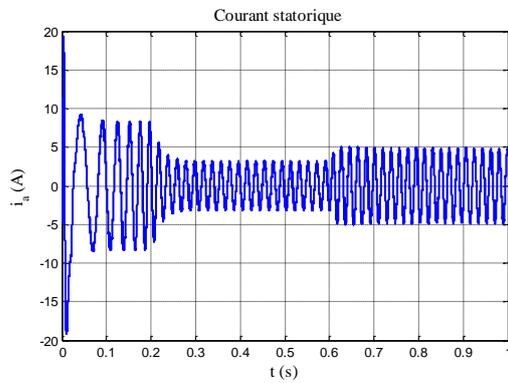


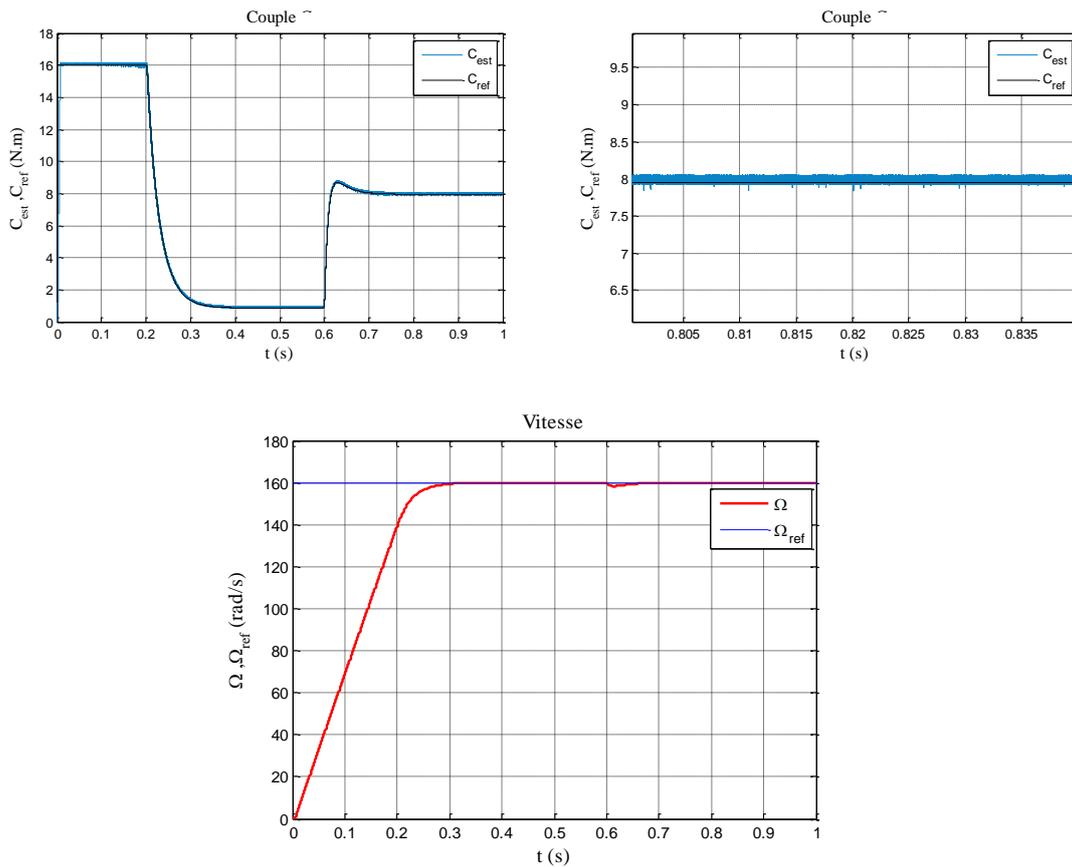
Figure II.7: Résultats de simulation de la commande DTC





**Figure II.8:** Résultats de simulation de la commande DTC, avec changement de vitesse référence à 0.6s





**Figure II.9:** Résultats de simulation de la commande DTC, avec changement de couple résistant à 0.6s

## Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté la commande DTC d'un moteur asynchrone alimenté par un onduleur à deux niveaux. Les résultats obtenus apportent une solution très intéressante aux problèmes de robustesse et de dynamique. La commande DTC est très performante et ne nécessite aucun capteur mécanique pour connaître la position du rotor. L'étude de la structure de commande a été basée sur le choix des bandes d'hystérésis pour diminuer le plus possible l'ondulation du couple et du flux, puisqu'elle cause des vibrations, qui entraîne le vieillissement précoce de la machine. Dans le but de voir les performances de la MAS, une simulation de cette commande a été présentée, les résultats obtenus montrent que la commande DTC offre une réponse rapide et précise du couple électromagnétique et du flux statorique.

## ***Chapitre III***

# ***Application des réseaux de neurones pour la DTC d'une MAS***

## ***Introduction***

Le domaine de recherche en réseaux de neurones a commencé au XXe siècle et était très vaste. Ses origines remontent à la biologie, grâce au travail d'un neurophysiologiste, et dans le but de rivaliser avec les niveaux d'intelligence humaine, il a été développé par des informaticiens et des mathématiciens. Ce domaine vise directement à faciliter la résolution de divers problèmes scientifiques en améliorant la perception, la mémoire et la réflexion. [Aissougui\_23].

Les réseaux neuronaux sont devenus extrêmement puissants grâce aux recherches et aux avancées réalisées par les scientifiques, devenant ainsi les maîtres du monde.

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) suscitent l'intérêt de nombreux scientifiques. Cette situation s'explique par les nombreux avantages qu'offrent les architectures des RNA par rapport aux méthodes algorithmiques classiques plus traditionnelles. Parmi ces avantages figurent la facilité de formation et de généralisation, une architecture simple, ainsi que la possibilité d'approximation des fonctions non linéaires.

Les techniques de contrôle intelligentes, telles que les réseaux de neurones artificiels, sont souvent utilisées pour résoudre les problèmes de non-linéarité et de variations paramétriques des systèmes. Grâce à leur capacité d'apprentissage, les RNA peuvent donner de bons résultats pour le contrôle de MAS. [Bouhafna\_13]

Dans ce chapitre nous présentons les performances de la commande directe du couple de la machine asynchrone en utilisant une technique intelligence artificielle, cette méthode consiste à remplacer les comparateurs classiques et la table de sélection appliqués à la DTC de la MAS par un contrôleur basé sur les réseaux de neurones, afin de bien conduire le flux et le couple vers leurs valeurs de référence.

## ***Historique***

Les premières mentions des réseaux de neurones artificiels remontent à 1943, dans un article historique rédigé par W. McCulloch & W. Pitts. Ils ont réussi à créer le concept du neurone formel, une abstraction du neurone biologique.

En 1949, D. Hebb, dans un ouvrage majeur, a introduit la notion d'apprentissage. Les recherches ont été menées sur les neurones formels, aboutissant à la publication de plusieurs articles à la fin des années 1950. En 1958, F. Rosenblatt a présenté pour la première fois le perceptron. En 1960, le modèle ADALINE a été développé par B. Widrow & T. Hoff.

Pendant la décennie 1970-1980, le nombre d'articles publiés était limité en raison du manque d'intérêt de la part des chercheurs dans ce domaine.

Cependant, au début des années 1980, l'intérêt des chercheurs dans ce domaine a été ravivé, notamment après la publication du travail de J.J. Hopfield en 1982.

### ***III.1/ Théorie des réseaux de neurones***

#### ***III.1.1/ Le neurone biologique***

C'est une cellule qui transmet des signaux électriques et chimiques. Il est également responsable de la transmission des informations dans le corps.

##### ***III.1.1.1/ constitution d'un neurone biologique***

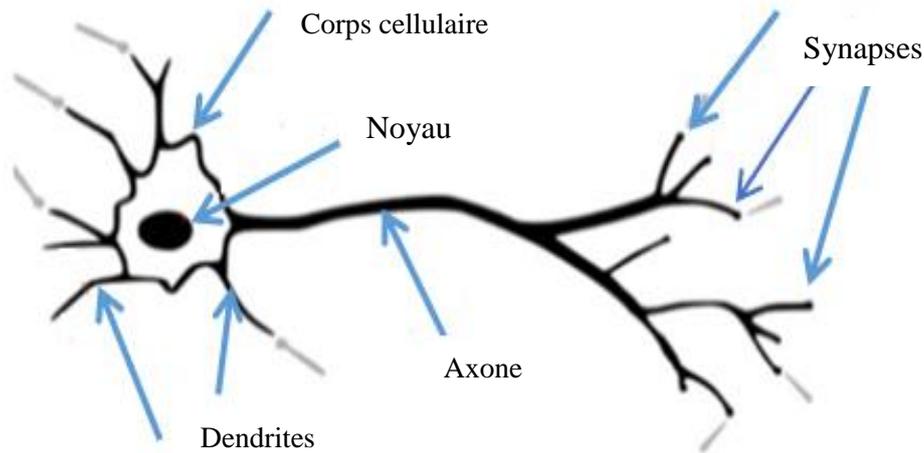
Un neurone biologique comporte quatre éléments principaux qui sont :

***Le corps cellulaire***, c'est l'unité de traitement.

***Les dendrites***, sur lesquelles les autres cellules entrent en contact synaptique, c'est par les dendrites que se fait la réception des signaux.

***L'axone***, où passent les messages accumulés dans le corps de la cellule, l'envoi de l'information se fait par l'axone.

***Les synapses***, par lesquelles la cellule communique avec d'autres cellules, ce sont des points de connexion où passent les signaux de la cellule. [Begag\_20]



**Figure III.1 :** Neurone biologique

### **III.1.1.2/ Principe de fonctionnement d'un neurone biologique**

D'une façon générale, le soma de neurone traite les courants électriques (informations) qui lui proviennent de ses dendrites et qu'il transmet le courant électrique résultant de ce traitement aux neurones auxquelles il est connecté par l'intermédiaire de son axone. D'après le modèle classique, le soma effectuant une sommation des influx nerveux transmis par les dendrites. Si la sommation dépasse un seuil, le neurone répond par un influx nerveux ou potentiel d'action qui se propage le long de son axone. Si la sommation est inférieure à ce seuil, le neurone reste inactif. [Behir\_18].

### **III.1.2/ Le neurone artificiel**

Le neurone artificiel, également connu sous le nom de neurone formel est un modèle mathématique simplifié du neurone biologique, il présente un certain nombre d'entrées, les dendrites, un corps traitant les entrées suivant la méthode du tout ou rien, et un axone véhiculant la réponse du neurone. [bouhafna\_13]

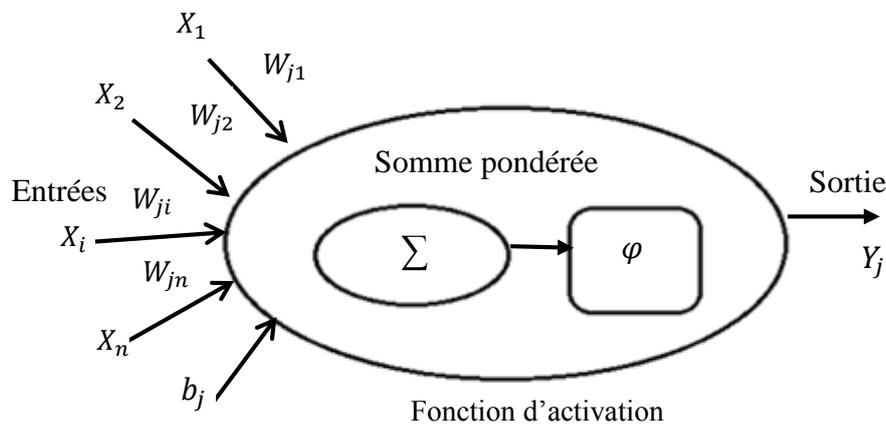
#### **III.1.2.1/ Constitution du neurone artificiel**

L'élément de base d'un réseau de neurones est, bien entendu, le neurone artificiel. Un neurone contient trois éléments principaux:

**Le poids**, qui est le coefficient qui contrôle le signal d'entrée (la force de connexion), en d'autres termes le poids décide l'influence de l'entrée sur la sortie.

**Le biais**, qui se connecte aux neurones de la couche précédente par l'intermédiaire d'un poids, généralement appelé seuil, il est similaire à l'interception ajoutée dans une équation linéaire. C'est un paramètre supplémentaire dans le réseau neuronal qui est utilisé pour ajuster la sortie avec la somme pondérée des entrées du neurone. Ainsi, le biais est une constante qui aide le modèle de manière à ce qu'il s'adapte le mieux aux données.

**La fonction d'activation**, qui est une fonction mathématique responsable du type de l'information émise par le neurone, elle intervient après le calcul de la somme pondérée et l'ajout du biais, elle possède un influe profond sur les performances du réseau. D' où il est préférable de bien choisir le type de cette fonction dans chaque couche du réseau, notons que les neurones d'entrée ne possède pas de fonction d'activation, ils utilisent la fonction identité. [Bourougaa\_20]



**Figure III.2 :** Neurone artificiel

### III.1.2.2/ Analogie entre le neurone biologique et le neurone artificiel

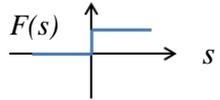
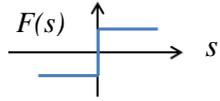
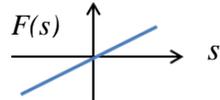
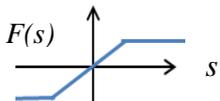
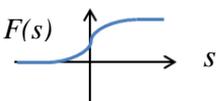
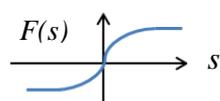
Le tableau (III.1) donne une analogie entre les composants du neurone biologique et celles du neurone artificiel.

| <i>Neurone biologique</i> | <i>Neurone artificiel</i> |
|---------------------------|---------------------------|
| Synapse                   | Poids de connexion        |
| Axone                     | Signal d'entrée           |
| Dendrite                  | Signal de sortie          |
| Somma                     | Fonction d'activation     |

**Tableau III.1 :** transition entre le neurone biologique et le neurone artificiel

**III.1.2.3/ Les fonctions d'activation**

Il y a plusieurs fonctions d'activation qu'on peut utiliser dans les réseaux de neurones :

| <i>Catégorie</i> | <i>types</i>          | <i>Equation</i>   | <i>allure</i>   |
|------------------|-----------------------|---|---|
| Seuil            | Heaviside             | $F(x)=\begin{cases} 0 & \text{si } x < 0 \\ 1 & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$                          |    |
|                  | Signe                 | $F(x)=\begin{cases} -1 & \text{si } x \leq 0 \\ 1 & \text{si } x > 0 \end{cases}$                         |    |
| Linéaire         | Identité              | $F(x)=x$  |    |
|                  | Saturé symétrique     | $F(x)=\begin{cases} -1 & \text{si } x \leq -1 \\ 1 & \text{si } x \geq 1 \\ x & \text{sinon} \end{cases}$ |  |
| Non linéaire     | Sigmoïde              | $F(x)=\frac{1}{1+e^{-x}}$   |  |
|                  | Tangente hyperbolique | $F(x)=\frac{2}{1+e^{-x}} - 1$   |  |

**Tableau III.2 :** Les fonctions d'activations

**III.1.3/ Le réseau de neurone artificiel**

Un réseau de neurones artificiels est constitué de neurones formels interconnectés selon une architecture précise, dans le but d'accomplir diverses tâches. Ces réseaux s'inspirent de la structure biologique du cerveau humain.

### III.1.3.1/ Topologie des réseaux de neurones

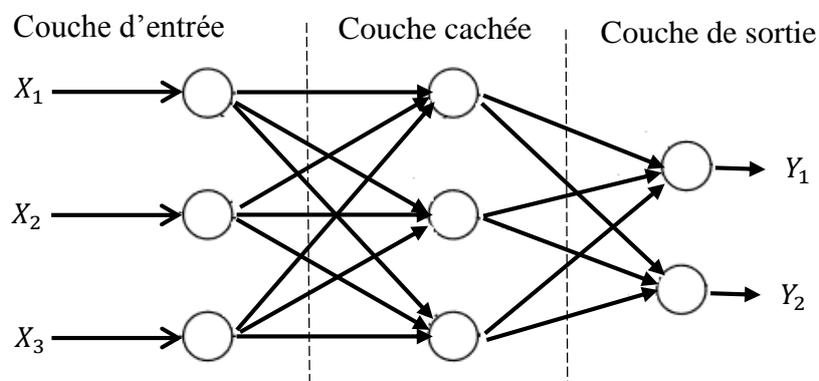
On parle généralement sur l'architecture et la nature de ses connexions.

**Réseaux à couches**, Dans une architecture de réseaux à couches, les neurones cachés sont organisés en couches, les neurones d'une même couche n'étant pas connectés entre eux. [Bouhafna\_13]

Dans un réseau à couches, on identifie trois types de couches distinctes :

La couche d'entrée, composée de neurones d'entrée ou cellules perceptives, qui acquièrent les données externes au réseau avec, la couche de sortie constituée de neurones de sortie, déterminant la sortie finale du réseau. Les couches cachées comprenant des neurones cachés, qui interagissent uniquement avec les autres neurones du réseau et n'ont pas de lien direct avec les données externes.

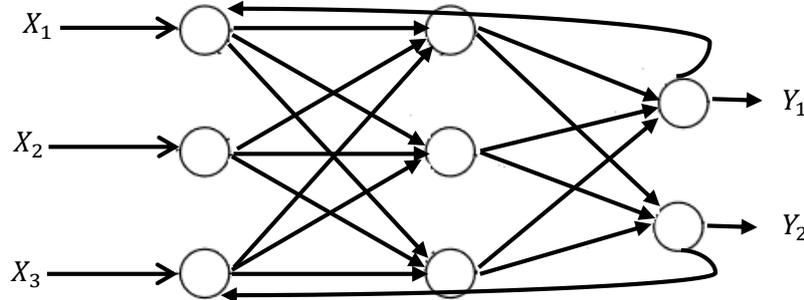
**Les réseaux non bouclés (statique)**, Il s'agit de réseaux unidirectionnels sans rétroaction (feedforward). Le signal de sortie est obtenu directement après l'application du signal d'entrée. Lorsque certains neurones ne sont pas des organes de sortie, on les qualifie de neurones cachés. [Bouhafna\_13]



**Figure III.3** : Réseau non bouclé.

**Les réseaux bouclés (dynamique)**, Il s'agit de réseaux de neurones avec un retour en arrière (feedback network ou récurrent network) où le graphe des connexions est cyclique. Lorsqu'on se déplace dans le réseau en suivant le sens de connexions, il est possible de trouver au moins un chemin qui revient à son point de départ (un tel chemin est désigné sous le terme de « cycle ». La sortie d'un neurone du réseau peut donc être fonction d'elle-même,

cela n'est évidemment concevable que si la notion de temps est explicitement prise en considération [Bouhafna\_13].



**Figure III.4 :** Réseau bouclé

#### **III.1.4/ L'apprentissage**

L'apprentissage d'un réseau de neurones est une période de développement au cours de laquelle le comportement du réseau est ajusté jusqu'à ce qu'il produise les résultats souhaités. Ce processus implique l'utilisation d'exemples comportementaux pour guider l'apprentissage. Pendant cette phase, les poids des connexions entre les neurones sont ajustés. En termes simples, l'apprentissage consiste à mettre à jour ces poids afin que le réseau puisse produire les sorties attendues pour les entrées données. [Bouhafna\_19]

Au niveau des algorithmes d'apprentissage, il existe deux types selon l'intervention ou non d'un superviseur.

##### **III.1.4.1/ L'apprentissage supervisé**

Les algorithmes d'apprentissage supervisé sont généralement des algorithmes qui apprennent à associer certaines entrées à certaines sorties, en utilisant un ensemble d'exemples d'entrées  $x$  et de sorties  $y$ . Dans de nombreux cas, il peut être difficile de collecter les sorties  $y$  automatiquement et elles doivent être fournies par un superviseur humain. Le superviseur compare la sortie réelle du réseau avec la sortie souhaitée pour chaque cas. L'apprentissage est considéré comme terminé lorsque le réseau parvient à reconnaître tous les couples d'entrées et de sorties. [1]

### **III.1.4.2/ L'apprentissage non supervisé**

Cet apprentissage consiste à détecter automatiquement des régularités qui figurent dans les exemples présentés et à modifier des connexions pour que les exemples ayant les mêmes caractéristiques de régularité provoquent la même sortie. [Bouhafna\_02]

### **III.1.5/ Modèle des réseaux de neurones**

#### **III.1.5.1/ Le perceptron**

Le perceptron est un modèle de réseau de neurones artificiels à une seule couche de neurones, utilisé pour la classification binaire supervisée. [Aissougui\_23]. Ils comportent :

Une couche d'entrée constituée de M neurones dont la fonction d'activation est linéaire et  
 Une couche de sortie constituée d'un ou de plusieurs neurones dont la fonction d'activation est binaire.

Le perceptron permet de réaliser, pour chaque neurone de sortie j, une partition des vecteurs d'entrée en deux classes dont la frontière de décision est définie par l'hyperplan d'équation.

$$\sum_{i=1}^M w_{ij} x_i b_j = 0 \quad (\text{III. 1})$$

Il existe deux types de perceptron :

**Le réseau de perceptron monocouche**, c'est le réseau le plus simple en vue de l'architecture et au niveau de sa mise en œuvre, il se compose d'une couche d'entrée et une couche de sortie. Ce réseau est capable de résoudre des problèmes linéairement séparables. [Gana\_16]

**Le réseau de perceptron multicouche**, contient des couches cachées entre la couche d'entrée et celle de sortie, ce réseau résout des problèmes non- linéairement séparables, chaque neurone des couches cachées est connecté à tous les neurones de la couche qui la précède et celle qui la suit.

#### **III.1.5.2/ ADALINE et MADALINE**

L'ADALINE (Adaptive Linear Neurone ou Adaptive Linear Element) ressemble au perceptron, mais il utilise une fonction d'activation linéaire plutôt qu'une fonction échelon. Cette différence permet aux réseaux ADALINE de réduire les interférences entrantes grâce à l'utilisation de la méthode des moindres carrés. [Aissougui\_23].

Dans le cas de plusieurs sorties, il est alors appelé MADALINE (Multiple Adaptive Linear Neurone ou Multiple Adaptive Linear Element).

Comme pour le perceptron, l'ADALINE ne permet de séparer que des exemples linéairement séparables. Les plans séparateurs des classes ont pour équations :

$$\sum_{i=1}^M w_{ij} x_i b_j = 0 \quad (\text{III. 2})$$

### **III.1.5.3/ Réseaux de neurones à fonctions de base radiales**

Les réseaux à fonctions de base radiales (RBF : Radial Basis Functions) sont des réseaux de neurones qui utilisent des fonctions de base radiales comme fonction d'activation, les RBF sont usuellement composées de trois couches, les deux couche d'entrée et de sortie utilisent une fonction d'activation linéaire et la couche cachée utilise une fonction d'activation non linéaire. On trouve les RBF dans de nombreuses applications y compris l'approximation de fonctions, et la classification [Bourougaa\_20].

Il existe plusieurs types de fonctions de base radiales dont la fonction gaussienne est la plus utilisée. Cette fonction a pour expression.

$$\varphi(x) = e^{-\frac{(x-u)^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{III. 3})$$

$\varphi$  : Centre de la fonction.

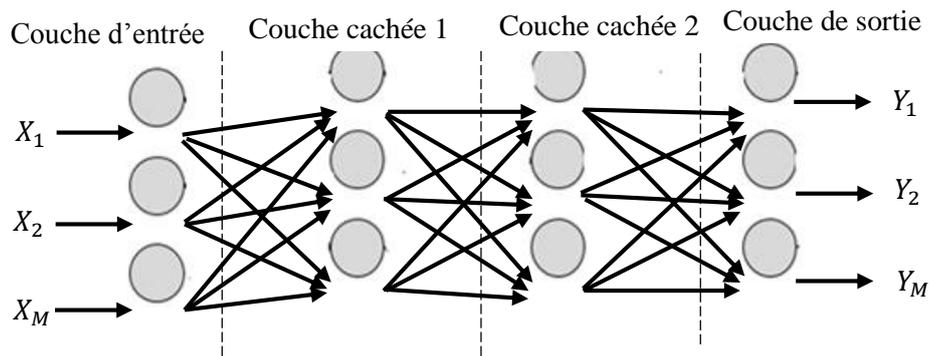
$\sigma$  : Dispersion (qui correspond à la largeur la fonction).

### **III.1.5.4/ Réseau de neurone multicouche à propagation avant**

La structure de ce réseau contient :

Une couche d'entrée constituée de plusieurs neurones de fonction d'activation linéaire avec Une ou plusieurs couche(s) cachée(s) constituée(s) de plusieurs neurones cachés et Une couche de sortie constituée d'un ou de plusieurs neurones de sortie.

L'information circule de l'entrée vers la sortie à travers la (les) couche(s) cachée(s).



**Figure III.5 :** Schéma de réseau de neurones multicouche à propagation avant

### **Apprentissage**

Plusieurs algorithmes itératifs peuvent être mis en œuvre, parmi lesquels on note : l'algorithme de rétropropagation, la Méthode Quasi-Newton, Algorithme de BFGS etc.

**L'algorithme de rétro propagation**, ou de propagation arrière (backpropagation algorithm) est l'exemple d'apprentissage supervisé le plus utilisé. Cette méthode repose sur le calcul du gradient de l'erreur pour chaque neurone du réseau, de la dernière couche vers la première. Soit le couple  $(X, D)$  désignant une donnée d'apprentissage du réseau correspondant respectivement aux  $M$  entrées et  $N$  sorties désirées du système.

$$\begin{cases} X = \langle x_1, \dots, x_M \rangle \\ D = \langle d_1, \dots, d_M \rangle \end{cases} \quad (\text{III. 4})$$

L'algorithme de la rétropropagation consiste alors à calculer l'erreur entre les sorties désirées, et les sorties observées  $Y$  :

$$Y = \langle y_1, \dots, y_N \rangle \quad (\text{III. 5})$$

Le résultat de la propagation vers l'avant des entrées  $X$ , et à rétropropager cette erreur à travers les couches du réseau en allant des sorties vers les entrées.

L'algorithme de rétropropagation procède à l'adaptation des poids neurone par neurone en commençant par la couche de sortie. Soit l'erreur observée  $e_j$  pour le neurone de sortie  $j$  :

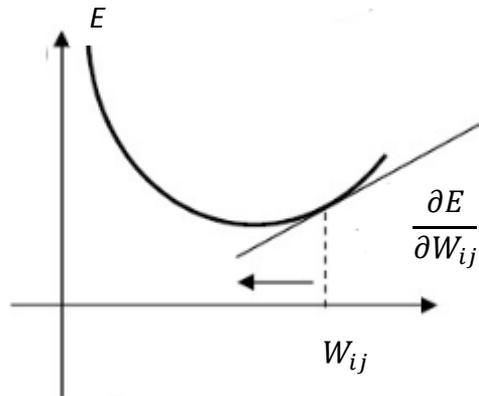
$$e_j = d_j - y_j \quad (\text{III. 6})$$

L'objectif de l'algorithme est d'adapter les poids des connexions du réseau de manière à minimiser la somme des erreurs sur tous les neurones de sortie.

Soit  $E$  la somme des erreurs quadratiques observées sur l'ensemble des neurones de sortie :

$$E = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N e_j^2 \quad (\text{III. 7})$$

Pour corriger l'erreur observée, il faut modifier le poids  $W_{ij}$  dans le sens opposé au gradient de l'erreur  $\frac{\partial E}{\partial W_{ij}}$



**Figure III.6 :** Gradient de l'erreur totale

### **III.2/ Application des réseaux de neurones pour la DTC**

#### **III.2.1/ Principe de la DTC-ANN**

La commande DTC classique présente plusieurs inconvénients, tel que l'obtention d'une fréquence de commutation variable, les ondulations du couple et de flux, les fluctuations des puissances et les harmonique des courants dans le régime transitoire et permanent, à cause de l'utilisation des comparateurs à hystérésis et les tables de commutation.

Pour cela, on propose la commande directe du couple basée sur les réseaux de neurones artificiels, pour améliorer les performances la commandes DTC, où les comparateurs classiques (erreur de flux et erreur du couple) et la table de commutation sont remplacés par un contrôleur neuronal, afin de bien conduire les grandeurs de sortie de la MAS vers leurs valeurs de référence durant une période de temps fixe. Des simulations numériques sont présentées pour tester les performances des méthodes proposées (DTC-ANN). La structure de la DTC-ANN est a présentée dans la figure (III.7). [Benbouhenni\_17]

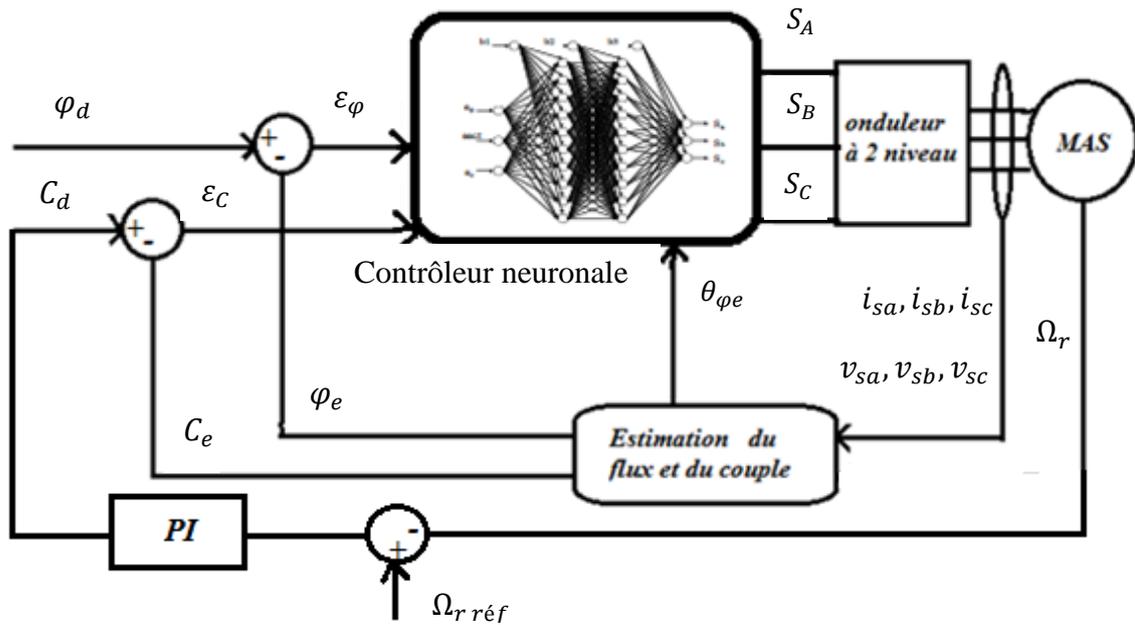


Figure III.7 : La structure de commande DTC-ANN

III.2.2/ La structure du contrôleur neuronale

Pour générer le contrôleur ANN par Matlab/Simulink ou on à choisi 1 couche d'entrée constituée 3 neurones (erreur du flux  $\epsilon_\phi$  et erreur du couple  $\epsilon_c$  et le secteur N) et 2 couches cachées chaque couche est constituée 20 neurones et 1 couche de sortie constituée 3 neurones qui représentée les impulsions  $S_A, S_B, S_C$  des 3 interrupteur avec les fonctions d'activation respectivement de type « tansig » et « purelin ».

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

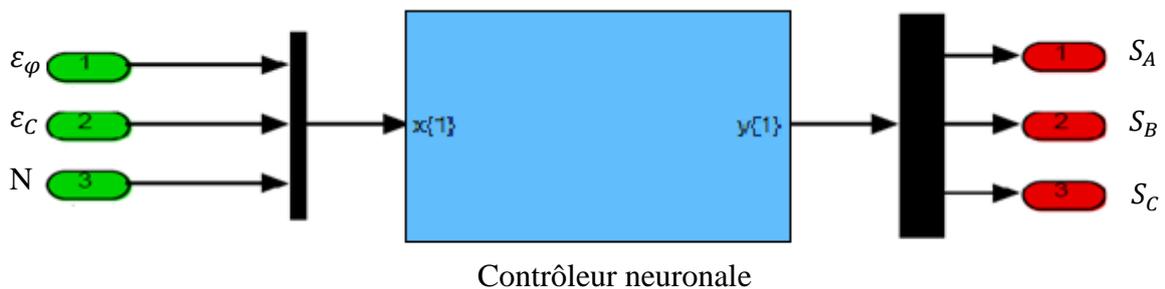


Figure III.8 : Le Schéma de Contrôleur neuronale

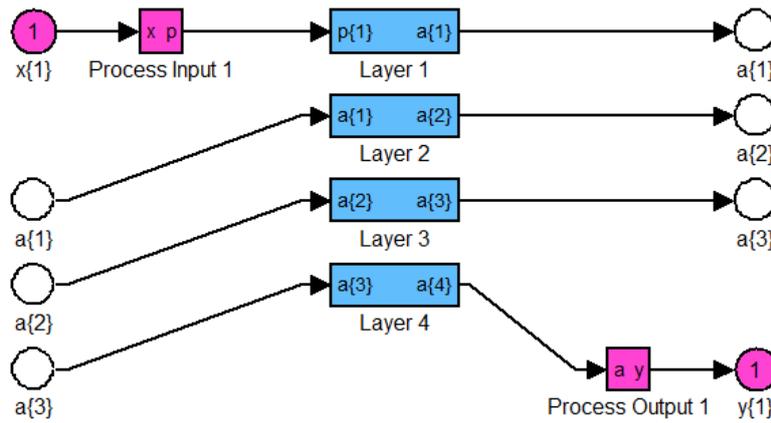


Figure III.9 : La structure interne du contrôleur neuronale

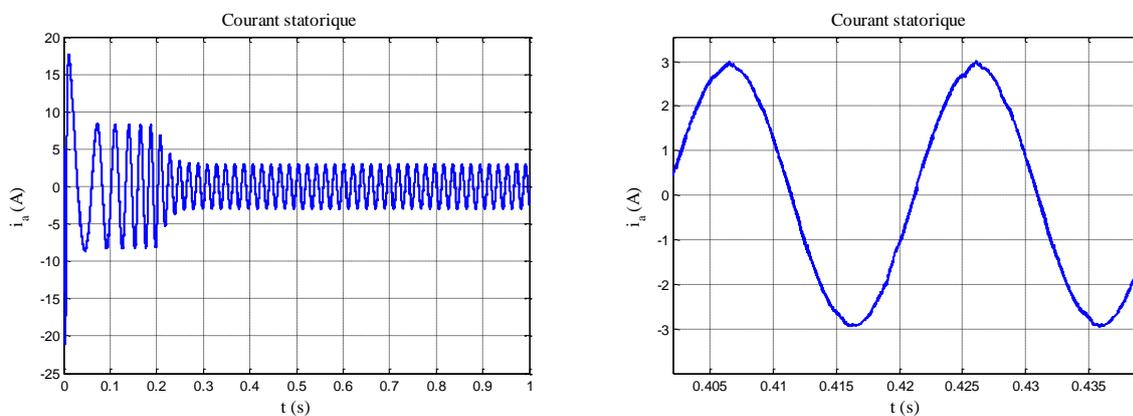
III.2.3/ Paramètres de l’algorithme LM de la DTC-ANN

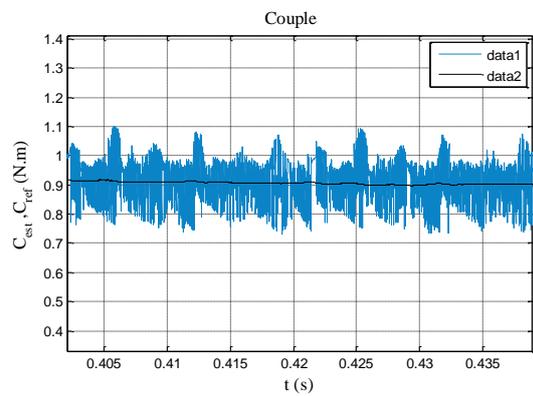
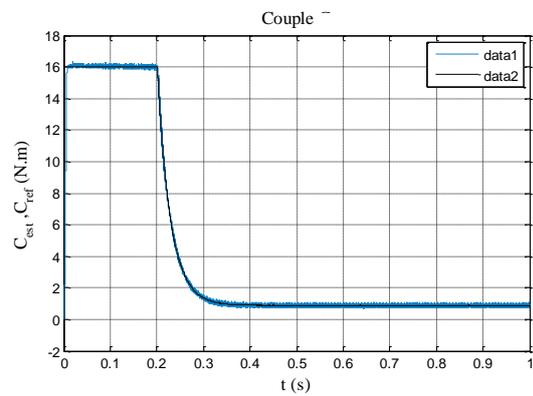
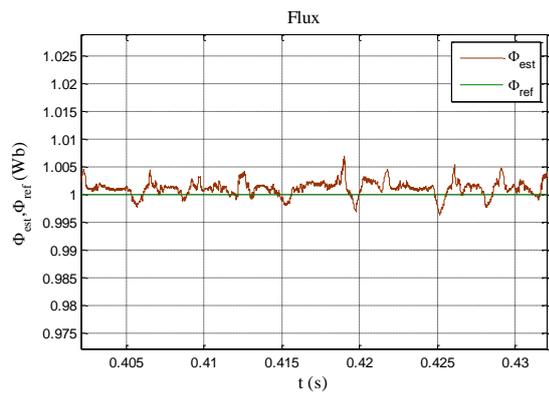
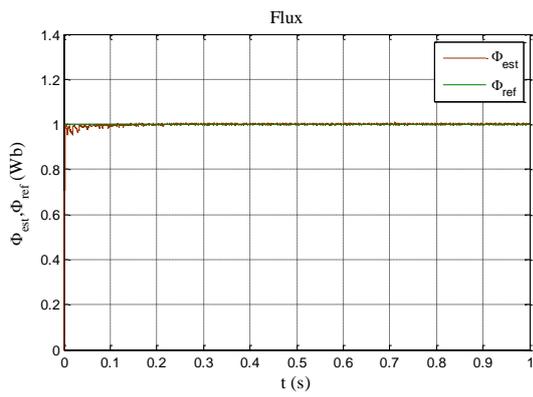
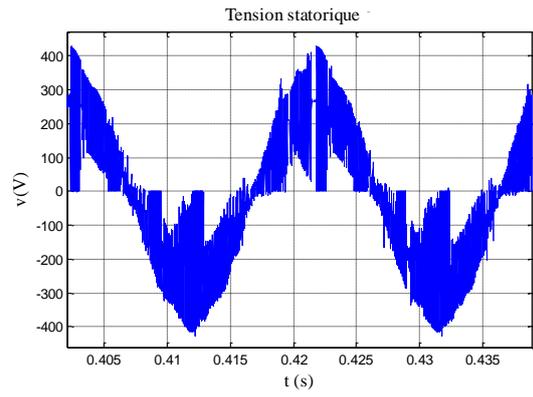
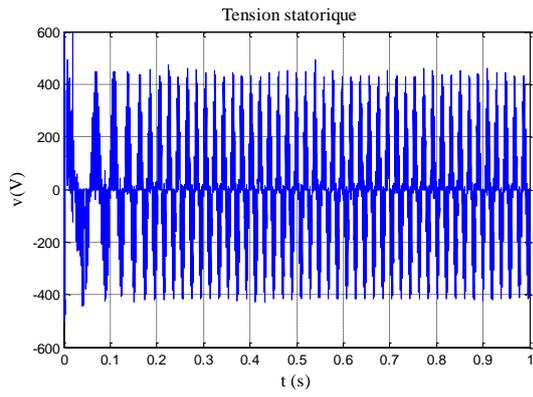
Le tableau (III.3) représente les paramètres utilisés dans Levenberg-Marquardt (LM).

| Paramètres du LM                                     | Valeur          |
|--|-----------------|
| Nombre de couche cachée                              | 2               |
| Pas d’affichage (affichage de l’erreur par morceaux) | 50              |
| Nombre d’itérations (Epochs)                         | 5000            |
| Mu   | 0.001           |
| Erreur (goal)  | 0               |
| Fonctions d’activation                               | Tansig, Purelin |

Tableau III.3: Paramètres de l’algorithme LM pour DTC neuronale

III.2.4/ Résultat de simulation et interprétation





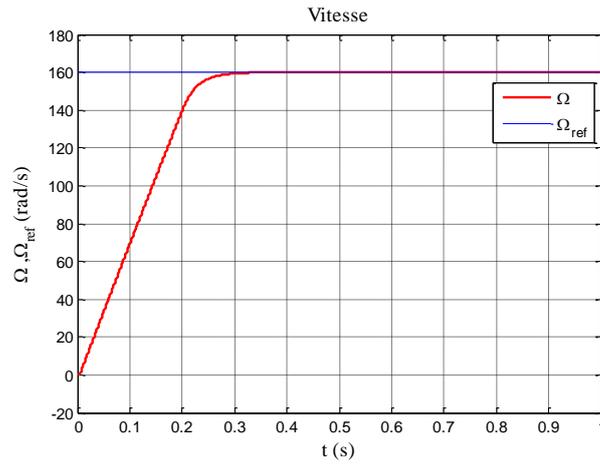
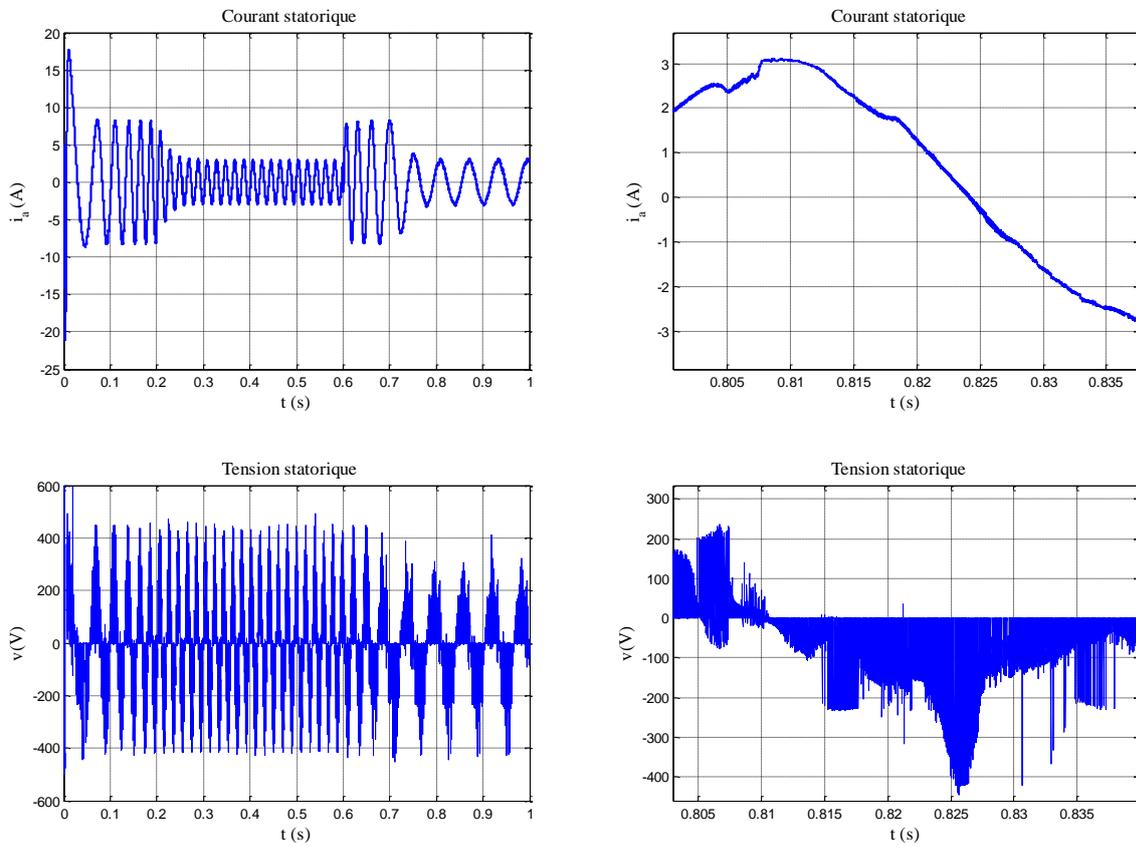
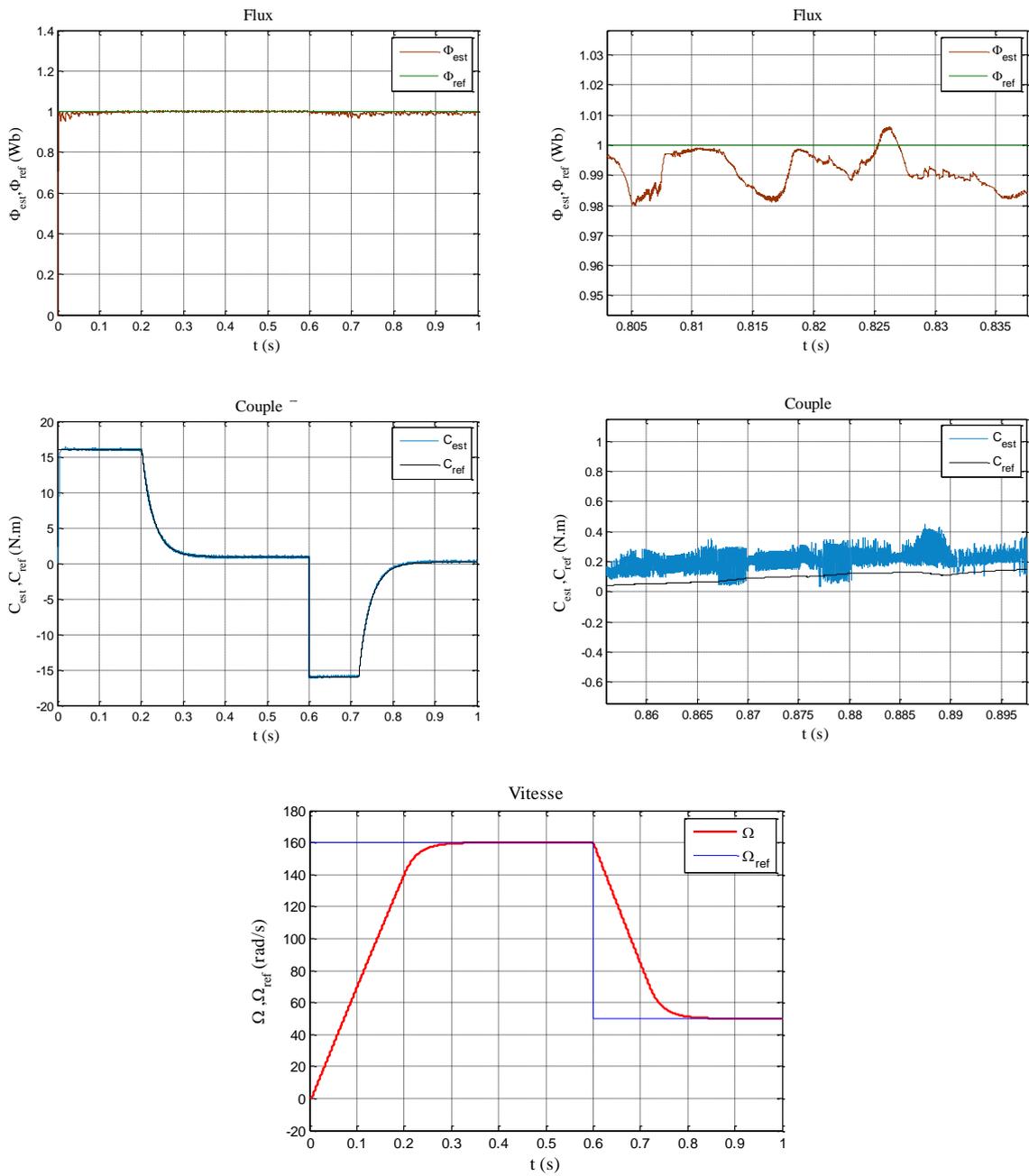
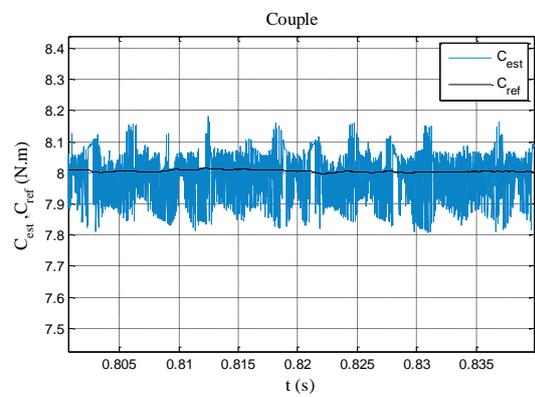
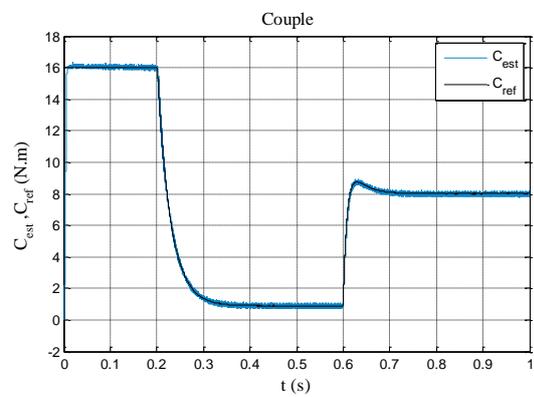
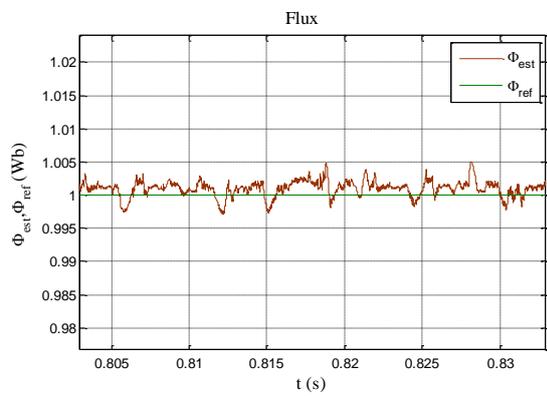
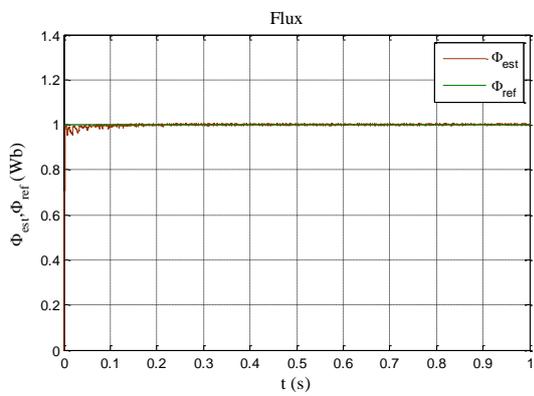
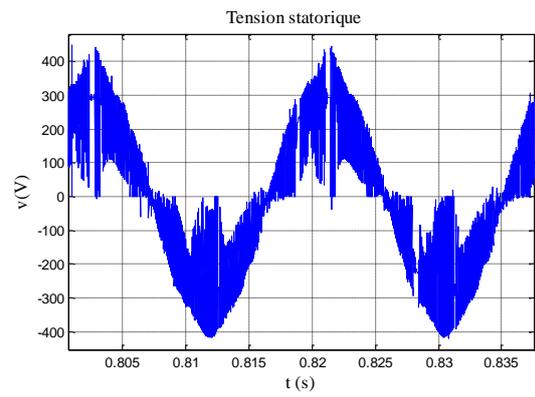
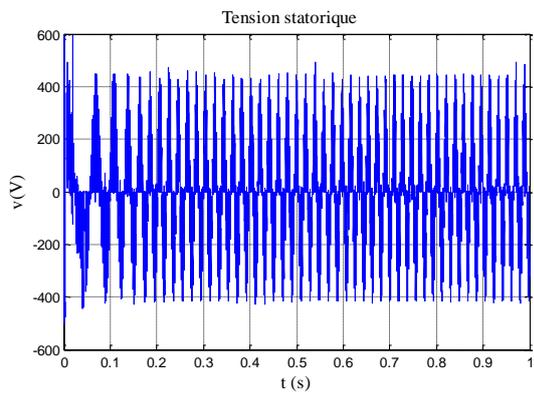
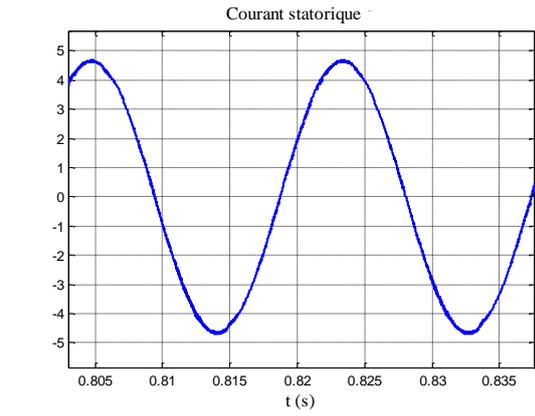
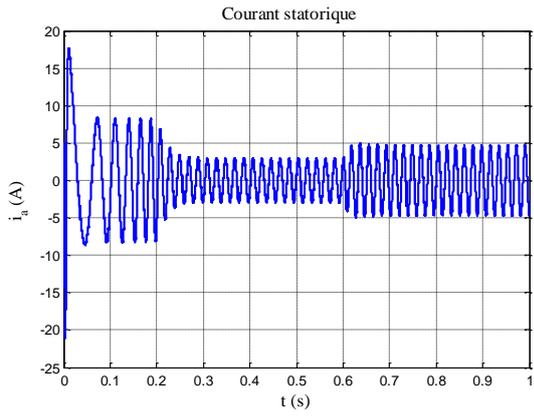


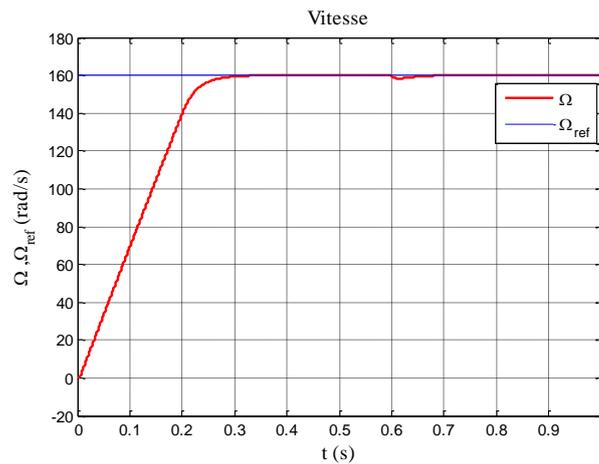
Figure III.10: Résultats de simulation de la commande DTC-ANN





**Figure III.11:** Résultats de simulation de la commande DTC-ANN, avec changement de la vitesse de référence à 0.6s





**Figure III.12:** Résultats de simulation de la commande DTC-ANN, avec changement du couple résistant à 0.6s

Dans la figure du courant statorique, des perturbations apparaissent au démarrage, provoquant des pics pendant un court laps de temps. Après cela, le courant se stabilise dans le régime permanent. Les valeurs du courant changent lorsqu'on varie le couple résistant et la vitesse à 0,6 s.

La tension de sortie de l'onduleur est une tension alternative de forme presque sinusoïdale d'amplitude 400V.

Le flux statorique au régime permanent se stabilise à sa valeur de référence avec une erreur statique faible.

Le couple électromagnétique au régime permanent se stabilise à sa valeur de référence avec une erreur statique faible.

La vitesse de rotation il se stabilise à sa vitesse de référence.

### **III.2.5/ Comparaison entre la DTC classique et la DTC-ANN**

Parmi les inconvénients de la DTC classique, on note les ondulations du couple et du flux, dues à l'utilisation des comparateurs à hystérésis et de la table de commutation. Pour améliorer les performances de la commande DTC classique, elle a été remplacée par la commande DTC-ANN. La forme de la tension pour la DTC-ANN est sinusoïdale, ce qui est préférable par rapport à la forme de tension de la commande DTC classique. Cet avantage est dû à l'utilisation des réseaux de neurones.

Lors de l'entraînement du réseau de neurones, il est possible d'obtenir une erreur non nulle dans les poids, ce qui démontre que le réseau a appris à comprendre les données plutôt qu'à les mémoriser. Ainsi, lorsque les données d'entrée sont modifiées, le réseau de neurones est capable de fournir le résultat souhaité. Nous cherchons donc à réduire l'erreur, et non à la rendre égale à zéro.

A partir de ces résultats, on peut constater que la performance du système, contrôlé par un contrôleur neuronal, est insatisfaisante, malgré l'adaptation en ligne du réseau de neurones. Ce phénomène est dû au fait qu'il n'y a pas une règle générale pour choisir les paramètres du réseau de neurones à savoir (le taux d'apprentissage, le nombre de couches cachées, le nombre de neurones en couche cachée). Il est généralement difficile de déterminer ce choix seulement à partir de la méthode par essai et erreur.

### ***Conclusion***

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principes de base des réseaux de neurones, inspirés par l'étude du cerveau humain. La principale caractéristique des réseaux de neurones est leurs facultés d'adaptation et de mémorisation. Sans connaissance préalable, et au fur et à mesure que leur sont fournis des exemples, les réseaux de neurones se forgent un modèle de connaissance. Les réseaux de neurones sont donc une façon d'élaborer un modèle de connaissance. Des modèles plus complexes ont été développés grâce aux avancées en neurobiologie et à l'utilisation d'outils théoriques plus puissants, tels que l'algorithme de rétropropagation.

On a exposé aussi dans ce chapitre l'amélioration de certaines performances de la commande directe du couple de la machine asynchrone.

Les résultats de simulation ont montré que l'application des réseaux de neurones donne une précision pour le couple et le flux en régime permanent, et donne une erreur faible entre le flux et sa référence aussi que entre le couple et sa référence.

## ***Conclusion général***

Le but visé à travers ce travail était l'étude, la modélisation et la commande, par une technique, de la machine asynchrone alimentée par un onduleur à deux niveaux, par la technique du contrôle direct du couple (DTC) basé sur les réseaux de neurones.

Ce travail comprenait deux techniques différentes qui sont le contrôle direct du couple (DTC) qui s'appelle aussi la DTC classique et la DTC-ANN considérée comme meilleure que la première méthode et améliorant les inconvénients de la DTC classique.

Chaque technique a ses avantages et ses inconvénients. Pour la commande directe du couple classique (DTC), ses principales caractéristiques incluent le réglage de la vitesse variable. Cependant, parmi ses inconvénients, on trouve les fluctuations du couple et du courant. En revanche, la commande directe du couple par réseaux neuronaux (DTC-RNA) souffre principalement de l'incapacité à déterminer le nombre de couches, le nombre de neurone dans chaque couche et l'algorithme pour qu'elle peut apprendre, avec comme avantage notable l'amélioration des performances.

La commande directe du couple (DTC) s'est illustrée par sa simplicité face aux variations de vitesse. Les principes de cette stratégie ont été détaillés, mettant en avant l'importance de commande du flux et du couple. Ce concept représente une solution prometteuse pour résoudre tous les défis rencontrés par d'autres méthodes de contrôle. Des simulations numériques ont été effectuées sous Matlab/Simulink pour valider ces stratégies de contrôle.

En conclusion, il a été démontré que l'intégration des réseaux de neurones dans la commande DTC permet de remplacer avantageusement les comparateurs classiques et les tables de sélection des vecteurs par des contrôleurs neuronaux. Cette approche offre des performances accrues par rapport à la méthode de commande traditionnelle.

Comme perspectives de ce travail, on propose d'appliquer d'autres méthodes de l'intelligence artificielle tel que les réseaux neuro-flou.

*Références*  
*Bibliographie*

[Aissougui\_23]

Aissougui. I, «Modélisation des micromachines/capteurs en utilisant les réseaux de neurones artificiels», Mémoire de fin d'étude, Domaine : Sciences et Technologie, Filière : Électromécanique, Spécialité : Électromécanique, Université 8 Mai 1945 – Guelma, 2023.

[Begag\_20]

BEGAG. M, «Commande DTC-ANN d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents», Mémoire de fin d'étude, Département d'Electrotechnique, Option : Electromécanique, Université AMAR TELIDJI « LAGHOUAT », 2020.

[Bernard\_06]

Bernard. F, « Machines asynchrones - Commande par contrôle direct de couple », article est issu de : Énergies | Conversion de l'énergie électrique, 2006

[Bapio\_10]

Bapio. B, « La machine asynchrone », Formation continue - techniciens supérieurs - ingénieurs électrotechniciens, cours de machine électrique, 2010.

[Bouhafna\_13]

BOUHAFNA. S, «Commande par DTC d'un Moteur Asynchrone Apport des Réseaux de Neurones», Mémoire Magistère en électrotechnique, option : Machines Electriques et commande des systèmes, Licence en Electrotechnique, Université de Batna, 2013.

[Benbouhenni\_17]

Benbouhenni. H, «Etude comparative entre la DTC neuronale à sept niveaux et la DTC neuronale à cinq niveaux de la machine asynchrone. », Département de Génie Electrique Ecole Nationale Polytechnique d'Oran, Algérie, 1st Algerian Multi-Conference on Computer, Electrical and Electronic Engineering (AMCEEE'17), 2017.

[Behir\_18]

Behir. A, «Commande Vectorielle par Réseaux de Neurones Artificiels d'un Moteur Asynchrone», Mémoire de fin d'étude, Département de Génie Electrique, Filière : Electrotechnique, Spécialité : Machines Electriques, UNIVERSITE D'EL-OUED, 2018.

[Bourougaa\_20]

Bourougaa. N, «Application des réseaux de neurone pour la classification des Données», Mémoire de fin d'étude, Département de Génie Electrotechnique et Automatique, Filière : Automatique, Spécialité : Automatique et Informatique Industrielle, 2020.

[Chikhi\_08]

Chikhi. A, «Commande Directe du Couple du Moteur Asynchrone-Apport de la Logique Floue», Mémoire Département d'Electrotechnique Magister en Electrotechnique Option : Maîtrise d'énergie, Ingénieur d'État en Électrotechnique de l'Université de Batna, 2008.

[Gdaim\_13]

Gdaim. S, «Commande directe de couple d'un moteur asynchrone à base de techniques intelligentes». Intelligence artificielle [cs.AI]. Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir. Tunisia, 2013.

[Gana\_16]

Gana. M, «Implémentation d'un réseau de neurones dans un microcontrôleur», Mémoire de fin d'étude, Département d'électronique, Faculté de génie électrique et d'informatique, Option Electronique biomédicale, UNIVERSITE TIZI-OUZOU, 2016.

[Ghers\_06]

Ghers. F, «Application des techniques de commandes intelligentes pour le contrôle d'une machine asynchrone», Mémoire de MAGISTER, Département d'électrotechnique, Option, Commande Electrique, 2006.

[Hechelef\_17]

Hechelef. M, «Commande directe du couple d'une machine asynchrone double étoile sans capteur mécanique par les techniques de l'intelligence artificielle. », Doctorat en science Spécialité : Electrotechnique, Option : Commande des machines électriques, Faculté de Génie électrique, Département d'Electrotechnique, UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES, 2017.

[Hubert\_06]

Hubert. R, «La machine asynchrone à vitesse variable 2 capteurs, modèles, contrôle et diagnostic», Collection sciences et technologies de l'énergie électrique dirigée par Bernard Multan, 2006.

[Lalili\_22]

Lahlili. D, «Commande directe de couple de la machine asynchrone», Master1 Electrotechnique, CE, Entraînements Électriques.

[Lalili\_22]

Lahlili. D, «Commande en MLI vectorielle, Partie : MLI Vectorielle», Master1 Electrotechnique, CE, Entraînements Électriques.

[Madjahed\_23]

Medjahed. B, « Modélisation de la machine asynchrone en régime dynamique », Master1 Electrotechnique, CE, modélisation des machines électriques.

[Meroufel\_09]

Meroufel. A, «Contrôle de la machine asynchrone : Commande scalaire, Commande vectorielle, Commande directe du couple», Faculté des Sciences de l'Ingénieur Département d'Electrotechnique, Université Djillali Liabès –Sidi Bel-Abbès, 2009.

[Mokhtari\_14]

Mokhtari. B, «DTC intelligente appliquée à la commande de la machine asynchrone», Magister en électrotechnique de l'université de Batna Ingénieur d'état en électrotechnique de l'université de Laghouat, 2014.

[Mehimeh\_23]

Mehimeh. A, «Commande directe du couple floue d'une machine asynchrone», Mémoire de fin d'étude, Département d'électrotechnique, SPECIALITE : COMMANDE ELECTRIQUE, UNIVERSITE JJEL, 2003.

[Yantour\_06]

Yantour. H, «Modélisation et simulation d'une commande directe du couple appliquée a la machine asynchrone (DTC) », Laboratoire d'automatique et de productique E.N.S.E.M BP : 8118 oasis Casablanca, Rabat – Maroc, 2006.

[1] [www.deeplearningbook.org](http://www.deeplearningbook.org).