

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DE M'SILA
FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCES DE L'INGENIEUR

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR
D'ETAT EN GENIE ELECTROTECHNIQUE

OPTION : ELECTROMECHANIQUE

THEME

**DETECTION DES DEFAUTS PAR LES RESEAUX DE NEURONES
ARTIFICIELS DE LA MACHINE ASYNCHRONE CONTROLEE PAR
LA TECHNIQUE DU FLUX ORIENTE**

Proposé et dirigé par :

Dr. KHODJA. Djalal eddine.

Présenté par :

Mr. BELKHIRI Ammar.
Mr. TOUNSI Bilal.
Mr. DAHMANI Abbas.

ANNEE UNIVERSITAIRE: 2006/2007

Remerciements

Avant tout on remercie le dieu tout puissant pour Sa générosité de nous donner la santé, la volonté et la patience tout au long de la vie universitaire.

Ensuite, nous adressons nos sincères remerciements à nos enseignants notamment à notre promoteur Mr. Khodja Djalal ed. Qui franchement nous a donné son maximum en vue d'élaborer un très bon mémoire ; sans oublier aussi ses conseils permanents, ses orientations efficaces et sa grande patience.

On tient à exprimer notre profonde gratitude aux membres de jury.

Nous remercions avec sincérité toutes les personnes qui ont nous contribué de près ou de loin à réussir ce travail.

Nos vives salutations.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A Ma très chère mère et mon père

A Mes sœurs

A Mes frères

A toute ma famille

A mes chers amis

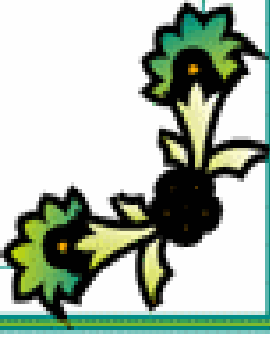
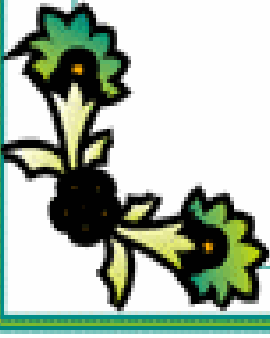
*A tous les amis (es) d'études surtout ceux
d'électromécanique*

Promotion 2007

B.Ammar

T.Bilal

D. Abbas.



SOMMAIRE

Introduction générale	001
-----------------------------	-----

CHAPITRE I

ETUDE DE LA PROBLEMATIQUE DU DIAGNOSTIC DES DEFAILLANCES DE LA MACHINE ASYNCHRONE

I.1- Introduction	003
I.2- Notions sur le diagnostic des défaillances de la machine asynchrone	003
I.2.1- Définitions de quelques termes liés au diagnostic	004
I.2.2- Analyse de la procédure du diagnostic	007
I.3- Constitution de la machine asynchrone	007
I.3.1- Bobinage statorique	009
I.3.2- Bobinage rotorique	010
I.3.3- Les paliers	010
I.4- Présentation des différentes défaillances de la machine asynchrone	010
I.4.1- Défaillance d'ordre mécanique	011
I.4.2- Défaillance d'ordre électrique	012
I.4.3- Signatures en vue de suivi des défauts	015
I.5- Les méthodes de diagnostic	020
I.5.1- Les méthodes internes	021
I.5.1.1- La méthode du modèle	021
I.5.1.2- La redondance analytique et matérielle	022
I.5.2- Les méthodes externes	022
I.5.2.1- Diagnostic par systèmes experts	023
I.5.2.2- Les méthodes de reconnaissance des formes	024
I.5.2.3- Diagnostic par logique floue	025
I.5.2.4- Le diagnostic externe avec les réseaux de neurones	026
I.6- Position du problème à résoudre	026
I.7- Conclusion	027

CHAPITRE II

MODÉLISATION ET SIMULATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE TRIPHASÉE

II.1- Introduction	028
II.2- Généralités sur les machines asynchrones triphasées	029
II.2.1- Définition	029
II.2.2- principes généraux	029
II.3- modélisation de la machine asynchrone	030
II.3.1- Description du modèle	030
II.3.2- Hypothèses simplificatrices	030
II.3.3- Représentation schématique d'un moteur asynchrone triphasé	031
II.3.4- Les équations de la machine asynchrone en régime quelconque	031
II.4- Transformation triphasé – diphasé	034
II.4.1- Transformation de Park	034
a- Equations électriques	037
b- Equations magnétiques	038
c- Equations mécaniques	038
II.4.1.1- Définition des différents référentiels	038
a- Référentiel fixe par rapport au stator	038
b- Référentiel fixe par rapport au rotor	039
c- Référentiel fixe par rapport au champ tournant	040
II.5- Simulation de la machine asynchrone	041
II.5.1- Présentation du logiciel de travail	041
II.5.2- Simulation et interprétation	041
II.6- Conclusion	046

CHAPITRE III

III- COMMANDE VECTORIELLE DE LA MACHINE ASYNCHRONE PRÉSENTANT DES BARRES ROTORIQUE DÉFECTUEUSES

III.1- MODÈLE MULTI ENROULEMENT DE LA MACHINE ASYNCHRONE

III.1.1- Introduction	047
III.1.2- Modèle multi enroulement d'une machine asynchrone	047
III.1.2.1- Calcul des inductances	047
a - Partie Statorique	047
b - Partie Rotorique	049
c- Mutuelle inductances entre stator et rotor	050
III.1.2.2- Mise en équation	051
a - Stator	051
b - Rotor	052
III.1.3- La transformation de (Nr) grandeurs équilibrées vers deux grandeurs (d q) .	054
III.1.3.1- La matrice de résistance du modèle (d q) équivalent	055
III.1.3.2- La matrice d'inductance du modèle (d q) équivalent	057
III.1.4- Simulation du modèle (d q)	058
III.1.5- Modélisation des défauts dans le cas d'une cassure d'une barre ou de deux barres	060
III.1.5.1- Cassures de barres	061
III.1.5.2- Simulation des défauts rotoriques à la présence d'une charge sur l'arbre du moteur	061
<i>III.2- COMMANDE VECTORIELLE DE LA MACHINE ASYNCHRONE</i>	
III.2.1- Introduction	065
III.2.2- Pour quoi la commande vectorielle	065
III.2.3- Modélisation de la machine asynchrone	066
III.2.4- Commande vectorielle de la machine asynchrone	067
III.2.4.1- Equations des tensions	068
III.2.4.2- Méthodes de commande vectorielle des moteurs asynchrones	069
a- Commande vectorielle directe	069
b- Commande vectorielle indirecte par orientation de flux rotorique	069
III.2.5- Résultat de simulation à d'application de la commande vectorielle de la machine asynchrone présente des barres cassées	070
III.3- Conclusion	074

CHAPITRE IV

IV- RÉSEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS

IV.1- Introduction	075
IV.2- Les réseaux de neurones biologiques	075
IV.3- Les neurones artificiels	077
IV.4- Les réseaux de neurones artificiel	081
IV.4.1- Introduction	081
IV.4.2- La nature des cellules	081
IV.4.3- Les mécanismes d'apprentissage	082
IV.4.3.1- Définition	082
IV.4.3.2- Les algorithmes avec apprentissage supervisé	082
IV.4.3.3- Les algorithmes avec apprentissage non supervisé	082
IV.4.3.4- Les principales règles d'apprentissage	082
IV.4.4- Les mécanismes de classification	084
IV.4.5- Les mécanismes de mémorisation	084
IV.4.6- La structure des connexions	085
IV.4.6.1- Les réseaux bouclés	085
IV.4.6.2- Les réseaux non bouclés (réseaux à couches)	086
IV.4.6.3- L'algorithme de rétropropagation	090
IV.5- Application des réseaux de neurones pour le diagnostic des défaillances des machines asynchrones	092
IV.5.1- Introduction	092
IV.5.2- Analyse de la problématique et Choix du type de RNA	092
IV.5.3- Choix du type d'algorithme d'apprentissage	093
IV.6- Conclusion	093

CHAPITRE V

V- ELABORATION DU SYSTÈME AUTOMATIQUE DE DIAGNOSTIC DES DÉFAUTS D'UNE MACHINE ASYNCHRONE

V.1- Introduction	094
V.2- Description de l'architecture du système automatique de diagnostic des Défaillances	094

V.2.1- Sous-système d'acquisition, de conversion et de traitement de l'information (SACI- MTI)	095
V.2.2- Sous-système d'interprétation de l'information	097
V.2.2.1- Système d'aide à la décision	097
V.2.3- Les fonctions du sous-système d'interprétation de l'information	098
V.3- Elaboration du module d'interprétation des informations	098
V.3.1- Choix des variables d'entrées de RNA (les paramètres représentatifs des défauts)	098
V.3.2- Acquisition des données (base d'apprentissage)	098
V.3.2.1- Construction de la base d'apprentissage du RNA	099
V.3.3- Construction du bloc de RNA	100
V.3.4- Apprentissage des réseaux de neurones sélectionnés	102
V.4- Résultats d'essais des réseaux sélectionnés	102
V.5- Tests des RNA sur le nouvel exemple	104
V.5.1 - Interprétation des résultats	108
V.6 - Localisation des défaillances	108
V.6.1- Détection d'une défaillance et détermination de son code	109
V.6.2- Localisation de l'endroit d'apparition des défaillances par le système d'aide à la décision	110
V.7- Conclusion	111
<hr/>	
Conclusion générale	112

TABLE DE FIGURES

CHAPITRE I

Figure (I.1) : Architecture générale d'un système de supervision en ligne (Basseville et al. 1996)

Figure (I.2) : Diagramme des différents concepts de maintenance

Figure (I.3) : Représentation schématique de la machine asynchrone

Figure (I.4) : Représentation schématique du stator

Figure (I.5) : Représentation schématique du rotor

Figure (I.6) : Proportion des défauts de la machine asynchrone

Figure (I.7) : L'excentricité dynamique et statique

Figure (I.8) : Schéma descriptif d'une barre et une portion d'anneaux

Figure (I.9) : Rupture d'une et de deux portions d'anneaux

Figure (I.10) : L'excentricité statique et dynamique

Figure (I.11) : Synoptique de classement des méthodes de diagnostic

Figure (I.12) : Principe de fonctionnement de la méthode du modèle

Figure (I.13) : Principe de fonctionnement de la méthode de redondance analytique

Figure (I.14) : Architecture générale d'un système expert de diagnostic

Figure (I.15) : Procédure de diagnostic basée sur la technique de la reconnaissance des formes

CHAPITRE II

Figure (II.1) : Représentation des enroulements statoriques et rotoriques

Figure (II.2) : modèle d'une phase avec f.e.m.

Figure (II.3) : Repérage angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique

Figure (II.4) : Représentation des enroulements fictifs d'axes d et q

Figure (II.5) : simulation de la machine asynchrone lié au stator dans un régime sain

Figure (II.6) : simulation de la machine asynchrone lié au champ tournant dans un régime sain

Figure (II.7) : simulation de la machine asynchrone lié au rotor dans un régime sain

CHAPITRE III

Figure (III.1) : structure du rotor

Figure (III.2) : Induction magnétique produite par une maille du rotor

Figure (III.3) : Représentation d'une maille rotorique.

Figure (III.4) : projection du modèle multi enroulement sur le modèle dq

Figure (III.5) : Vitesse (moteur sain).

Figure (III.6) : Couple (moteur sain).

Figure (III.7) : Courant statorique (moteur sain).

Figure (III.8) : Vitesse au démarrage, en charge puis lors de la rupture des barres

Figure (III.9) : Couple au démarrage, en charge puis lors de la rupture des barres

Figure (III.10) : Courant au démarrage, en charge puis lors de la rupture des barres

Figure (III.11) : Courant dans les quatres barres voisines, au démarrage, en charge puis lors de la rupture de la barre ($k=0$) à 1s et de la barre ($k=1$) à 1.6s

Figure (III.12) : Transformation de Park

Figure (III.13) : Régulation de vitesse par la commande vectorielle indirecte

Figure (III.14) : Simulation de la commande vectorielle à inversion du sens de rotation avec cassure de barre

CHAPITRE IV

Figure (IV.1) : schéma simplifié d'un neurone du cerveau humain.

Figure (IV.2) : modèle du neurone de Mc CULLOCH et PITTS

Figure (IV.3) : fonction de seuillage avec un sommateur

Figure (IV.4) : modélisation générale d'un neurone

Figure (IV.5) : modèle d'apprentissage de la connexion w_{ij} entre deux neurones.

Figure (IV.6) : séparation de deux classes avec adaptateur linéaire.

Figure (IV.7) : réseau de neurones entièrement connectés (réseau bouclé)

Figure (IV.8) : Réseau de neurones multicouches (non bouclés)

Figure (IV.9) : Algorithme d'apprentissage par rétropropagation.

CHAPITRE V

Figure (V.1) : Architecture du système automatique de diagnostic des défaillances

Figure (V.2) : Structure du RNA réseau à étudier (les valeurs indicatrices sont les valeurs efficaces)

Figure (V.3) : Principe de classification des signaux des défaillances

Figure (V.4.a) : Evolution de l'erreur quadratique moyenne du RNA n° (1)

Figure (V.4.b) : Evolution de l'erreur quadratique moyenne du RNA n° (3)

Figure (V.4.c) : Evolution de l'erreur quadratique moyenne du RNA n° (4)

Figure (V.5) : Test des sorties du RNA°3 en présence de défaut(déséquilibre monophasé

Figure (V.6) : Test des sorties du RNA°3 en présence de défaut(Coupure monophasée)

Figure (V.7) : Test des sorties du RNA°3 en présence de défaut(Coupure triphasée)

Figure (V.8) : Détection d'une défaillance et détermination de son code

Figure (V.9) : Localisation de l'endroit d'apparition des défaillances par le système d'aide à la décision

LES TABLEAUX

CHAPITRE V

Tableau (V.1) : Classification des types des défauts.

Tableau (V.2) : Différents essais d'apprentissage des RNA.

Tableau (V.3) : Résultats de simulation (test) du RNA (déséquilibré monophasé pour différentes Charges) .

Tableau (V.4) : Résultats de simulation (test) du RNA (coupure monophasé pour différentes charges)

Tableau (V.5) : Résultats de simulation (test) du RNA (coupure triphasée pour différentes charges)

INTRODUCTION GENERALE

2006 / 2007

INTRODUCTION GÉNÉRALE

*L*e diagnostic des machines électriques s'est fortement développé dans le monde industriel. Le travail proposé s'attarde sur le diagnostic des machines asynchrones triphasées. La machine asynchrone, de par sa construction, est la machine la plus robuste et la moins chère du marché. A titre d'exemple, aux Etats-Unis, 70 millions de moteurs asynchrones sont fabriqués chaque année pour une population d'environ 300 millions de personnes. Toute proportion gardée, il est clair ces moteurs nous conduisent à porter une attention de plus en plus sérieuse quant-à leur fonctionnement et leur disponibilité.

Par ailleurs, nous nous sommes particulièrement intéressé aux défaillances des moteurs asynchrones à cage d'écureuil vu, d'une part, la difficulté du diagnostic (armature tournante) et, d'autre part, la place qu'occupe cette machine à tous les niveaux de puissance. A cet effet, le présent travail s'articule sur cinq chapitres suivants :

Le premier chapitre de ce document rappelle le contexte de l'étude: le diagnostic de défaut dans les machines asynchrones. Nous donnons dans un premier temps une introduction sur le diagnostic. Dans un deuxième temps nous présentons les éléments de constitution de cette machine en précisant les différents défauts pouvant survenir sur chacun deux (causes et effets). Nous terminons ce chapitre par une analyse des différentes techniques de diagnostic existantes en présentant leurs points faibles et leurs points forts.

Dans le deuxième chapitre de ce travail nous avons fait la modélisation de la machine asynchrone en régime sain.

En effet, nous avons modélisé la machine dans le repère de Park, la modélisation sera détaillée depuis les équations du modèle triphasé jusqu'à l'obtention des équations finales.

Et par la suite sa simulation avec les trois référentiels (lié au stator, lié au rotor et lié au champ tournant), à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK. en alimentant la machine par une source alternative triphasée.

Le troisième chapitre sera consacré à la modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil en régime de défauts (défauts rotoriques).

En choisissant l'approche analytique globale basée sur la signature des grandeurs externes telles que (courant, couple, vitesse,...etc.), pour cela, nous avons utilisé la commande vectorielle et un schéma multi enroulement équivalent à la cage qui s'adapte bien au problème posé et où les équations sont écrites dans un référentiel lié au rotor, vu que les défauts envisagés se situent à son niveau.

Puis, nous avons fait la transformation du modèle de Nr grandeurs au modèle dq équivalent, pour faciliter sa simulation.

Donc : dans ce chapitre nous abordons le problème de la machine asynchrone présentons des défaillances de structure. Nous nous intéressons, plus spécialement, à la rupture de barres rotoriques et à son impact sur le fonctionnement de la machine aussi bien en régime non commandé qu'en contrôle vectoriel pour une régulation de vitesse.

Dans les deux derniers chapitres de ce travail nous faisons appel à une technique d'intelligence artificielle pour effectuer le diagnostic.

Et pour parvenir au dernier chapitre, qui se résume dans la manière avec laquelle nous présentons la réalisation d'un système de diagnostic automatique des défauts de la machine asynchrone, en appliquant la méthode des réseaux de neurones artificiels .

Nous terminons par une conclusion sur l'ensemble de cette étude et nous proposons des perspectives de travail.

L'annexe contient les paramètres des machines étudiées.

CHAPITRE I

DIAGNOSTIC des DEFAILLANCES de la MACHINE ASYNCHRONE

I- ETUDE DE LA PROBLEMATIQUE DU DIAGNOSTIC DES DEFAILLANCES DE LA MACHINE ASYNCHRONE

I.1- INTRODUCTION

De nombreuses défaillances peuvent apparaître sur les machines asynchrones. Elles peuvent être électriques, mécaniques ou magnétiques. Leurs causes, très variées, sont classées en trois groupes:

- *les initiateurs de défauts : surchauffe du moteur, usures des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations, problème d'isolation électrique, surtension transitoire...*
- *les contributeurs aux défauts : surcharge fréquente, température ambiante élevée, ventilation défaillante, humidité, fortes vibrations, vieillissement...*
- *les défauts sous jacents et erreurs humaines : défauts de fabrication, composants défectueux, protections inadaptées, absence de maintenance...*

Ces différentes causes peuvent provoquer une dégradation des performances ou des arrêts intempestifs du système. Le diagnostic précoce des pannes est donc nécessaire.

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés aux différents défauts qui peuvent altérer le fonctionnement normal de la machine asynchrone, sans être exhaustif, nous présenterons les principales pannes et dysfonctionnements ainsi que leurs causes. En effet, les défauts de la machine asynchrone peuvent avoir des causes variées, ils peuvent être dus au vieillissement des différents constituants ou bien aux conditions d'utilisation ou encore tout simplement à un défaut de fabrication dont l'effet serait imperceptible lors de la mise en service.

Nous aborderons par la suite les signatures des différents défauts sur les grandeurs et paramètres de la machine asynchrone, nous terminerons ce chapitre par des différentes méthodes de diagnostic.

I.2- Notions sur le diagnostic des défaillances de la machine asynchrone

Les arrêts forcés de production suite à des pannes de machines peuvent devenir coûteux et représenter une part importante de l'investissement initial.

L'absence d'une stratégie de maintenance peut causer la perte d'éléments et une diminution de la sécurité, d'où son intérêt stratégique.

I.2.1- Définitions de quelques termes liés au diagnostic [ZEM 03]

☀ *Dégradation*

Une dégradation représente une perte de performances d'une des fonctions assurées par un équipement.

Si les performances sont au-dessous du seuil d'arrêt défini dans les spécifications fonctionnelles de cet équipement, il n'y a plus dégradation mais défaillance.

☀ *Défaillance*

Une défaillance est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques.

On peut classer les défaillances selon leur degré de sévérité par :

- *Défaillance critique* : nécessite une intervention d'urgence,
- *Défaillance significative* : nécessite un processus de traitement,
- *Défaillance absorbable* : pouvant être ignorée dans un premier temps.

☀ *Panne*

Une panne est l'inaptitude d'une entité (composant ou système) à assurer une fonction requise.

Si nous écartons la possibilité d'erreurs de conception, la définition précédente implique que toute défaillance entraîne une panne. La défaillance correspond à un événement et la panne à un état. Sur le plan temporel, la défaillance correspond à une date et la panne à une durée comprise entre la date d'occurrence de la défaillance et la date de fin de réparation.

☀ *Surveillance*

La surveillance est un dispositif passif, informationnel qui analyse l'état du système et fournit des indicateurs. La surveillance consiste notamment à détecter et classer les défaillances en observant l'évolution du système puis à les diagnostiquer en localisant les éléments défaillants et en identifiant les causes premières.

La surveillance se compose donc de deux fonctions principales qui sont la détection et le diagnostic. La Figure (I.1) montre une architecture générale d'un système de surveillance.

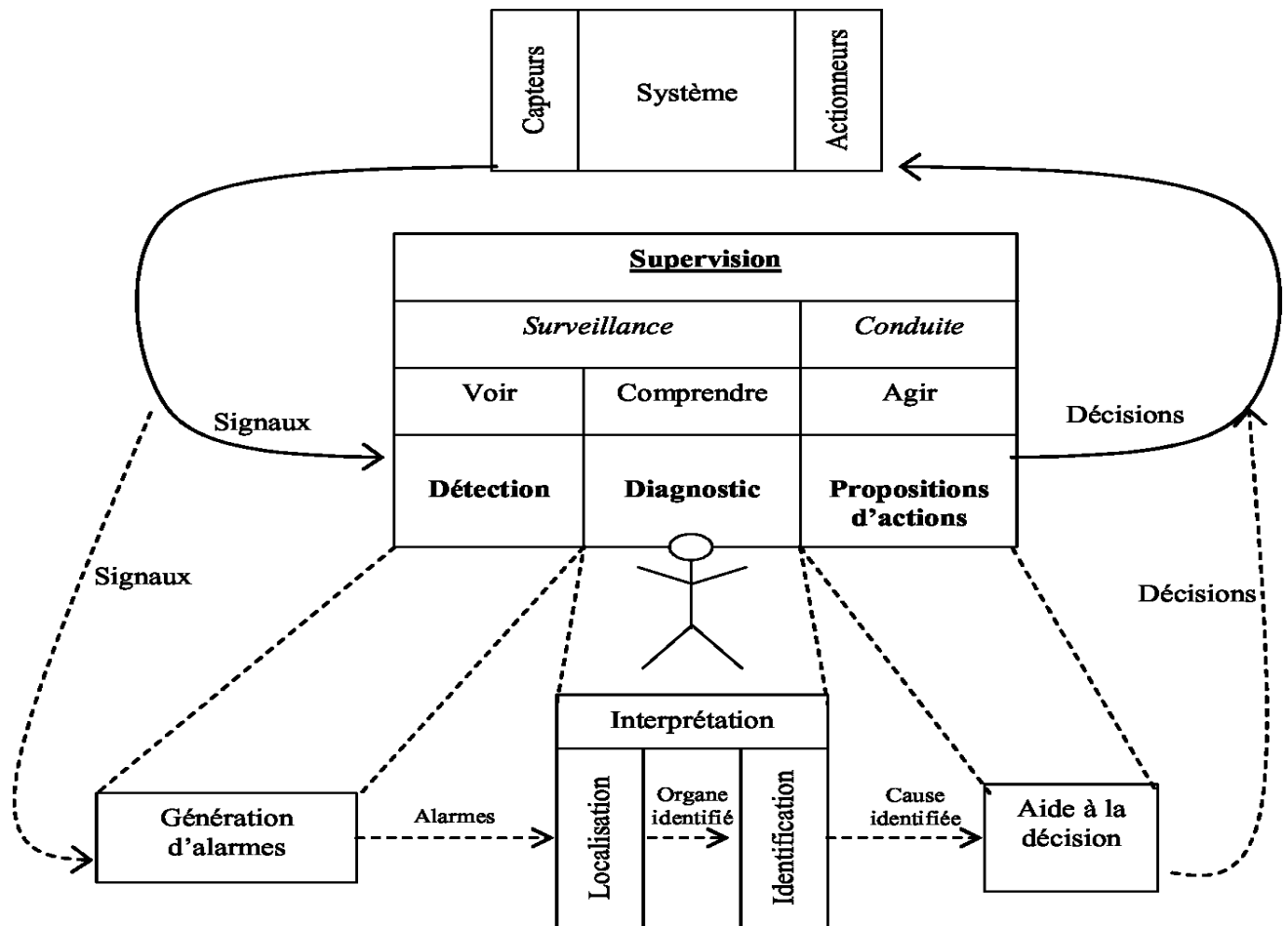


Figure (I.1): Architecture générale d'un système de supervision en ligne
(Basseville et al. 1996)

✶ Maintenance

Qui a pour objet d'optimiser le remplacement ou la réparation d'équipements usés ou défectueux. On peut citer trois types de maintenance:

- **Maintenance corrective** : intervient après la détection et la localisation d'un défaut.
- **Maintenance préventive** : Maintenance effectuée dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu. C'est une intervention de maintenance prévue, préparée et programmée avant la date probable d'apparition d'une défaillance. Le plus souvent elle est systématique, c'est-à-dire une maintenance préventive effectuée selon un échéancier établi suivant le temps ou le nombre d'unités d'usage.

La figure (I.2) représente le diagramme des différents concepts de maintenance et les évènements associés

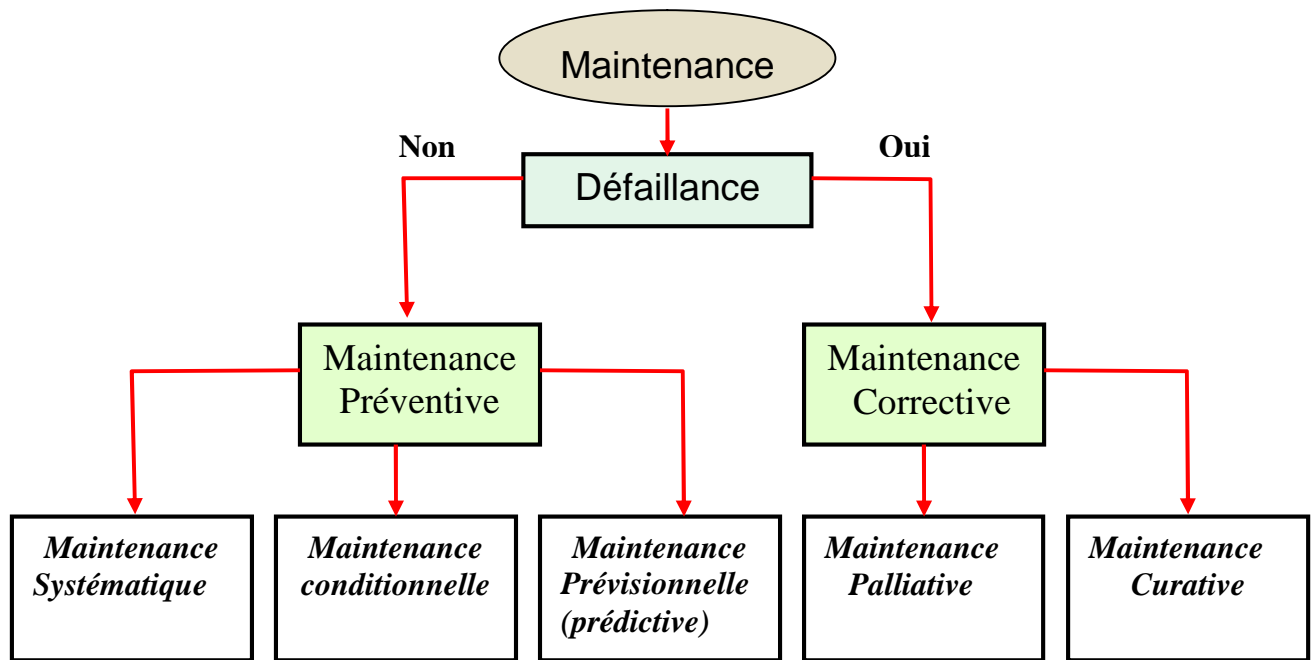


Figure (I.2): Diagramme des différents concepts de maintenance

✦ *Détection*

Pour détecter les défaillances du système, il faut être capable de classer les situations observables comme étant normales ou anormales.

Cette classification n'est pas triviale, étant donné le manque d'information qui caractérise généralement les situations anormales. Une simplification communément adoptée consiste à considérer comme anormale toute situation qui n'est pas normale.

✦ *Diagnostic*

L'objectif de la fonction diagnostic est de rechercher les causes et de localiser les organes qui ont entraîné une observation particulière.

Cette fonction se décompose en deux fonctions élémentaires : localisation et identification. À partir de l'observation d'un état de panne, la fonction diagnostic est chargée de retrouver la faute qui en est à l'origine. Ce problème est difficile à résoudre. En effet si, pour une faute donnée, il est facile de prédire la panne résultante, la démarche inverse qui consiste à identifier la faute à partir de ses effets, est beaucoup plus ardue. Une défaillance peut.

✦ *Localisation*

La localisation permet de déterminer le sous-ensemble fonctionnel défaillant.

✧ *Identification de la cause*

Cette dernière étape consiste à déterminer les causes qui ont mené à une situation anormale.

Ces causes peuvent être internes (sous-ensembles défaillants faisant partie de l'équipement), ou bien externes à l'équipement.

I.2.2- Analyse de la procédure du diagnostic

Lorsqu'un défaut apparaît dans un équipement industriel, le système de diagnostic lié à ce dernier doit d'abord détecter l'anomalie du fonctionnement puis y identifier la (ou les) cause (s) de défaillance à l'aide d'un raisonnement logique pour qu'il puisse être isolé.

En effet, l'organisation générale de la procédure de diagnostic s'articule autour des étapes suivantes :

- A partir des moyens de mesure ou d'observation appropriés, nous effectuons l'extraction des informations nécessaires à la mise en forme des caractéristiques associées aux fonctionnements normaux et anormaux ;
- l'élaboration des signatures associées à des symptômes de défaillance en vue de la détection d'un dysfonctionnement ;
- la détection d'un dysfonctionnement par comparaison avec des signatures associées à des états de fonctionnements normaux ;
- la mise en œuvre d'une méthode de diagnostic de défaillance à partir de l'utilisation des connaissances sur les relations de causalité (catalogue cause-effets) ;
- une phase d'interprétation des données de diagnostic (identification du type et de la nature du défaut);
- la prise de décision en fonction des conséquences et de l'importance des défauts.

I.3- Constitution de la machine asynchrone

Dans ce paragraphe, nous allons présenter de manière générale les deux parties principales qui constituent la machine asynchrone.

La machine asynchrone est constituée d'un circuit magnétique et de bobinages parcourus par des courants. Elle comporte : un stator fixe et un rotor mobile autour de l'axe de symétrie de la machine.

Dans des encoches réparties sur la face interne du stator, on trouve trois enroulements identiques logés, à p paires de pôles, distants entre eux d'un angle électrique égal à $(2\pi/3)$. Un empilement de tôles ferromagnétiques fines et découplées réalise le circuit magnétique, ceci fait

apparaître le stator, le rotor et les différentes encoches.

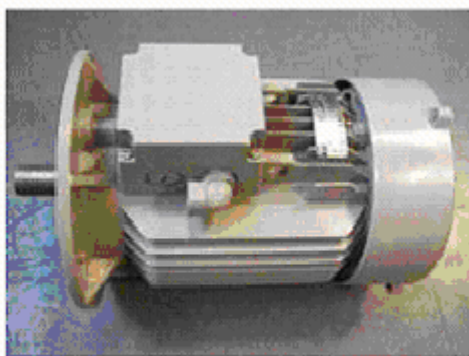
Le bobinage statorique se divise en deux parties :

- Les conducteurs d'encoches qui permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique.
- Les têtes de bobines qui organisent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre. Pour limiter les ondulations du couple électromagnétique, on essaye d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant qui soit la plus proche du signal sinusoïdal.
- Les trois phases statoriques sont alimentées par un réseau triphasé de tensions sinusoïdales à fréquence et amplitude constantes ou par un onduleur de tension ou de courant à fréquence et à amplitude réglables.

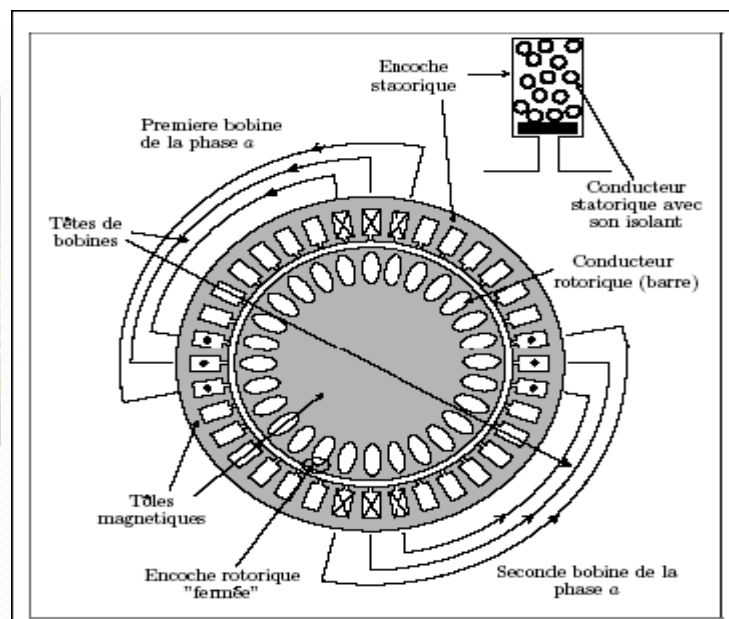
On trouve soit :

- Un système d'enroulements triphasés (rotor bobiné).
- Une cage conductrice intégrée aux tôles ferromagnétiques (rotor à cage).

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre. Cette réalisation ne nous permet pas d'obtenir une distribution sinusoïdale de courant à sa surface, mais par contre elle est très robuste et peu coûteuse.



Machine asynchrone



Coupe schématique de la machine asynchrone

Figure (I.3): Représentation schématique de la machine asynchrone [SCH 99]

Les machines asynchrone triphasé peuvent se décomposé du point de vue mécanique en trois parties distinctes:

- Le stator : partie fixe de la machine ou est connecté l'alimentation électrique.
- Le rotor : partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique
- les paliers : partie mécanique qui permet la rotation de l'arbre moteur.

1.3.1- Bobinage statorique :

Le bobinage statorique est réalisé par la mise en série et parallèle de spires élémentaires. L'organisation des spires est faite en fonction de la vitesse, du couple et des tensions d'alimentation désirés de la machine.

L'isolation est assurée par une protection dont les qualités d'isolation et de tenue à la chaleur déterminent l'utilisation possible de la machine, en plus d'une isolation supplémentaire qui peut être rajoutée. Les vibrations des conducteurs et les frottements qui en résultent accélèrent l'usure des isolants, la chaleur est le facteur principal de détérioration des isolants.

Les machines disposent donc généralement d'un ventilateur pour limiter leur montée en température. Il force le passage de l'air entre les ailettes extérieures. La poussière et l'humidité qui se déposent au niveau des têtes de bobines affaiblissent l'isolation électrique.

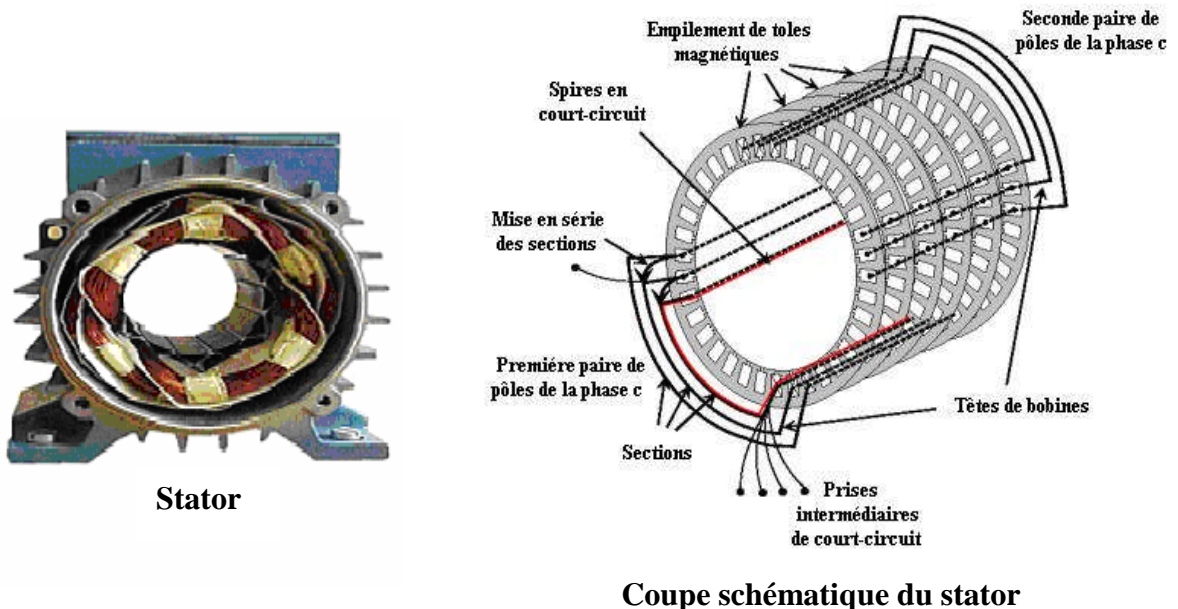


Figure (I.4): Représentation schématique du stator [SCH 99]

I.3.2- Bobinage rotorique :

Dans le cas des rotors à cage d'écureuil, les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre pré-formées dans les tôles du rotor.

En général, on ne trouve pas d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques. Mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants ne circulent pas dans les tôles.

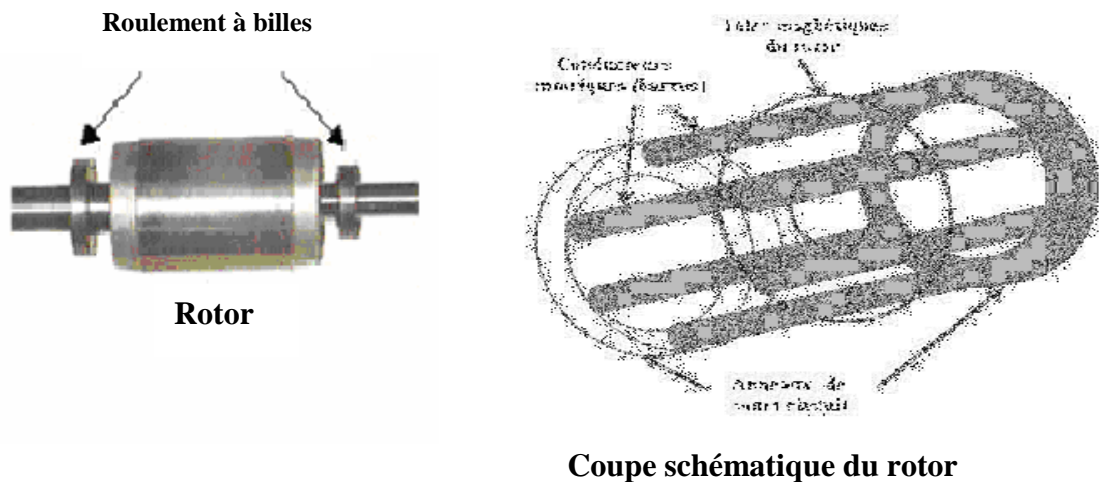


Figure (I.5): Représentation schématique du rotor [SCH 99]

I.3.3- Les paliers :

Qui permettent de supporter et de mettre en rotation l'arbre rotorique sont constitué de flasques et de roulements insérés à chaud sur l'arbre les flasques moulés en fonte sont fixés sur le carter statorique grâce a des boulons ou des tiges de serrage. L'ensemble ainsi établi constitue alors la machine asynchrone a cage d'écureuil.

I.4- Présentation des différentes défaillances de la machine asynchrone

Bien que la machine asynchrone a cage d'écureuil soit réputée robuste elle peut parfois présenter différents type de défauts ces défauts peuvent être d'origine mécanique ou électrique un problème minime à l'étape de fabrication peut être à l'origine d'un défauts tout comme une utilisation non conforme de la machine. Certaines fois nous pouvons aussi incriminer le milieu dans le quel la machine est utilisée (milieux corrosifs et / ou chimiques hostiles).

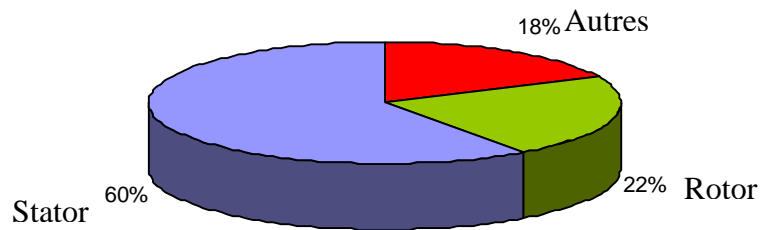


Figure (I.6): Proportion des défauts de la machine asynchrone [RAZ 03]

- **Les causes principales des défauts**

Les causes principales des défauts affectant le bobinage statorique sont généralement dues à un problème thermique (surcharge, échauffement permanent), électrique (alimentation perturbée, instabilité de la tension ou de la fréquence), mécanique (bobinage), ou environnemental (agression, humidité).

Quand aux défauts rotoriques, les causes sont essentiellement dues à des problèmes : électromagnétique, résiduel (déformation), thermique, dynamique (arbre de transmission), mécanique (roulement, rupture de fixations), ou environnemental.

I.4.1- Défaillance d'ordre mécanique

C'est les défaillance les plus rencontrées en générale parmi les défauts que compte la machine asynchrone, ces défauts peuvent apparaître au niveau des flasques des roulements a bille ou de l'arbre moteur.

a- Défaillance des roulements

Les roulements a bille jouent un rôle très importants dans le fonctionnement de différentes machines électrique les défauts de roulements peuvent être causés par un mauvais choix du matériau a l'étape de fabrication .les problèmes de rotation causés par un roulement abîmé écaillé ou fissuré peuvent créer des perturbations au sein de la machine .la graisse qui permet la lubrification et la bonne rotation des roulements peut se rigidifier et causer une résistance à la rotation, l'analyse vibratoire de la machine ou l' analyse harmonique des courants statorique permet de détecter ce type de défaillance.

b- Défaillance du flasque

Les défauts créés par les flasques de la machine asynchrone sont le plus généralement causés à l'étape de fabrication; en effet un mauvais placement des flasques provoque un

désalignement des roulements à billes ce qui induit une excentricité au niveau de l'arbre de la machine. Il est possible de détecter ce type de défaillance par une analyse vibratoire ou l'analyse harmonique des courants absorbés par la machine.

c- Défaillance de l'arbre

L'arbre de la machine peut laisser paraître une fissure due à l'utilisation d'un mauvais matériau lors de sa construction, à court ou long terme cette fissure peut mener à une fracture nette de l'arbre provoquant un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone, les milieux corrosifs peuvent aussi affaiblir la robustesse de l'arbre de la machine; par exemple l'humidité peut provoqué des microfissures et conduire a la détérioration complète de la machine, l'excentricité statique, dynamique ou mixte peut induire des efforts considérable sur l'arbre moteur amenant ainsi une fatigue supplémentaire.

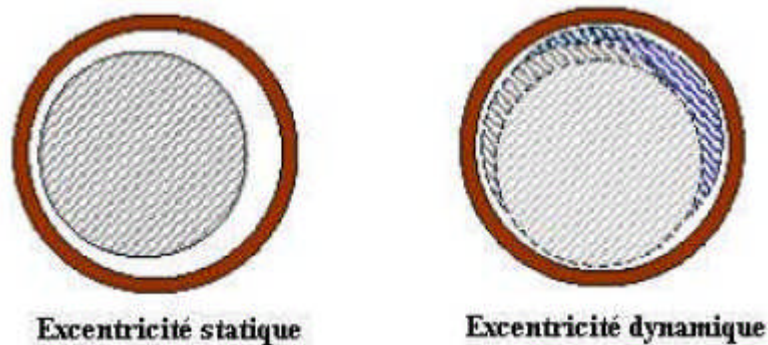


Figure (I.7): L'excentricité dynamique et statique [CAS 03]

Une analyse vibratoire, une analyse par ultrasons une analyse fréquentielle des courants absorbés ou simplement une analyse visuelle de l'arbre de la machine permet de détecter ce type de défaillance.

I.4.2- Défaillance d'ordre électrique

Les défaillances d'ordre électrique peuvent être la cause de l'arrêt de la machine (au même titre que les défaillances mécanique), ces défaillances se séparent en deux catégories bien distinctes, les défaillances qui peuvent apparaître dans les circuits électriques statorique et celle qui peuvent apparaître dans les circuits électriques rotorique.

a- Pannes statoriques

◆ Les courts-circuits internes

Ce sont des pannes dues à un court-circuit dans une ou plusieurs phases statoriques.

Ce type de défaut provoque une détérioration de la machine. Il conduit à un déséquilibre de phases, ce qui perturbe les commandes développées sur la base du modèle de Park considéré comme un modèle équilibré.

Un défaut de court-circuit est une connexion directe entre deux points du bobinage.

- Les courts-circuits apparaissent, en général, dans les enroulements de phases différentes et dans les têtes de bobines, parce que c'est dans celles-ci que les conducteurs de phases différentes se côtoient.
- Les courts-circuits entre spires de la même phase apparaissent soit au niveau des têtes des bobines soit dans les encoches. Ce sont des défauts très fréquents. Ils peuvent se manifester soit entre des spires au milieu du bobinage ou bien entre une spire et le neutre.
- Les courts-circuits proches de l'alimentation entre phases, induisent des courants très forts qui conduisent à une fusion des conducteurs d'alimentation et à la disjonction par les protections.

◆ *Les isolations électriques*

Les défauts d'isolation électrique au niveau du bobinage du stator suite à un vieillissement du au milieu de fonctionnement hostile ou non, et à la façon dont est alimenté le moteur.

◆ *Les charges partielles*

Ce type de défaut est du aux décharges dans les isolants entre conducteurs ou entre conducteurs et la masse qui s'amplifie avec l'usure des isolants. Sa présence précède l'apparition de court-circuit entre phases ou entre phases et masse.

b- Pannes rotoriques

◆ *Les cassures de barres et de portions d'anneaux des cages*

Ces défauts apparaissent au niveau du bobinage rotorique. Ce sont les défauts les plus fréquents. Ils se présentent par des ruptures totales ou partielles d'une barre au niveau de l'anneau de la cage d'écureuil, ou par des ruptures d'une portion d'anneau. Ils se traduisent par une augmentation de la résistance équivalente d'un enroulement rotorique. Ces pannes rotoriques engendrent malheureusement des ondulations dans le couple électromagnétique qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation de la machine. Ce qui génère des défauts mécaniques en plus dans la machine.

Suite à l'apparition de ce type de défauts, la machine continue à fonctionner, il est donc très difficile de détecter ces défaillances si la machine est en régime de défauts. Le courant que conduit une barre cassée se répartit sur les autres barres, ces dernières seront surchargées, ce qui conduit à leurs ruptures, et par la suite la rupture d'un nombre plus important de barres, dans la machine.



Figure (I.8): Schéma descriptif d'une barre et une portion d'anneaux [BOU 99]

Les cassures de portions d'anneaux sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations entre les barres et les anneaux.

Les portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. Un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement ou une surcharge du couple et donc de courant peuvent entraîner leur cassure.

La cassure d'une portion d'anneau engendre un comportement similaire à celui de la cassure de barres.

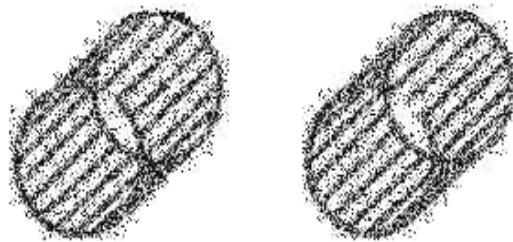


Figure (I.9): Rupture d'une et de deux portions d'anneaux [BOU 99]

◆ **Vibration des enroulements à billes**

Un défaut de roulement à billes se manifeste par la répétition continue du contact défectueux avec la cage de roulement extérieur comme intérieur.

Des contraintes environnementales causées par une contamination de la cage rotorique (industrie chimique par exemple).

Tous comme les défauts statorique les défauts rotorique peuvent être détectés par une analyse harmonique des courants statoriques, une analyse vibratoire permet aussi de détecter ce type de défauts.

I.4.3- Signatures en vue de suivi des défauts

Le diagnostic des défaillances de la machine asynchrone à base de modèle mathématique repose sur l'estimation de plusieurs grandeurs et paramètres, ainsi que la connaissance de l'évolution de ces derniers. En effet, un défaut peut se manifester sous forme de variation paramétrique, donc les paramètres choisis doivent être représentatifs des défauts considérés et par conséquent un choix judicieux des variables à suivre est indispensable.

Dans cette partie, nous allons développer les différentes signatures associées à chaque défaut de la machine asynchrone.

a- Signature des paramètres représentatifs des défauts

Les paramètres caractéristiques de la machine asynchrone peuvent servir de très bons indicateurs de défauts. Nous présentons dans ce qui suit, à partir des informations recueillies dans la littérature, ceux qui sont représentatifs des défauts et rencontrés au niveau de la machine.

Dans son étude, [MOR 99] utilise l'identification des paramètres issus du modèle de Park pour détecter l'apparition d'un défaut, suivi d'une analyse fréquentielle qui permettra par la suite de distinguer les défauts du stator, des défauts du rotor. Enfin l'estimation des paramètres à partir du modèle triphasé de la machine lui permet de reconnaître la phase statorique en défaut. Ces études portent sur les défauts tels que les barres cassées et la réduction de spires ou les courts-circuits dans les enroulements statoriques.

En terme de signature des défauts, [MOR 99] note les enseignements suivants :

Un défaut au stator se manifeste par l'augmentation de la résistance statorique R_s et diminution de la résistance rotorique R_r . Quant au défaut dans au rotor entraîne l'effet inverse d'un défaut statorique. En d'autres termes, la diminution de la résistance statorique R_s et l'augmentation de la résistance rotorique R_r . Les résultats sont confirmés par l'analyse spectrale des résidus et de la comparaison entre les paramètres réels et estimés :

- L'apparition d'une raie à $f = n.f_s$ est causée par un défaut au stator.
- L'apparition d'une raie à $f \leq f_s$ est causée par un défaut au rotor.

Sachant que les fréquences fondamentales des courants statoriques et rotoriques sont respectivement égales à f_s et $g.f_s$ (où g est le glissement). L'inconvénient de cette méthode est qu'elle permet seulement la détection d'un défaut au rotor ou bien au stator sans plus de détails sur l'ampleur de ce défaut.

Pour détecter par exemple une réduction du nombre de spires dans l'une des phases de la machine (jusqu'à 0,7% du nombre de spires total), Schaeffer dans sa Publication [SCH 99] propose une approche qui met en relief le fait qu'un court-circuit se traduit non seulement par la création d'une bobine fictive supplémentaire mais aussi par la diminution du nombre de spires dans la phase concernée.

Nous allons compléter cette partie par l'énumération des différentes signatures fréquentielles associées à chaque défaut, nous présenterons la manière avec laquelle évoluent les différents paramètres.

◆ *Défaut de court circuit*

La signature fréquentielle de ce défaut se manifeste par l'apparition d'harmonique aux fréquences $f = n.f_s$ avec $n = \{1, 2, 3, \dots\}$ et f_s : la fréquence d'alimentation.

La variation des paramètres se fait comme suit :

- La résistance statorique augmente.
- La résistance rotorique diminue.
- L'inductance rotorique diminue.
- L'inductance de magnétisation diminue.

◆ *Défaut d'excentricité*

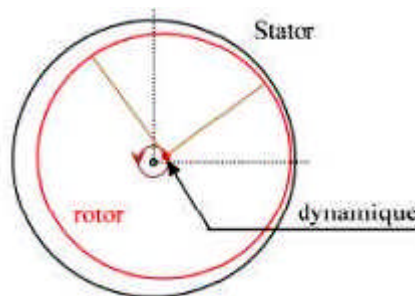


Figure (I.10): L'excentricité statique et dynamique

Les fréquences proches du fondamental sont données par la relation [RAZ03] :

$$f_{exc} = \left\{ 1 \pm n \left(\frac{1-g}{p} \right) \right\} f_s \quad (I-01)$$

- f_{exc} = fréquence d'excentricité
- $n = 1, 2, 3, \dots, n \in \mathbb{N}$
- g : le glissement
- p : le nombre de paire de pôles
- f_s : fréquence d'alimentation

On peut observer une possible augmentation de la résistance rotorique car le défaut se situe au niveau du rotor.

◆ *Rupture de barres ou de portions d'anneaux*

L'évolution des paramètres issus du modèle de Park permet de détecter un défaut de rupture de barres ou de portions d'anneaux si :

- La résistance statorique R_s diminue.
- La résistance rotorique R_r augmente.
- L'inductance rotorique L_r diminue.
- L'inductance statorique L_s diminue.

Dans cette partie, nous avons vu comment réagissent les différents paramètres de la machine asynchrone aux différents défauts susceptibles de se produire. Ces résultats sont en réalité les signatures fréquentielles et "paramétriques" qui seraient caractéristiques des défauts étudiés.

Cette approche, nécessite la connaissance du comportement dynamique de la machine asynchrone. Toutefois nous avons remarqué que les modèles ne permettaient pas d'étudier tous les défauts de la machine.

b- Signatures des grandeurs mesurables

Dans cette partie, nous nous intéresserons aux résultats obtenus à partir du suivi direct des grandeurs mesurables ou estimables (à l'aide d'observateur) telles que les courants, les flux ou bien encore le couple électromagnétique. Nous exposerons les principales caractéristiques fréquentielles des grandeurs mesurables (ou estimables) en régime de défaut.

- **Analyse du courant**

- ◆ **Cassures de barres**

La cassure de barre est l'un des défauts les plus fréquemment rencontrés au rotor [BOU 01]. La simulation du courant permet d'identifier les signatures de ce défaut afin de prévoir les anomalies générées dans la machine.

Les courants des phases statoriques sont toujours déphasés d'un angle de 120°, cependant, la cassure de barres peut engendrer des ondulations de l'amplitude des courants. L'amplitude de cette oscillation est proportionnelle au nombre de barres cassées.

Notons aussi que lorsque une barre est cassée, il est bien connu qu'un traitement approprié des signaux du courant fait apparaître des composantes dans leurs spectres aux fréquences est [CAS 03] :

$$f = f_s(1 \pm 2g) \quad (\text{I-02})$$

En effet, lorsqu'une barre est cassée, des harmoniques du flux correspondant sont produits et induisent des harmoniques du courant dans l'enroulement statorique. De plus, les amplitudes des raies dans ces bandes latérales du fondamental augmentent avec le nombre de barres défaillantes [STE 88].

Il est à signaler qu'une cassure de barres provoquerait une répartition non homogène des courants dans les portions d'anneaux. Ce qui cause une usure accélérée de ces éléments et induit une rupture des portions d'anneaux.

Il faut noter que la machine asynchrone devient fortement altérée à partir de la rupture de quatre barres consécutives au rotor. Ce défaut connaît un effet cumulatif, les barres saines adjacentes au défaut sont plus sollicitées et vieillissent prématurément.

- ◆ **Cassure d'anneaux**

Ce défaut apparaît autant de fois que la cassure de barres, la détection d'une cassure de portion d'anneaux est généralement délicate car ce défaut comporte des similitudes avec la cassure de barres. Dans beaucoup de situations ces deux défauts sont confondus.

En ce qui concerne les courants d'alimentation, la rupture d'anneaux a un effet identique à la cassure de barres. En effet, la cassure de portions d'anneaux fait apparaître des modulations d'amplitude: plus le nombre de portions d'anneaux augmente plus la modulation d'amplitude se manifeste de manière plus accentuée.

Les signatures associées à ce défaut peuvent être confondues avec les signatures associées à la cassure de barres, il sera donc difficile de distinguer cassure d'anneaux et cassure de barres sur les courants statoriques par cette seule analyse.

◆ *Défauts sur les enroulements du stator et du rotor*

Ce défaut est l'un des plus répandus, une partie ou la totalité des spires constituant les bobinages statoriques et rotoriques sont court-circuitées. Nous pouvons citer plusieurs cas possibles selon l'interconnexion des différents bobinages et la partie où ils se situent au niveau de la machine asynchrone.

◆ *Court circuit dans une phase*

➤ *Court circuit spire neutre*

L'effet de ce défaut sur la machine asynchrone est que l'amplitude du courant dans la phase statorique détériorée est supérieure par rapport aux deux autres phases. Toutefois, les courants qui parcourent ces phases sont amplifiés par rapport au cas du moteur sain. Plus le nombre de spires augmente, plus l'amplitude du courant augmente.

➤ *Court circuit au milieu de la phase*

De la même manière que le court-circuit entre phases et neutre, le court-circuit entre spires augmente les courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude apparaît pour les autres phases.

Nous terminerons cette partie qui a été consacrée aux défauts des enroulements, en remarquant que ce type de défauts engendre une augmentation des amplitudes des courants dans les phases affectées.

● *Analyse du flux électromagnétique*

La conversion électromécanique de l'énergie est localisée dans l'entrefer. Cette conversion est donc affectée par tout déséquilibre magnétique, mécanique, électrique ou électromagnétique au rotor ou au stator. Le flux d'entrefer et par-là même l'induction magnétique dans cet entrefer, le flux embrassé dans les enroulements statoriques ou encore le flux de fuite dans l'axe du rotor sont des paramètres qui, à cause de leur sensibilité à tout déséquilibre de la machine, méritent d'être analysés.

- **Analyse du couple électromagnétique**

Le couple électromagnétique peut être reconstruit à partir de deux des trois courants statoriques et par ajout de spires de flux dans ces deux phases [CAS 03]. Sa dépendance vis à vis de la présence de défauts sera présenté dans ce qui suit.

- ◆ **Cassures de barres**

Les cassures de barres réduisent sensiblement la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmentent l'amplitude des oscillations. Ces dernières augmentent avec le nombre de barres cassées induisant un effet d'avalanche de la défaillance.

- ◆ **Cassure de portion d'anneaux**

Le comportement du couple est analogue à celui qui apparaît dans le cas de cassure de barres. Cependant, le taux d'oscillation et la valeur moyenne du couple baisse de manière plus importante que dans le cas précédent.

- ◆ **Défaut de court-circuit**

Lors de l'apparition d'un défaut de court-circuit, le couple électromagnétique a une valeur moyenne sensiblement égale au couple développé par la machine lorsqu'elle est saine. Seulement, celui-ci est d'autant plus bruité que le court-circuit est important.

I.5- les méthodes de diagnostic

Le graphe suivant présente les différentes méthodes de diagnostic [ZEM 03].

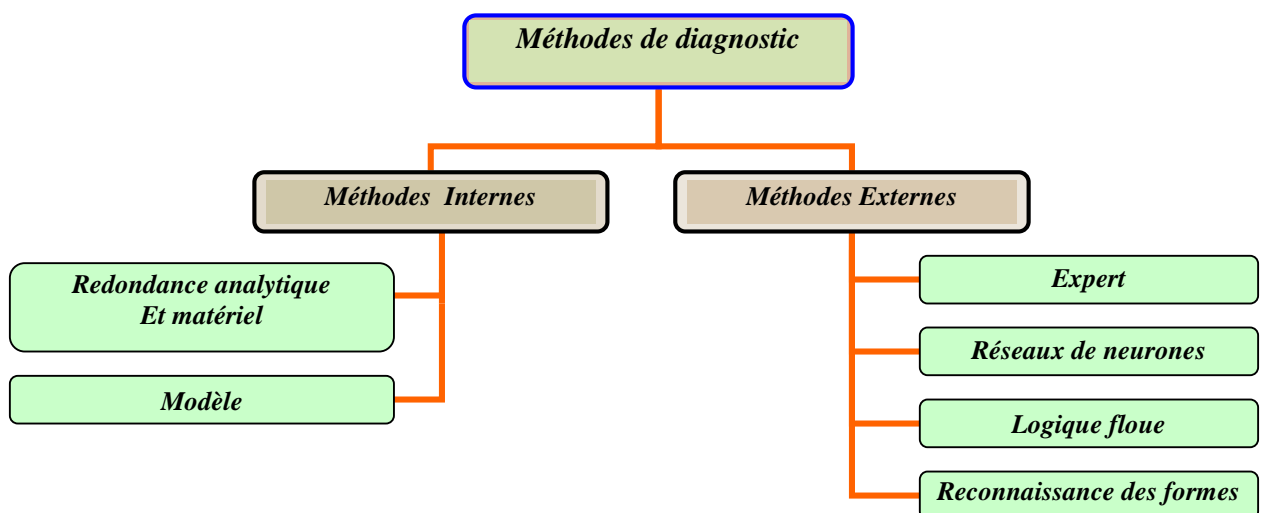


Figure (I.11): Synoptique de classement des méthodes de diagnostic

Le diagnostic qu'il soit médical ou bien industriel est toujours basé sur la comparaison entre le comportement du procédé défaillant et les connaissances du comportement sain ou de son modèle.

La comparaison nécessite des indicateurs , des symptômes révélateurs qui, une fois analysés permettent d'abord de détecter le comportement défaillant, d'en déduire la fonction ou l'élément en dysfonctionnement (localiser), puis d'en déterminer la cause et enfin , si possible d'y remédier .

1.5.1- Les méthodes internes

Cette famille de méthodes est principalement dérivée des techniques utilisées par les automaticiens a partir de modèles physiques au de comportement validés par les techniques d'identification de paramètre, il devient possible de mettre en ouvre la méthode du problème inverse.

Le diagnostic de défaillance est possible en suivant en temps réel l'évolution des paramètres physique, ou bien en utilisant l'inversion de modèles de type "boite noire", les méthodes internes de diagnostic se regroupent en deux grandes familles

- la méthode du modèle
- la méthode de redondance analytique et matérielle [ZEM 03] [HAD 00].

1.5.1.1- La méthode du modèle

La méthode du diagnostic basée sur le modèle [ZEM 03] consiste à comparer les grandeurs déduites d'un modèle représentatif du fonctionnement des différentes entités du processus avec les mesures directement observées sur le processus industriel. La figure (I.12) représente le fonctionnement d'un système de détection de défaillances utilisant l'approche basée sur le modèle.

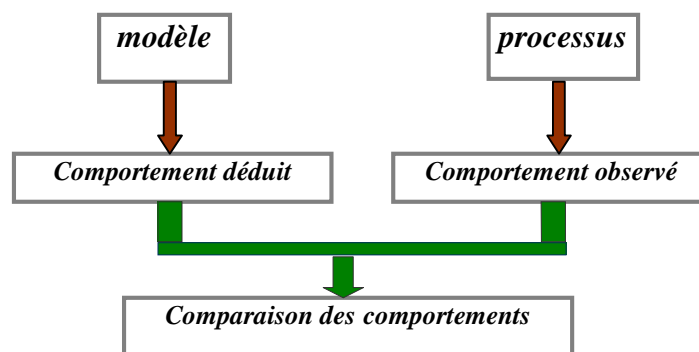


Figure (I.12): Principe de fonctionnement de la méthode du modèle

En général, pour des processus continus dotés de systèmes de régulation, il est judicieux d'utiliser un modèle prenant séparément en compte les chaînes de régulation, les actionneurs et les sous ensembles du processus industriel. Comme il a été utilisé en [HAD 00] pour un système d'entraînements électriques, le modèle possède une structure identique à Celle du processus. La comparaison des comportements sert à la détection des écarts entre les signaux d'état normaux et anormaux.

1.5.1.2- La redondance analytique et matérielle

La redondance analytique se base sur la connaissance d'un modèle mathématique du système à surveiller, ce modèle placé dans les mêmes conditions que le système est calculé en temps réel, fournit les relations de redondances nécessaires à la comparaison du procédé avec le modèle [HAD 00].

D'un côté, il existe une méthode par la redondance matérielle qui consiste à doubler ou à tripler l'équipement et plusieurs actionneurs plusieurs capteurs et plusieurs systèmes de commande [HAD 00]. L'utilisation de cette méthode est essentiellement réservée aux cas où la continuité de service est obligatoire (avionique). En effet, elle apporte l'avantage une fois

La défaillance détectée, d'utiliser la partie de l'équipement encore saine –c'est une méthode chère et complexe.

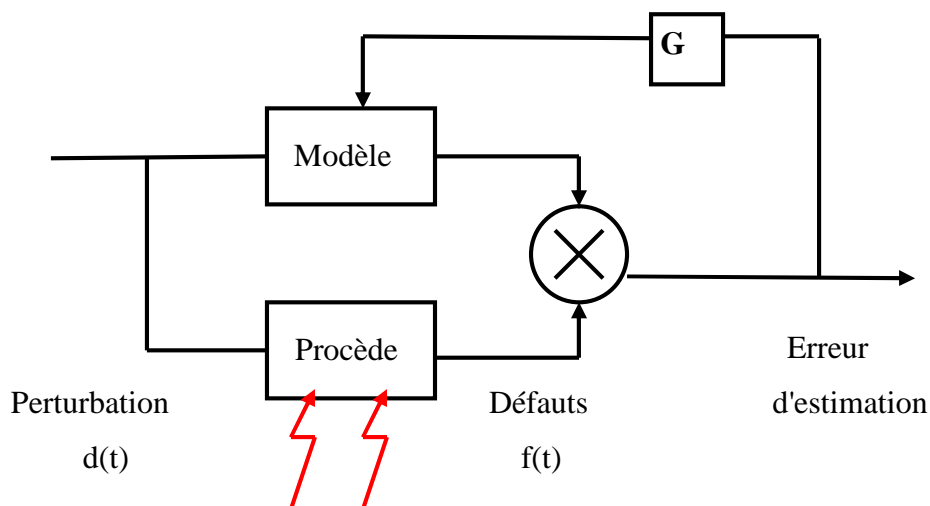


Figure (I.13): Principe de fonctionnement de la méthode de redondance analytique

1.5.2- Les méthodes externes

Les méthodes de diagnostic externes s'appliquent dans les situations où la modélisation des mécanismes reliant les causes des défaillances et des dégradation ne sont pas techniquement modélisables, ou bien ne présentent pas d'intérêt économique compte tenu des enjeux recherchés

Dans cette catégorie on retrouve toutes les méthodes basées sur l'intelligence artificielle. L'intelligence artificielle est presque vieille que l'informatique, les premiers travaux et réalisation datent de début des années 50, l'expression "intelligence artificielle" a été proposée par "J.Me carthy" en 1956.

1.5.2.1- Diagnostic par systèmes experts

Un système expert doit fournir des réponses associées à une situation donnée sachant que la complexité du domaine étudié ne permet pas d'établir a priori toutes les configurations possibles des situations ; ainsi un spécialiste du dépannage réalise son diagnostic à l'aide d'une description partielle de la situation.

A partir de l'ensemble de symptômes dont il dispose, il peut déduire toutes les conclusions possibles, élaborer de nouvelles hypothèses et approfondir son diagnostic en exploitant des informations supplémentaires collectées sur le système à diagnostiquer [HAD 00].

Un système expert est constitué de plusieurs éléments principaux [HAD 00]

(Voir la figure (I.14)) dont on peut citer :

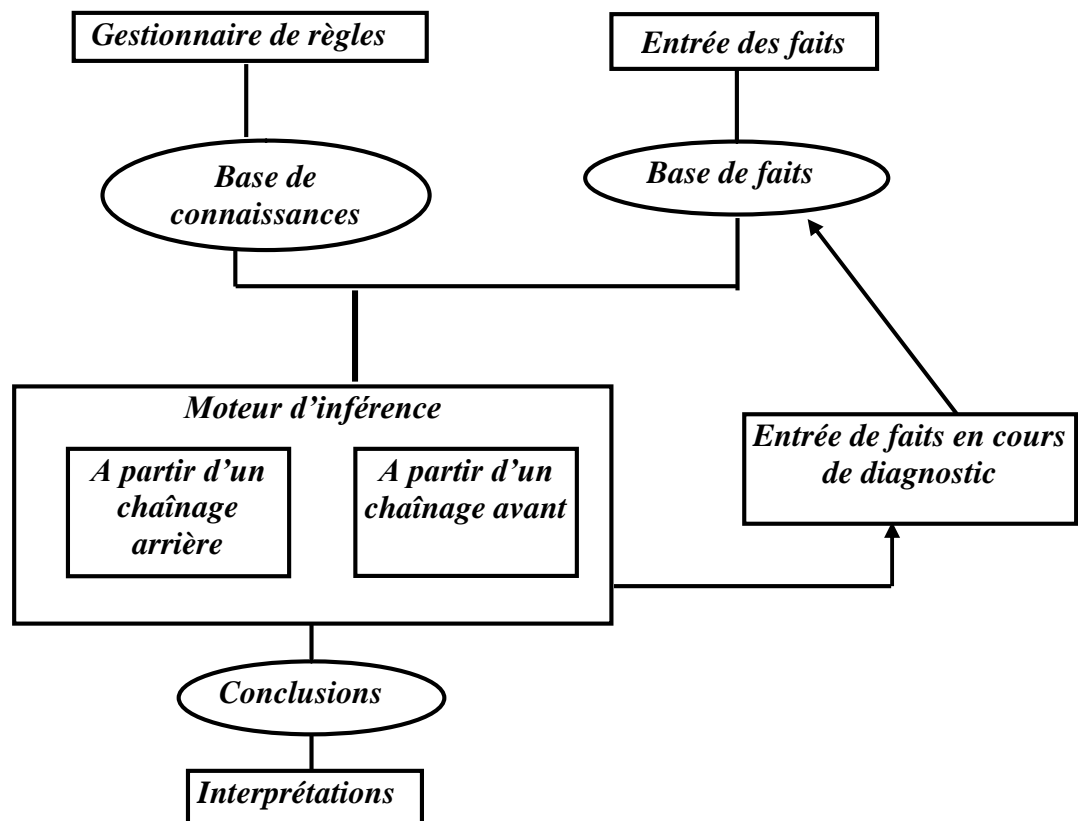


Figure (I.14): Architecture générale d'un système expert de diagnostic

La base de connaissances : La base de connaissances est souvent la partie stable du système, elle est immédiatement exécutée dès l'appel du système et c'est elle qui rassemble les connaissances nécessaires à la résolution des problèmes du domaine.

La base de faits : Les faits sont les objets élémentaires de l'application ; la base de faits qui au départ contient les informations initiales relatives au domaine s'enrichit progressivement de conclusions ou de nouveaux faits déduits par le moteur d'inférence.

Le moteur d'inférence : Le moteur d'inférence exploite de façon indépendante les informations contenues dans la base de faits et la base de connaissances pour fournir une solution au problème donné. Par ailleurs, le moteur d'inférence produit dans son mécanisme de raisonnement de nouveaux faits qui sont mémorisés dans la base de faits.

1.5.2.2- Les méthodes de reconnaissance des formes

Parmi toutes les approches du diagnostic, la reconnaissance des formes est une technique de définition d'algorithmes permettant de classer des objets dont l'aspect a varié par rapport à un objet type. Il s'agit de définir à quelle forme-type une forme observée ressemble le plus [ZEM 03].

Dans ce cas, la forme est définie par un ensemble de 'd' paramètres appelés caractères qui sont les composants du vecteur forme x ; les prototypes sont les points représentatifs du vecteur forme dans l'espace à 'd' dimensions ;

Dans un problème de reconnaissance des formes on suppose généralement que les formes x à classer appartiennent à M catégories bien déterminées appelées classes et notées w_1, w_2, \dots, w_m .

Compte tenu du bruit de mesure les vecteurs appartenant à une classe donnée w_i forment une zone particulière dans l'espace de dimension d .

Le problème de la reconnaissance des formes consiste à déterminer les formes séparant les M classes dans le but de pouvoir ultérieurement classer une nouvelle forme x lors de l'opération de classification ou de discrimination [HAD 00].

La procédure de diagnostic basée sur les techniques de reconnaissance des formes met en œuvre quatre étapes principales qui sont résumées sur la figure (I.15).

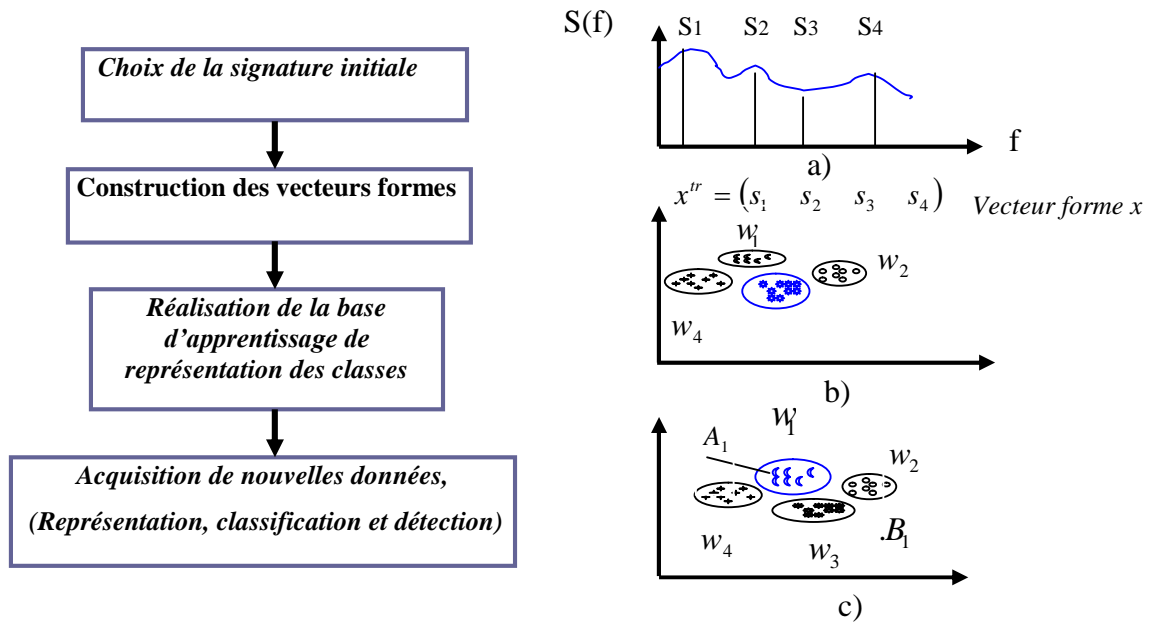


Figure (I.15): Procédure de diagnostic basée sur la technique de la reconnaissance des formes

I.5.2.3- Diagnostic par logique floue

Cette approche, contrairement à la logique du tout ou rien de G.Boode, a pour but la prise en compte de la logique de la pensée humaine qui est approximative.

Le concept de sous-ensemble flou a été introduit pour prendre en compte l'imprécision. La fonction d'appartenance à un ensemble flou prend des valeurs sur l'intervalle $[0,1]$. Celles-ci expriment le degré d'appartenance d'un élément à cet ensemble : 0 pour la non appartenance stricte et 1 pour l'appartenance stricte.

Le principe de fonctionnement du diagnostic basé sur la logique floue consiste à extraire et à calculer les signaux d'entrée, en utilisant les règles linguistiques représentées sous forme de fonctions d'appartenances, ces règles peuvent contenir tous les modèles possibles qui correspondent au mode de défaut considéré [HAD 00].

En général, la procédure de fonctionnement d'un système flou est accomplie en trois étapes :

- La fuzzification
- L'inférence
- La défuzzification .

Le bloc fuzzification contient en général un traitement de données préliminaires; ces données sont alors traitées par des règles linguistiques, ce qui nécessite leur définition par des fonctions d'appartenance. La fuzzification fournit une série de variables floues, réunies par un vecteur, qui va être introduit au bloc d'inférence.

Dans le bloc inférence, les valeurs des variables linguistiques sont liées par plusieurs règles

qui doivent tenir compte du comportement statique et dynamique du système (des effets du système à diagnostiquer).

Dans la dernière étape, il faut transformer la valeur floue (linguistique) en une valeur déterminée pour déduire l'état du système, ceci se faisant dans le bloc défuzzification ; en [ZEM 03] [HAD 00] on rencontre les applications de cette méthode pour le diagnostic des machines asynchrones.

1.5.2.4- Le diagnostic externe avec les réseaux de neurones

Cette méthode faite partie des méthodes de diagnostic externes, elle utilise la classification automatique des signaux et des formes [HAD 00].

Le principe de fonctionnement des réseaux de neurones est inspiré des mécanismes de fonctionnement du cerveau humain. De l'extérieur, le réseau de neurones se présente comme une 'boite noire' qui reçoit des signaux d'entrée et qui fournit les réponses appropriées.

Dans le cas du diagnostic, les différents états de fonctionnement normaux et anormaux sont le plus souvent caractérisés par des signatures. L'opérateur humain, après avoir mémorisé et appris les différentes formes de signatures associées à un état déterminé, est capable à la lecture d'une nouvelle signature d'identifier très rapidement l'état de la machine. Si la nouvelle signature est déjà apprise, il devra l'interpréter et la mémoriser. En général, le RNA permet de reconstituer le processus de raisonnement humain décrit ci-dessus.

Par ailleurs, un réseau de neurones est défini par [HAD 00] :

- la nature des cellules élémentaires qui le constituent (binaires ou continues) ;
- l'architecture et le nombre des couches du réseau ;
- la nature des connexions ;
- les méthodes d'apprentissage ;
- les performances de classification ;
- les mécanismes de mémorisation.

I.6- Position du problème à résoudre

D'après l'étude bibliographique effectuée, il a été constaté que :

- ▶ Les machines asynchrones (qui représentent 98% des moteurs utilisés) sont les parties les plus importantes des systèmes électromécaniques, car ils déterminent en grande partie les indices énergétiques (rendement, pertes d'énergie, facteur de puissance, etc.);

- ▶ Les études statistiques effectuées ont démontrées que les défauts les plus fréquents sont les défauts électriques (statoriques et rotoriques) qui représentent environ 70% des défauts;
- ▶ Les grandeurs indicatrices les plus représentatives des défauts électriques sont: les courants statoriques, les tensions d'alimentation et la vitesse de rotation;
- ▶ Les systèmes de diagnostic existants utilisent des méthodes: internes et externes et ils doivent permettre la détection du défaut et l'identification de son origine afin qu'il puisse être isolé ;
- ▶ La grande diversité des technologies des systèmes industriels (mécaniques, thermiques, électriques, électroniques; numériques, etc.) ne permet pas d'utiliser une méthode universelle qui posséderait tous les avantages et aucun inconvénient. Une méthode universelle de diagnostic industrielle n'existe pas ;
- ▶ L'analyse des avantages et des inconvénients des différentes méthodes de diagnostic : internes (méthodes du modèle, de redondances, etc.) et externes (réseaux de neurones, système expert et logique floue) permet de conclure que la méthode basée sur les réseaux de neurones artificiels est la plus rationnelle pour la classification des signaux caractéristiques des défaillances des systèmes électromécaniques en général;

Par conséquent, le présent travail sera consacré à l'élaboration d'un système de diagnostic automatique des défaillances du moteur asynchrone en utilisant les réseaux de neurones artificiels et une multitudes des grandeurs indicatrices.

1.7- CONCLUSION

Dans le présent chapitre ont été exposées les étapes nécessaires à la mise en place d'un système d'aide au diagnostic (analyse de la problématique du diagnostic); une analyse critique faite sur les méthodes du diagnostic, il a été déduit que les méthodes externes du diagnostic des défaillances sont bien adaptées au système à étudier, car la modélisation physique de toutes les défaillances de la machine asynchrone ne peut pas être réalisée. Parmi les méthodes externes, la technique des réseaux de neurones a été retenue pour l'élaboration du système de diagnostic des défaillances du système électromécanique. En effet, l'analyse bibliographique effectuée a démontrée que les RNA sont largement utilisées dans le domaine du diagnostic, en raison de leurs avantages et de leur simplicité.

Par ailleurs, le chapitre suivant sera consacré à la modélisation du comportement de la machine asynchrone vis-à-vis aux défauts et dans le cas du fonctionnement normal.

CHAPITRE II

MODELISATION et SIMULATION de la MACHINE ASYNCHRONE

II- MODÉLISATION ET SIMULATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE TRIPHASÉE

II.1- INTRODUCTION

Le moteur asynchrone ou moteur d'induction est actuellement le moteur électrique dont l'usage est le plus répandu dans l'industrie son principale avantage réside dans l'absence de contact électrique glissant ce qui conduit à une structure simple et robuste facile à construire le domaine de puissance va de quelques watts à plusieurs mégawatts relie directement au réseau industriel à tension et fréquence constantes il tourne à vitesse variable peu différente de la vitesse synchrone c'est lui qui est utilisé pour la réalisation de la quasi-totalité des entraînements à vitesse constante le moteur asynchrone permet aussi la réalisation d'entraînements à vitesse variable et la place qu'il prend dans ce domaine ne cesse de croître .

Dans les pays industrialisés plus de 60% de l'énergie électrique consommée et transformée en énergie mécanique par des entraînements utilisant les moteurs électriques.

La modélisation des machines électriques est une phase primordiale pour l'élaboration de la loi de commande. En effet, aborder la commande des machines électriques nécessite l'emploi d'une méthode de modélisation adaptée à la commande. Il s'agit d'une application simple des méthodes de la modélisation à la machine asynchrone qui présente des spécificités propres qui ne sont pas nécessairement communes à d'autres processus physiques.

Il est donc évident que cette étape de modélisation soit un passage obligatoire pour étudier le comportement de la machine dans tous les cas de fonctionnement.

A cet effet, le point de départ qu'on a considéré pour la modélisation de la machine asynchrone est la machine généralisée et les équations d'état qui lui sont associées.

Ces équations seront traduites sous forme de schéma-blocs de manière à être simulés à l'aide du logiciel MATLAB (SIMULINK sous MATLAB).

La simulation de la machine asynchrone triphasée à diverses alimentations nous permettra de retrouver des résultats classiques et de valider nos modèles du type schéma-blocs.

Ce chapitre comportera deux parties, dans la première on donnera un modèle mathématique de la machine asynchrone dans le plan triphasé puis biphasé selon la transformation de Park. la deuxième partie sera consacrée à la validation par simulation numérique du modèle de la machine, dont les paramètres sont données par l'annexe.

II.2- Généralités sur les machines asynchrones triphasées

II.2.1- Définition

Une machine asynchrone est une machine à courant alternatif dont la vitesse du rotor et la vitesse du champ magnétique tournant ne sont pas égales. Le rotor est toujours en retard par rapport à la vitesse du champ statorique.

La machine asynchrone est dite machine à induction car l'énergie transférée du stator au rotor ou inversement se fait par induction électromagnétique.

II.2.2- Principes généraux

Les courants statoriques créent un champ magnétique tournant dans le stator. La fréquence de rotation de ce champ est imposée par la fréquence des courants statoriques, c'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique. La vitesse de ce champ tournant est appelée vitesse de synchronisme.

L'enroulement au rotor est donc soumis à des variations de flux (du champ magnétique). Une force électromotrice induite apparaît qui crée des courants rotoriques. Ces courants sont responsables de l'apparition d'un couple qui tend à mettre le rotor en mouvement afin de s'opposer à la variation de flux : *loi de Lenz*. Le rotor se met donc à tourner pour tenter de suivre le champ statorique.

La machine est dite *asynchrone* car elle est dans l'impossibilité, sans la présence d'un entraînement extérieur, d'atteindre la même vitesse que le champ statorique. En effet, dans ce cas, les courants s'annulent de même que le couple qu'ils produisent et la machine n'est plus entraînée. La différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique est appelée vitesse de glissement.

Lorsqu'il est entraîné au-delà de la vitesse de synchronisme (fonctionnement hyper synchrone) la machine fonctionne en générateur alternatif. Mais son stator doit être forcément relié au réseau car lui seul peut créer le champ magnétique nécessaire pour faire apparaître les courants rotoriques.

Un fonctionnement en générateur alternatif autonome est toutefois possible à l'aide de condensateurs connectés sur le stator, à condition qu'il existe un champ magnétique rémanent.

II.3- Modélisation de la machine asynchrone

II.3.1- Description du modèle

La machine asynchrone triphasée comporte un stator fixe et un rotor mobile autour de l'axe de symétrie de la machine. Dans des encoches régulièrement réparties sur la face interne du stator sont logés trois enroulements identiques, leurs axes sont distants entre eux d'un angle électrique égale à $(\frac{2\pi}{3})$.

Les phases du stator sont alimentées par un réseau triphasé de tensions sinusoïdales à fréquence et amplitude constantes ou par un onduleur de tension ou de courant à fréquence et amplitude réglables.

La structure électrique du rotor peut être réalisée :

Soit :

- par un système d'enroulements triphasés (rotor bobiné) raccordés en étoile à trois bagues sur lesquelles frottent trois balais fixes accessibles par la plaque à bornes et mis en court circuit pendant les régimes permanents.
- par une cage conductrice à tôles ferromagnétique (rotor à cage).

Il sera admis que la deuxième structure est électriquement équivalente à la première.

II.3.2- Hypothèses simplificatrices

Pour cette mise en équation, nous supposons que le bobinage est réparti de manière à donner une f.m.m. sinusoïdale s'il est alimenté par des courants sinusoïdaux [KRA 87].

Nous supposerons également que nous travaillons en régime non saturé. Nous négligeons le phénomène d'hystérésis, les courants de Foucault et l'effet de peau.

Enfin, le régime homopolaire est nul puisque le neutre n'est pas relié.

Ces choix signifient entre autres que :

- les flux sont additifs,
- les inductances propres sont constantes,
- il y a une variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétique

II.3.3- Représentation schématique d'un moteur asynchrone triphasé

Les enroulements des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques dans l'espace peuvent être représentés comme indiqué en (Figure (II.1)). Les phases rotoriques sont court-circuitées sur elles mêmes. α est l'angle électrique entre l'axe de la phase statorique Sa et la phase rotorique Ra .

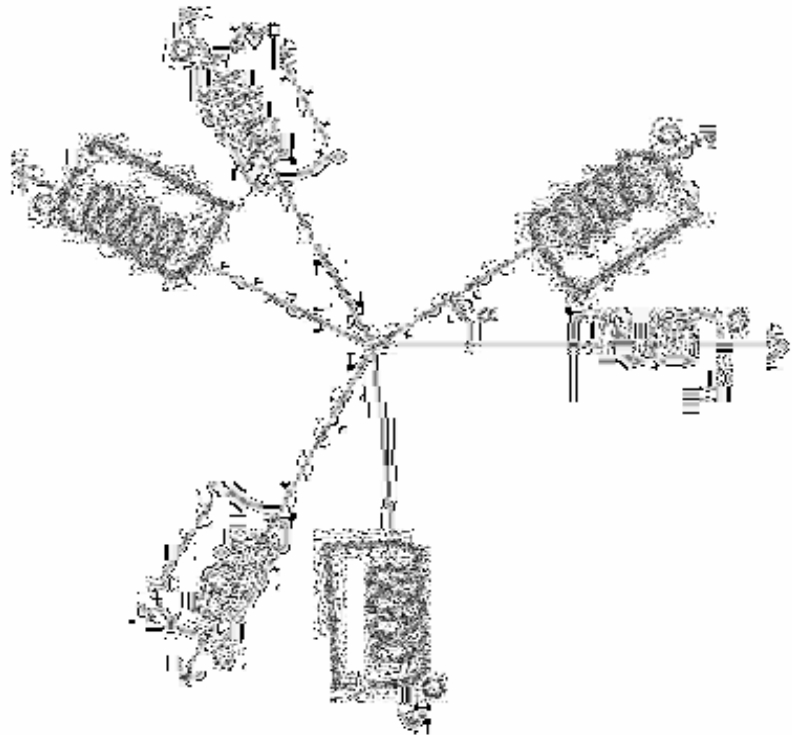


Figure (II.1) : Représentation des enroulements statoriques et rotoriques

II.3.4- Les équations de la machine asynchrone en régime quelconque

(Equations générales)

Le comportement de la machine asynchrone est entièrement défini par trois types d'équations à savoir [LES 81] [CAR 95] [BOS 86] :

- Les équations électriques.
- Les équations magnétiques.
- Les équations mécaniques.

La loi de Faraday permet d'écrire :

$$V = R I + \frac{d\Phi}{dt} . \quad (\text{II-01})$$

Pour les 3 phases statoriques on résume cette écriture par l'écriture matricielle condensée :

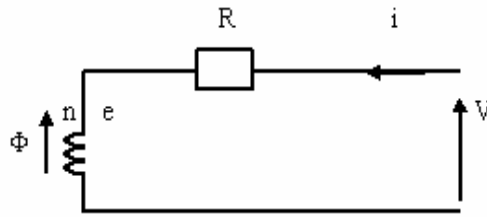


Figure (II.2) : modèle d'une phase avec f.e.m.

a- Equations électriques :

$$[V_{sabc}] = [R_s] [I_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sabc}] \tag{II-02}$$

Cette notation est l'écriture condensée de :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \tag{II-03}$$

La résistance statorique étant la même pour les 3 phases, il n'y pas lieu d'écrire une matrice de résistances.

De même pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{II-04}$$

Le rotor étant en court-circuit, ses tensions sont nulles.

Nous pouvons à présent écrire le système matriciel électrique suivant dans le repère a, b, c :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \\ V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \\ \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \tag{II-05}$$

b- Equations magnétiques :

Chaque flux comporte une interaction avec les courants de toutes les phases y compris la sienne (notion de flux / inductance propre).

Exemple de la phase Sa statorique :

$$\varphi_{sa} = l_s i_{sa} + m_s i_{sb} + m_s i_{sc} + m_1 i_{ra} + m_3 i_{rb} + m_2 i_{rc} \quad (\text{II-06})$$

Maintenant, nous devons exprimer les grandeurs magnétiques au stator et au rotor, toujours dans le repère a, b, c :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \\ \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s & M_1 & M_3 & M_2 \\ M_s & l_s & M_s & M_2 & M_1 & M_3 \\ M_s & M_s & l_s & M_3 & M_2 & M_1 \\ M_1 & M_2 & M_3 & l_r & M_r & M_r \\ M_3 & M_1 & M_2 & M_r & l_r & M_r \\ M_2 & M_3 & M_1 & M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \\ I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II-07})$$

Pour l'écriture condensée, on met :

$$[L_{SS}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad [L_{RR}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (\text{II-08})$$

On aura :

$$[M_{SR}] = [M_{RS}]^t = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\alpha + 2\pi/3) & \cos(\alpha - 2\pi/3) \\ \cos(\alpha - 2\pi/3) & \cos(\alpha) & \cos(\alpha + 2\pi/3) \\ \cos(\alpha + 2\pi/3) & \cos(\alpha - 2\pi/3) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (\text{II-09})$$

On aura finalement :

$$[V_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + (d/dt)([L_{SS}][i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rabc}]) \quad (\text{II-10})$$

$$[V_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + (d/dt)([L_{RR}][i_{rabc}] + [M_{rs}][i_{sabc}]) \quad (\text{II-11})$$

Où :

- L_s : est l'inductance propre d'une phase statorique.
- L_r : est l'inductance propre d'une phase rotorique.
- M_s : est l'inductance mutuelle entre deux phases statoriques.
- M_r : est l'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques.
- M_{sr} : est le maximum de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

- $M1 = M_{sr} \cos(\alpha)$
- $M2 = M_{sr} \cos(\alpha - 2\pi/3)$
- $M3 = M_{sr} \cos(\alpha + 2\pi/3)$

c- Equations mécaniques :

Pour étudier les phénomènes transitoires électromécaniques avec une vitesse rotorique variable (par exemple le démarrage, le freinage, la variation de la charge à l'arbre, etc...), il faut ajouter l'équation de mouvement au système d'équations différentielles.

$$J \cdot \frac{d\Omega_r}{dt} = C_e - C_r - f \cdot \Omega_r \quad (\text{II-12})$$

Notons que la vitesse électrique du rotor est donnée par l'expression suivante :

$$\omega_r = p \cdot \Omega_r \quad (\text{II-13})$$

II.4- Transformation triphasé - diphasé

II.4.1- Transformation de Park

La transformation de Park consiste à transformer un système triphasé (abc) en un système biphasé équivalent (dq), comme le montre la figure (II.3).

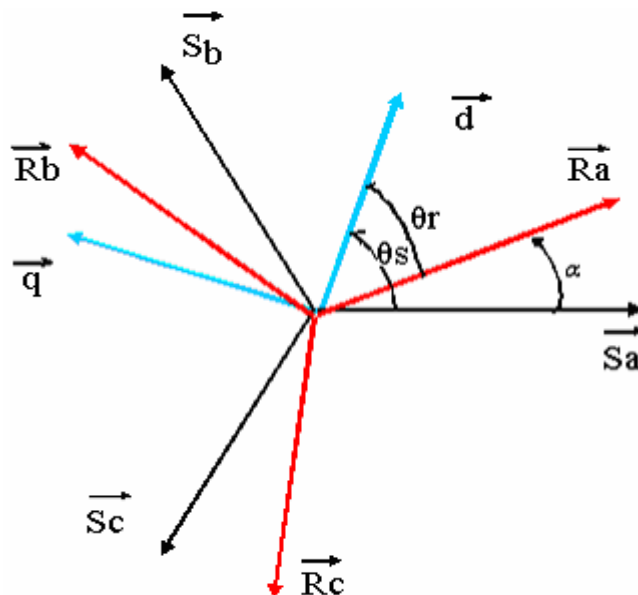


Figure (II.3): Repérage angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique

La machine est représentée à la figure (II.3) par ces six enroulements dans l'espace électrique, l'angle (θ) repère l'axe fixe de la phase rotorique de référence (R_a) par rapport à la

phase statorique de références (S_a), les flux sont comptés positivement selon les axes des phases.

On a :

$$[Vabc] = [R] [Iabc] + \frac{d}{dt} [\Phi abc] \quad \text{avec: } R = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \quad (\text{II-14})$$

La transformation de PARK normalisée est obtenue à l'aide de la matrice de passage $p(\theta)$

$$[p]^{-1} [Vdqo] = [R] [p]^{-1} [Idqo] + \frac{d}{dt} [[p]^{-1} [\Phi dqo]] \quad (\text{II-15})$$

Avec :

$$[p] = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II-16})$$

Cette matrice est orthogonal, c'est-à-dire $[p(\theta)]^t = [p(\theta)]^{-1}$. La transformation de Park peut être appliquée sur les tensions, les courants et les flux.

Le changement de variables relatif aux courants, tensions et flux est défini par la transformation

$$\begin{bmatrix} xd \\ xq \\ x0 \end{bmatrix} = p(\theta) \cdot \begin{bmatrix} xa \\ xb \\ x0 \end{bmatrix} \quad (\text{II-17})$$

Avec x : tension, courant ou flux .et les indices suivants représentent :

- "o" : indice de l'axe homopolaire.
- "d" : indice de l'axe direct.
- "q" : indice de l'axe en quadrature.

La matrice inverse de la transformation de PARK normalisée a pour expression :

$$[P(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta - 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \sin(\theta - 4\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II-18})$$

$$[Vdqo] = [R] [Idqo] + \frac{d}{dt} [\Phi dqo] + [p] \left(\frac{d}{dt} [p]^{-1} \right) [\Phi dqo] \quad (\text{II-19})$$

On démontre que :

$$[p] \left(\frac{d}{dt} [p]^{-1} \right) = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{II-20})$$

On obtient finalement le système des équations de Park .qui constitue ainsi un modèle électrique dynamique pour l'enroulement diphasé équivalent :

$$\begin{cases} Vd = rId + \left(\frac{d\Phi d}{dt}\right) - \left(\frac{d\theta}{dt}\right)\Phi q \\ Vq = rIq + \left(\frac{d\Phi q}{dt}\right) + \left(\frac{d\theta}{dt}\right)\Phi d \\ Vo = rIo + \left(\frac{d\Phi o}{dt}\right) \end{cases} \quad (\text{II-21})$$

Pour la réduction de la matrice des inductances les transformations proposées établissent les relations entre les flux d'axe $d, q, 0$ et les flux d'axes a, b, c :

$$[\Phi_{sdqo}] = [p(\theta_s)] [\Phi_{sabc}] \text{ et } [\Phi_{rdqo}] = [p(\theta_r)] [\Phi_{rabc}] \quad (\text{II-22})$$

Après le calcul, on trouve :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \\ \Phi_{os} \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \\ \Phi_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s - M_s & 0 & 0 & \frac{3}{2}M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & l_s - M_s & 0 & 0 & \frac{3}{2}M_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & l_s + 2M_s & 0 & 0 & 0 \\ \frac{3}{2}M_{sr} & 0 & 0 & l_r - M_r & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}M_{sr} & 0 & 0 & l_r - M_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & l_r + 2M_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ids \\ Iqs \\ Ios \\ Idr \\ Iqr \\ Ior \end{bmatrix} \quad (\text{II-23})$$

- $L_s = l_s - M_s$: Inductances cycliques statorique.
- $L_r = l_r - M_r$: Inductances cycliques rotorique.
- $M = \frac{3}{2}M_{sr}$: Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

Le mode habituel d'alimentation du stator et la structure des enroulements rotoriques conférant la nullité aux sommes des courants statoriques et de courants rotoriques, les composantes d'indice (0) sont nulles.

Dans ces conditions de fonctionnement en mode non dégradé, les flux d'axes d et q sont simplement définis par les trois paramètres constants L_s, L_r, M , et reliés aux courants par la relation (II-24) :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ids \\ Iqs \\ Idr \\ Iqr \end{bmatrix} \quad (\text{II-24})$$

La substitution des enroulements fictifs S_d, S_q, R_d, R_q aux enroulements triphasés permet, par interprétation de leur représentation à la figure (II.4), une écriture rapide de l'équation (II-24) :

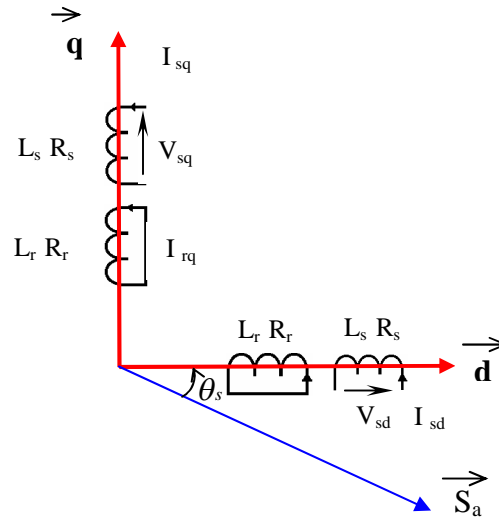


Figure (II.4) : Représentation des enroulements fictifs d'axes d et q

a- Équations électriques :

Les équations de Park des tensions, statoriques et rotoriques s'écrivent :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \Phi_{qr} = 0 \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \Phi_{dr} = 0 \end{array} \right. \quad (II-25)$$

Dans le repère de Park ($d q$) tournant à la vitesse angulaire

$W_s = \frac{d\theta_s}{dt}$ l'équation (II-25) devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - W_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + W_s \Phi_{ds} \end{array} \right. \quad (II-26)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = R_r I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (W_s - W) \Phi_{qr} \\ 0 = R_r I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (W_s - W) \Phi_{dr} \end{array} \right. \quad (II-27)$$

b- Equations magnétiques :

Avec les flux :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II-28})$$

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II-29})$$

c- Equations mécaniques [BOUG 98] :

L'équation du couple et celle du mouvement s'écrivent :

$$C_e = PM [I_{qs} I_{dr} - I_{ds} I_{qr}] \quad (\text{II-30})$$

$$\frac{J}{p} \frac{dW}{dt} = C_e - C_r - \frac{f}{P} W \quad (\text{II-31})$$

Avec :

- J : Moment d'inertie du rotor.
- f : Coefficient de frottement visqueux.
- C_e : Couple électromagnétique.
- C_r : Couple résistant.
- P : Nombre de paires de pôles.

II.4.1.1- Définition des différents référentiels

Il existe différentes possibilités pour le choix de l'orientation du repère d'axes d, q qui dépendent généralement des objectifs de l'application.

a- Référentiel fixe par rapport au stator :

Il se traduit par les conditions :

- ▶ $\theta_s = 0$; $\theta_r = -\theta$
- ▶ $\frac{d\theta_s}{dt} = 0$; $\frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt}$
- ▶ $W_s = 0$; $W_r = -W$

Les équations électriques prennent la forme [BOUG 98] :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} \\ 0 = R_r I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} + W \Phi_{qr} \\ 0 = R_r I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} - W \Phi_{dr} \end{array} \right. \quad (\text{II-32})$$

Après arrangement des équations avec (I_{ds} , I_{qs} , I_{dr} , I_{qr}) on aboutit à :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_{ds}}{dt} = -\frac{1}{T_s \sigma} I_{ds} + \frac{M^2}{L_s L_r \sigma} W I_{qs} + \frac{M}{L_s T_r \sigma} I_{dr} + \frac{M}{L_s \sigma} W I_{qr} + \frac{V_{ds}}{L_s \sigma} \\ \frac{dI_{qs}}{dt} = -\frac{M^2}{L_s L_r \sigma} W I_{ds} - \frac{1}{T_s \sigma} I_{qs} - \frac{M}{L_s \sigma} W I_{dr} + \frac{M}{L_s T_r \sigma} I_{qr} + \frac{V_{qs}}{L_s \sigma} \\ \frac{dI_{dr}}{dt} = \frac{M}{L_r T_s \sigma} I_{ds} - \frac{M}{L_r \sigma} W I_{qs} - \frac{1}{T_r \sigma} I_{dr} - \frac{1}{\sigma} W I_{qr} - \frac{M}{L_s L_r \sigma} V_{ds} \\ \frac{dI_{qr}}{dt} = \frac{M}{L_r \sigma} W I_{ds} + \frac{M}{L_r T_s \sigma} I_{qs} + \frac{1}{\sigma} W I_{dr} - \frac{1}{T_r \sigma} I_{qr} - \frac{M}{L_s L_r \sigma} V_{qs} \end{array} \right. \quad (\text{II-33})$$

Avec :

- $\sigma = 1 - \frac{M^2}{l_s l_r}$: Le coefficient de fuite totale.
- $T_s = \frac{l_s}{r_s}$: Constante de temps statorique.
- $T_r = \frac{l_r}{r_r}$: Constante de temps rotorique.

b- Référentiel fixe par rapport au rotor :

Ce référentiel est choisi de préférence en vue d'étudier des variations des grandeurs statoriques.

Il se traduit par les conditions :

- ▶ $\theta_s = \theta$; $\theta_r = 0$
- ▶ $\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta}{dt}$; $\frac{d\theta_r}{dt} = 0$
- ▶ $W_r = 0$; $W_s = W$

Les équations électriques prennent la forme [BOUG 98] :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - W_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + W_s \Phi_{ds} \\ 0 = R_r I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} \\ 0 = R_r I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} \end{array} \right. \quad (\text{II-34})$$

Après arrangement des équations, on aboutit à:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_{ds}}{dt} = -\frac{1}{T_s\sigma} I_{ds} + \frac{1}{\sigma} W I_{qs} + \frac{M}{L_s T_r \sigma} I_{dr} + \frac{M}{L_s \sigma} W I_{qr} + \frac{V_{ds}}{L_s \sigma} \\ \frac{dI_{qs}}{dt} = -\frac{1}{\sigma} W I_{ds} - \frac{1}{T_s\sigma} I_{qs} - \frac{M}{L_s \sigma} W I_{dr} + \frac{M}{L_s T_r \sigma} I_{qr} + \frac{V_{qs}}{L_s \sigma} \\ \frac{dI_{dr}}{dt} = \frac{M}{L_r T_s \sigma} I_{ds} - \frac{M}{L_r \sigma} W I_{qs} - \frac{1}{T_r \sigma} I_{dr} - \frac{M^2}{L_s L_r \sigma} W I_{qr} - \frac{M}{L_s L_r \sigma} V_{ds} \\ \frac{dI_{qr}}{dt} = \frac{M}{L_r \sigma} W I_{ds} + \frac{M}{L_r T_s \sigma} I_{qs} + \frac{M^2}{L_s L_r \sigma} W I_{dr} - \frac{1}{T_r \sigma} I_{qr} - \frac{M}{L_s L_r \sigma} V_{qs} \end{array} \right. \quad (\text{II-35})$$

c- Référentiel fixe par rapport au champ tournant :

Ce référentiel est le seul qui n'introduise pas de simplification dans la formulation des équations. Il fait correspondre des grandeurs continues aux grandeurs sinusoïdales en régime permanent ; raison pour laquelle ce référentiel est utilisé en commande.

Il se traduit par les conditions :

$$\blacktriangleright \frac{d\theta_s}{dt} = W_s \quad ; \quad \frac{d\theta_r}{dt} = W_s - W = W_r$$

Les équations électriques prennent la forme [BOUG 98]:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - W_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + W_s \Phi_{ds} \\ 0 = R_r I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - W_r \Phi_{qr} \\ 0 = R_r I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + W_r \Phi_{dr} \end{array} \right. \quad (\text{II-36})$$

Après arrangement des équations, on aboutit à:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_{ds}}{dt} = -\frac{1}{T_s\sigma} I_{ds} + (W_r + \frac{1}{\sigma} W) I_{qs} + \frac{M}{L_s T_r \sigma} I_{dr} + \frac{M}{L_s \sigma} W I_{qr} + \frac{1}{L_s \sigma} V_{ds} \\ \frac{dI_{qs}}{dt} = - (W_r + \frac{1}{\sigma} W) I_{ds} - \frac{1}{T_s\sigma} I_{qs} - \frac{M}{L_s \sigma} W I_{dr} + \frac{M}{L_s T_r \sigma} I_{qr} + \frac{1}{L_s \sigma} V_{qs} \\ \frac{dI_{dr}}{dt} = \frac{M}{L_r T_s \sigma} I_{ds} - \frac{M}{L_r \sigma} W I_{qs} - \frac{1}{T_r \sigma} I_{dr} + (W_r - \frac{M^2}{L_s L_r \sigma} W) I_{qr} - \frac{M}{L_s L_r \sigma} V_{ds} \\ \frac{dI_{qr}}{dt} = \frac{M}{L_r \sigma} W I_{ds} + \frac{M}{L_r T_s \sigma} I_{qs} + (-W_r + \frac{M^2}{L_s L_r \sigma} W) I_{dr} - \frac{1}{T_r \sigma} I_{qr} - \frac{M}{L_s L_r \sigma} V_{qs} \end{array} \right. \quad (II-37)$$

II.5- Simulation de la machine asynchrone:

La simulation est un moyen efficace et économique, utilisé pour faire des études préliminaires et/ou comparatives, tant au stade du développement (conception), qu'au cours du fonctionnement normal des systèmes. Plusieurs outils (spécialisés ou non) de simulation sont utilisés dans le domaine de l'électronique de puissance ou de la commande des machines électriques : ATOSEC5, EMTP, SPICE, SIMNON, MATLAB, SIMULINK, etc. La difficulté de simulation du moteur asynchrone provient de sa structure fortement non-linéaire. Le modèle contient plusieurs blocs non linéaires.

II.5.1- Présentation du logiciel de travail

La simulation, bien connue de nos jours des machines électriques et des entraînements, permet d'analyser les résultats du système avec beaucoup de précision. Dans notre cas toutes les simulations sont effectuées par le logiciel MATLAB et SIMULINK sous MATLAB. Il permet de résoudre des équations différentielles pouvant comporter certains types de nonlinéarités. Il comporte des modules qui peuvent réaliser des fonctions comme la Somme, l'Intégration, Multiplication, le Retard, etc. Dans le cas d'une intégration, il est impératif de spécifier la valeur initiale (elle est d'ailleurs prise égale à zéro par défaut). Il offre également plusieurs méthodes de résolution numérique des équations différentielles (Euler, Runge Kutta d'ordre 3, Runge Kutta d'ordre 5, Adams, Gear, etc) en choisissant convenablement le pas d'intégration adapter à la dynamique du système à résoudre.

II.5.2- Simulation et interprétation

Les équations qu'on a adoptées pour construire notre schémas de simulation sont dérivées de l'équation suivantes :

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dI_{ds}}{dt} &= \frac{1}{\sigma L_s} V_{ds} - \frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{\sigma_s} + \frac{1}{\sigma_r} \right) I_{ds} - p\Omega I_{qs} + \frac{1}{\sigma L_s \tau_r} \phi_{ds} + \frac{1}{\sigma L_s} p\Omega \phi_{qs} \\ \frac{dI_{qs}}{dt} &= \frac{1}{\sigma L_s} V_{qs} + p\Omega I_{ds} - \frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{\sigma_s} + \frac{1}{\sigma_r} \right) I_{qs} - \frac{1}{\sigma L_s} p\Omega \phi_{ds} + \frac{1}{\sigma L_s \tau_r} \phi_{qs} \\ \frac{d\phi_{ds}}{dt} &= V_{ds} - R_s I_{ds} \\ \frac{d\phi_{qs}}{dt} &= V_{qs} - R_s I_{qs} \\ \frac{d\Omega}{dt} &= \frac{1}{J} \left(\frac{3}{2} p (\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} I_{ds}) - f\Omega \right) \\ Ce &= \frac{3}{2} p (\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} I_{ds}) \end{aligned} \right. \quad (II-38)$$

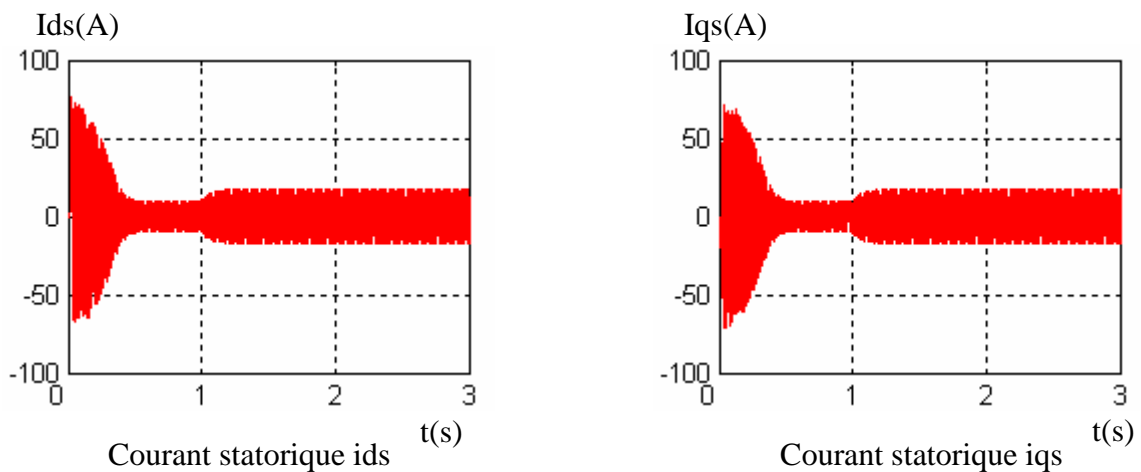
Les paramètres de la machine asynchrone utilisés dans ce travail (Voire annexe (machine 1)):

$$\begin{aligned} R_s &= 2.25 \Omega & \tau_s &= 0.0546 \text{ s} \\ R_r &= 0.7 \Omega & \tau_r &= 0.160 \text{ s} \\ L_s &= 0.1232 \text{ H} & \sigma &= 0.09 \\ L_r &= 0.1122 \text{ H} & J &= 0.038 \text{ Kg.m}^2 \text{ (machine seule)} \\ M &= 0.1118 \text{ H} & & \end{aligned}$$

La machine étant alimentée par un système de tensions sinusoïdales, V_a , V_b et V_c .

Pour un démarrage à vide ($Cr = 0$ N.m), puis une application d'une perturbation de couple ($Cr = 15$ N.m) à l'instant ($t = 1$ s), sous une alimentation de tension efficace ($V=220$ (V)) et de fréquence ($Ws = 100 * \pi$ (Rad/s)), les résultats de simulation sont regroupés sur les figure (II.5), (II.6) et (II.7).

➤ **Pour la simulation de la machine asynchrone lié au stator**



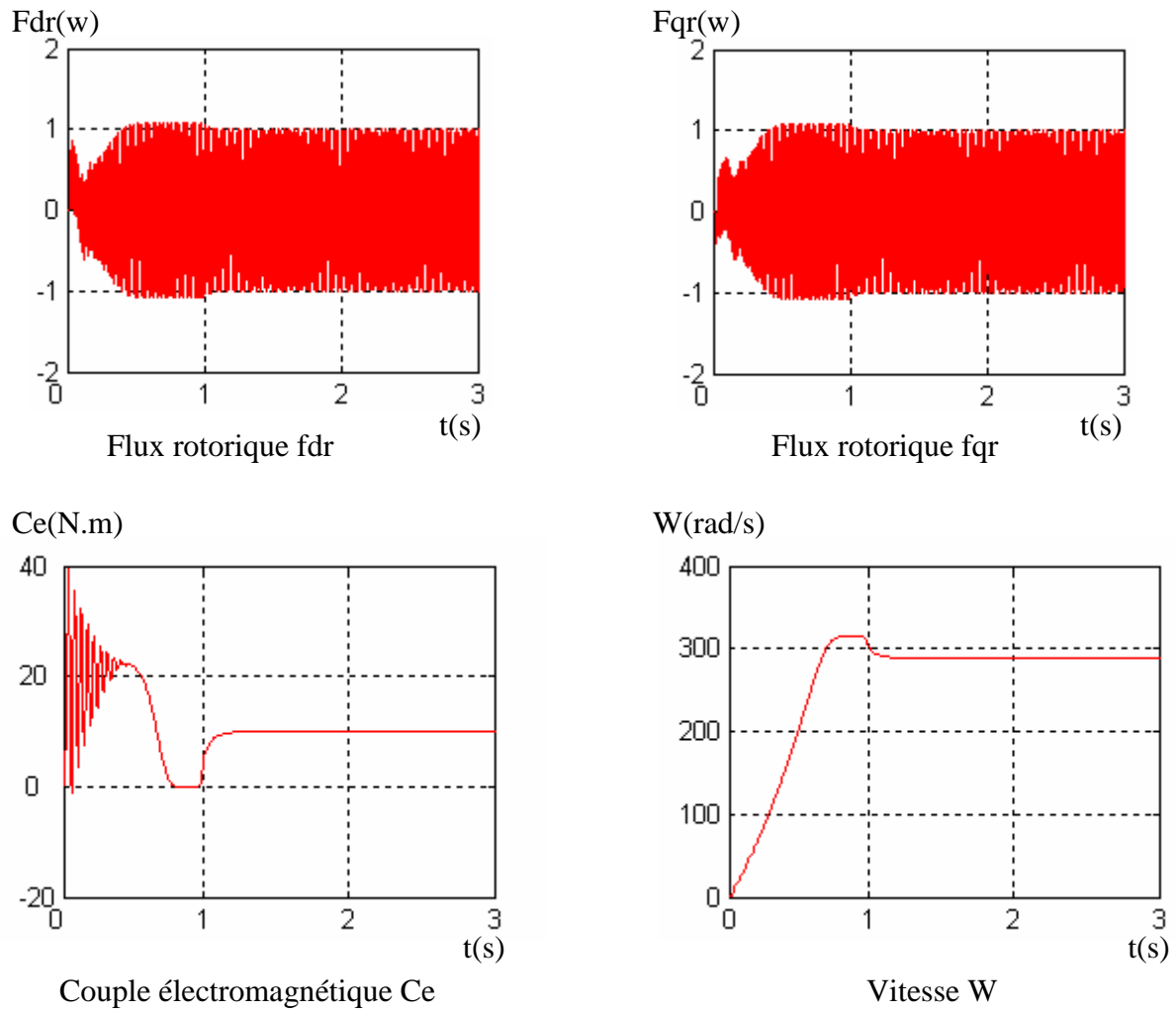
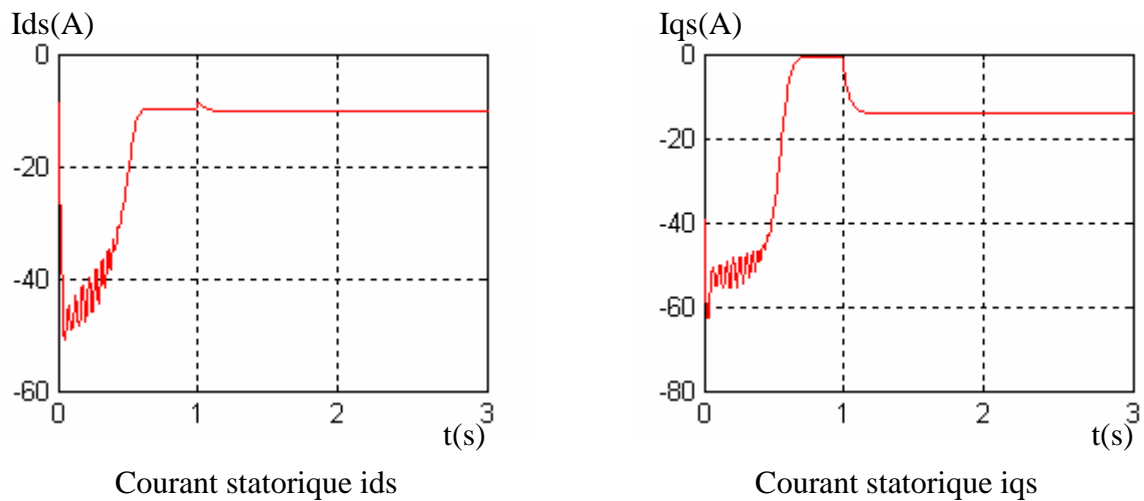


Figure (II.5) : simulation de la machine asynchrone lié au stator dans un régime sain

➤ Pour la simulation de la machine asynchrone lié au champ tournant



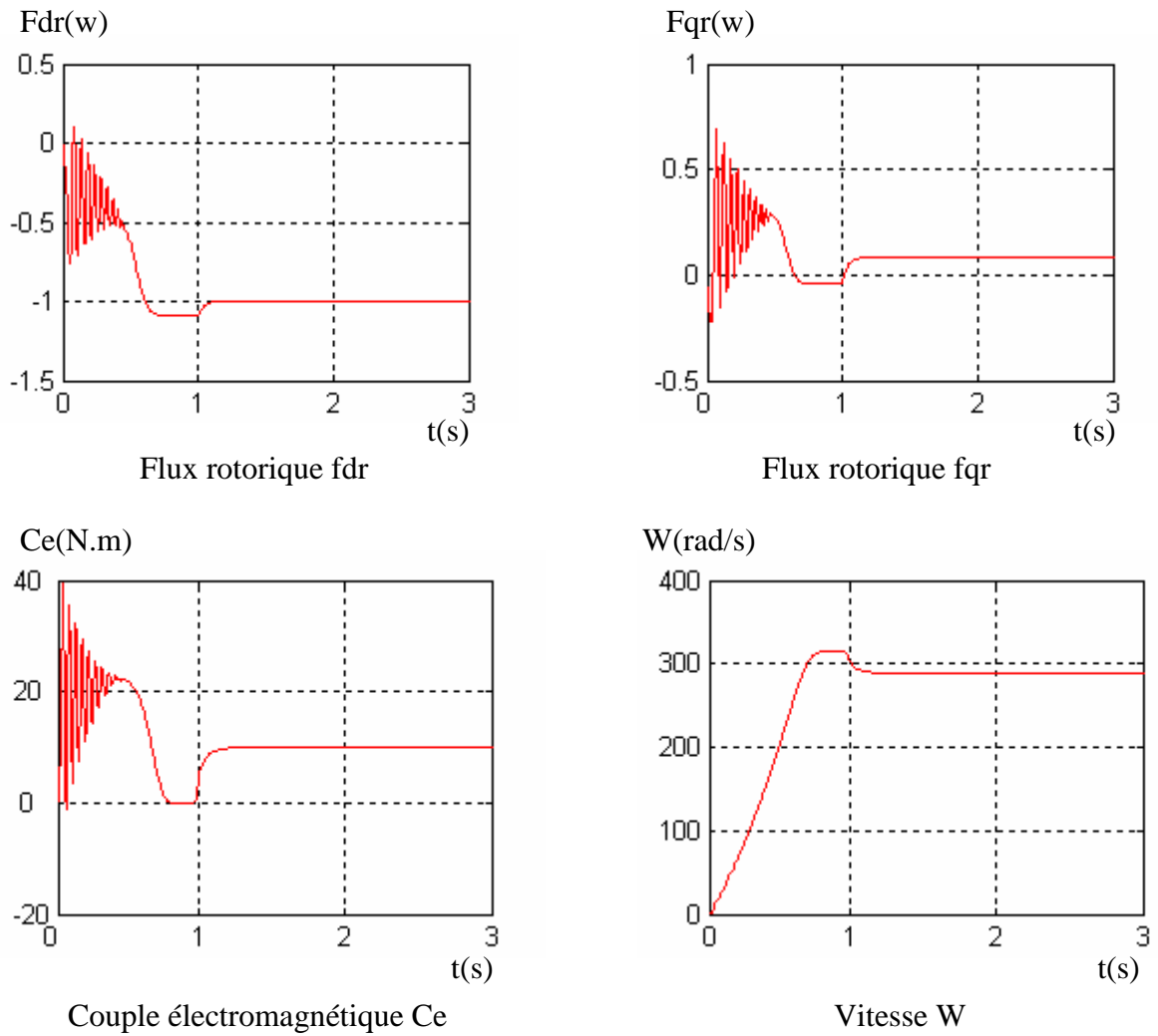
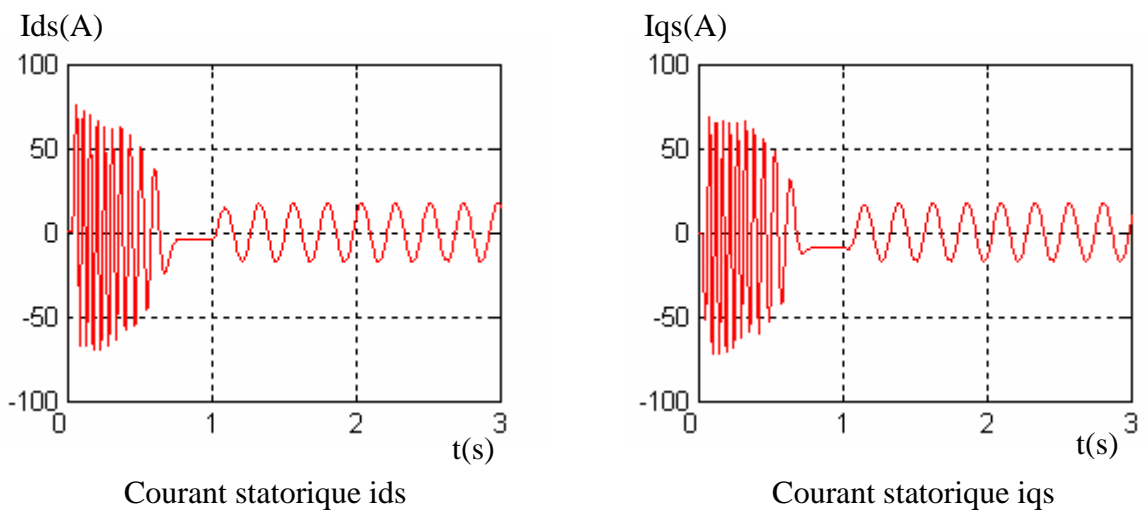


Figure (II.6) : simulation de la machine asynchrone lié au champ tournant dans un régime sain

➤ Pour la simulation de la machine asynchrone lié au rotor



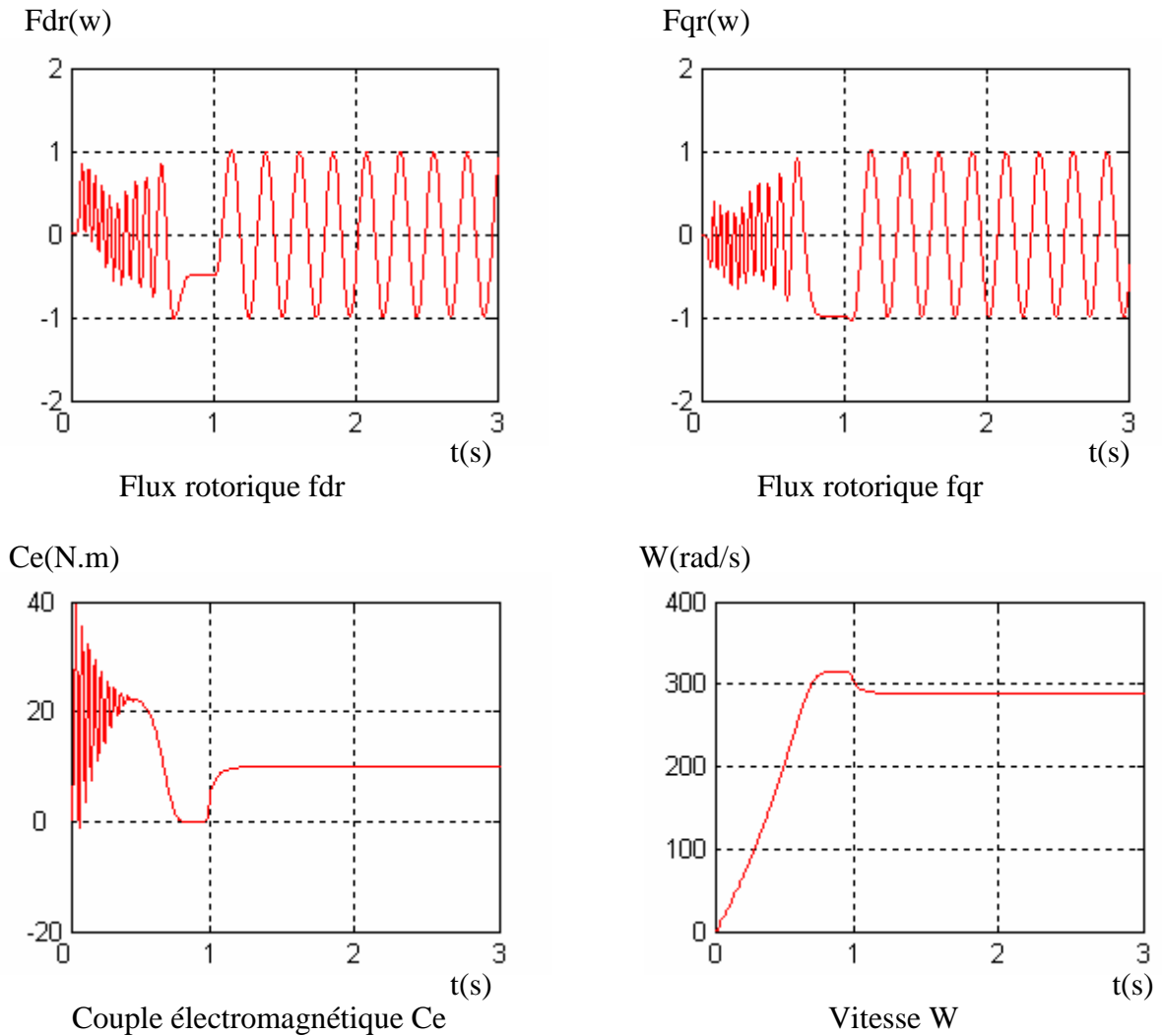


Figure (II.7) : simulation de la machine asynchrone lié au rotor dans un régime sain

❖ *Interprétations et commentaires*

L'examen des courbes de la figure (II.5) (II.6) (II.7) permet de constater que le démarrage à vide sous la pleine tension sous une fréquence de (50 Hz), permet d'avoir un temps d'établissement des courants rotoriques de (0.5 s), et le couple atteint une valeur maximal de (40 N.m) avant de se stabiliser à une valeur nulle en régime permanent.

Les courants rotoriques (I_{dr} et I_{qr}), du fait que la machine n'est pas sollicitée par une charge ($C_r = 0$ N.m), se stabilisent à des valeurs nulles.

II.6- CONCLUSION

Dans ce deuxième chapitre nous avons étudié la machine asynchrone triphasée. Dans un premier lieu, on a fait sa modélisation, et cela à partir des équations de la machine généralisée, et par la suite sa simulation, en utilisant le logiciel " MATLAB" qui nous a permis d'établir les différentes caractéristiques de la machine asynchrone alimentée par une source de tension triphasée.

Donc ce chapitre a permis essentiellement de trouver les résultats classiques de la machine asynchrone.

En fait, dans ce chapitre nous avons considéré la cage comme une seule masse, par contre, dans le chapitre qui suit la cage est considérée comme des barres adjacentes interconnectées entre elles. En effet, pour étudier le comportement de la machine vis-à-vis les défauts rotoriques ; Nous allons modéliser la machine asynchrone, en considérant que le rotor est constitué de N mailles.

CHAPITRE III

COMMANDE VECTORIELLE DE LA MACHINE ASYNCHRONE PRESENTANT DES BARRES DEFECTUEUSES

III.1- MODÈLE MULTI ENROULEMENT DE LA MACHINE ASYNCHRONE

III.1.1- Introduction

La mise en point d'une procédure de diagnostic, à base de modèles analytiques pour les machines asynchrones, nécessite la synthèse d'un modèle décrivant complètement de la machine non pas d'une façon moyenne, comme pour la commande, mais d'une façon plus exacte et plus fine en intégrant certains paramètres de la machine.

Les modèles simples (d, q), négligeant un certain nombre de phénomènes, ses modèles sont fréquemment affectés par les transformations et le changement d'axe. Donc, il a fallu s'orienter vers le modèle multi enroulement pour une description adaptée aux défauts.

La modélisation décrite dans ce chapitre a pour objet de représenter les barres ou les anneaux de court circuit pour une machine asynchrone à cage. Dans cette perspective, nous avons développé un modèle basé sur un circuit maille représentant la cage rotorique, nous avons privilégié l'approche analytique afin de disposer d'un modèle mathématique ne nécessitant pas d'outils de calcul complexe.

III.1.2- Modèle multi enroulement d'une machine asynchrone

L'objectif est de procéder à un développement d'un modèle de la machine asynchrone qui mette en évidence l'influence des défauts étudiés sur les grandeurs mesurables de la machine, principalement les courants. Deux approches sont possibles, la première s'appuie sur la distribution des champs et des courants en tout point de la machine est permet de simuler son fonctionnement en régime des défauts .La seconde approche retenue ici consiste a interprété la machine du point de vue de la théorie des circuits pour faciliter la simulation et la mise au point les problèmes de rupture de barres et d'anneaux de court circuit [BEL 05] [REZ 03].

III.1.2.1- Calcul des inductances [BAG 99]

a - Partie Statorique [BEL 05]

En premier temps, on suppose que les enroulements statoriques sont idéalement distribués autour du périphérique de l'entrefer de telle sorte que l'induction résultante puisse être sinusoïdale, dans ce cas l'expression de la FMM sera :

$$F(\theta) = \frac{2N_s}{\pi \cdot p} I_s \cos(\theta) \quad (\text{III-1})$$

D'après le théorème d'Ampère on peut écrire :

$$F(\theta) = \oint H dl = \frac{N_s \cdot I_s}{p} \quad (\text{III-2})$$

La décomposition de l'induction sera :

$$B(\theta) = \frac{2\mu_0 N_s I_s}{e p \pi} \cos(p\theta) \quad (\text{III-3})$$

Par conséquent, le flux magnétique dans l'entrefer est obtenu par l'intégration de l'expression (III-3) on écrit :

$$\Phi_s = \iint_s B_s ds = \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} B_s R l d\theta$$

On obtient :

$$\Phi_s = \frac{4}{\pi} \mu_0 \frac{N_s}{e \cdot p^2} R l I_s \quad (\text{III-4})$$

Le flux total traversant l'enroulement de la phase « a » est :

$$\Psi_{sa} = N_s \Phi_s = N_s I_s \frac{2\mu_0 N_s R l}{e \cdot p \cdot \pi} \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} \cos(p\theta) d\theta \quad (\text{III-5})$$

Donc:

$$\Psi_{as} = L_{sp} I_s$$

L'inductance principale de la phase « a » statorique d'après (III-5) est donnée par :

$$L_{sp} = 4\mu_0 \frac{N_s^2}{e p^2 \pi} R l \quad (\text{III-6})$$

Le flux de fuite est donné par :

$$\Phi_{fs} = L_{fs} \cdot I_s \quad (\text{III-7})$$

L'inductance totale de la phase «a» est égale a la somme de l'inductance de magnétisation et la l'inductance de fuite :

$$L_{as} = L_{sp} + L_{fs} \quad (\text{III-8})$$

Puisque les enroulements statoriques sont symétriques, les inductances propres des trois phases sont considérées égaux : ($L_{as} = L_{bs} = L_{cs} = L_s$).

b - Partie Rotorique

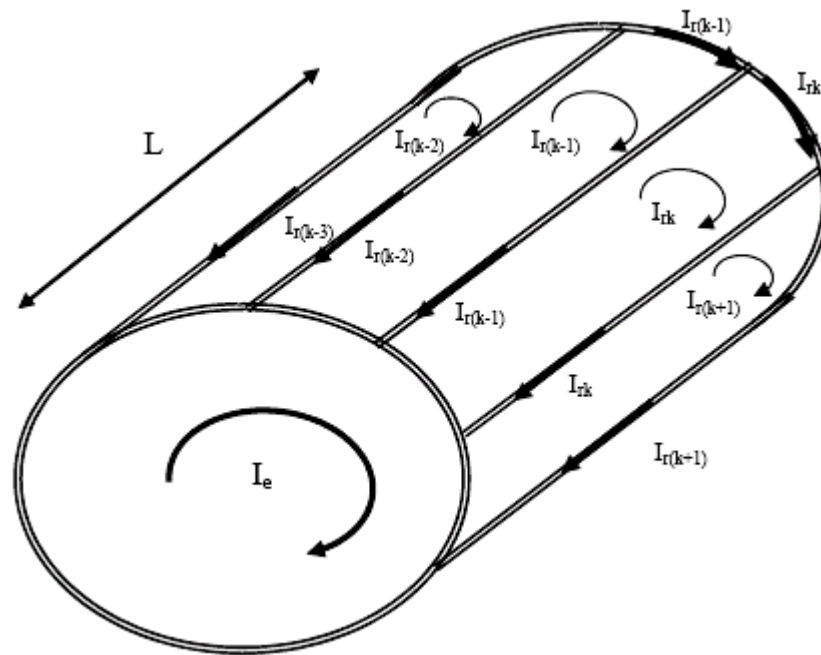


Figure (III.1): structure du rotor

La figure (III.1) illustre la modélisation du rotor par son schéma électrique équivalent, le rotor a été décomposé en circuit élémentaire (mailles) constitué de deux barres et de deux portions d'anneaux les reliant à chaque extrémité. Cette topologie des circuits rotoriques nous permettra d'envisager la rupture de n'importe quelle barre ou de portion d'anneau [BEL 05].

La figure (III.2) représente en fonction de θ , l'allure de l'induction magnétique supposée radiale produite par une maille rotorique dans l'entrefer en remarque que contrairement au stator, elle ne peut se ramener au fondamental de sa décomposition en série de Fourier [BEL 05] [BAG 99].

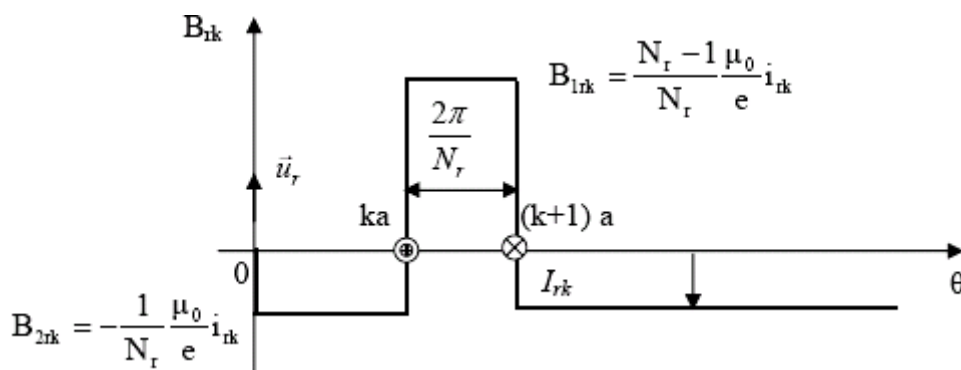


Figure (III.2) : Induction magnétique produite par une maille du rotor

La distribution spatial du champ dû à la k^{ème} boucle de courant rotorique, est considérée comme étant rectangulaire, l'inductance principale et l'inductance mutuelle d'une maille rotorique sont données par l'expression du flux propre de la maille k.

On a donc :

$$\Phi_{rpk} = \int_{ka}^{(k+1)a} B_{1rk} R l d\theta$$

$$\Phi_{rpk} = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi R l}{e} I_{rk} \quad \text{(III-9)}$$

L'inductance propre d'une boucle rotorique est :

$$L_{rp} = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi R l}{e} \quad \text{(III-10)}$$

L'inductance totale de la k^{ème} maille rotorique est égale à la somme de son inductance principale, des inductances de fuite des deux barres et des inductances de fuites de deux portions d'anneaux de court circuit fermant la maille k.

$$L_{rr} = L_{rp} + 2 L_b + 2 L_e \quad \text{(III-11)}$$

Les mailles rotoriques sont magnétique ment couplées par l'intermédiaire du flux rotorique d'entrefer, le flux traversant la j^{ème} maille produit par le courant i_{rk} circulant dans la maille k est donné par :

$$\Phi_{rjrk} = \int_{ja}^{(j+1)a} B_{2rk} R l d\theta$$

$$\Phi_{rjrk} = \int_{ja}^{(j+1)a} \left(-\frac{1}{N_r} \frac{\mu_0}{e} R l I_{rk} \right) d\theta \quad \text{(III-12)}$$

D'après l'équation (III-12) on obtint l'inductance mutuelle :

$$M_{rr} = -\frac{1}{N_r^2} \frac{\mu_0}{e} 2\pi l R \quad \text{(III-13)}$$

c- Mutuelle inductances entre stator et rotor

L'induction produite par la bobine de la phase « n » dans la k^{ème} maille rotorique est donnée par :

$$B_{msr} = \frac{2\mu_0 N_s I_s}{e p \pi} \cos\left(p\theta - n\frac{2\pi}{3}\right) \quad \text{(III-14)}$$

Avec $n = (1, 2, 3)$

Le flux traversant la maille k , est donné par :

$$\Phi_{rka} = \int_{ka}^{(k+1)a} B_{msr} R l d\theta$$

On obtient:

$$\Phi_{rka} = \frac{2 \mu_0}{\pi e p} N_s R l I_s \frac{1}{p} \left[\sin \left(p\theta - n \frac{2\pi}{3} \right) \right]_{ka}^{(k+1)a} \quad \text{(III-15)}$$

L'inductance mutuelle entre la phase « a » du stator et la maille rotorique est :

$$M_{rka} = -M_{sr} \cos \left(p\theta - n \frac{2\pi}{3} + ka \right) \quad \text{(III-16)}$$

$$\text{avec } M_{sr} = \frac{4 \mu_0 N_s R l}{\pi e p^2} \sin \left(\frac{a}{2} \right), \quad a = p \frac{2\pi}{N_r}$$

III.1.2.2- Mise en équation

Nous utilisons une transformation de Clarke pour passer des grandeurs triphasées statoriques (a, b, c) aux grandeurs diphasées (α, β). Nous pouvons effectuer la simulation avec deux repères distincts pour le stator et le rotor.

Pour alléger le temps de calcul, on élimine l'angle θ de la matrice de couplage en choisissant le repère le plus adéquat et qui est celui du rotor. Dans ce repère, toutes les grandeurs ont une pulsation gW_s en régime permanent. Cette caractéristique peut être utilisée pour l'analyse de rupture de barres rotoriques dans la machine par l'observation du courant I_{ds} .

a - Stator

On déduit pour l'ensemble des phases statoriques

$$[Vsabc] = [Rs] [I sabc] + \frac{d}{dt} [\Phi sabc] \quad \text{(III-17)}$$

Après transformation et rotation, les équations électriques dans le repère rotorique s'écrivent :

$$V_{ds} = R_s I_{ds} - W \Phi_{qs} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} \quad \text{(III-18)}$$

$$V_{qs} = R_s I_{qs} + W \Phi_{ds} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} \quad \text{(III-19)}$$

Avec :

$$\Phi_{sdq} = \begin{bmatrix} L_{sc} & 0 \\ 0 & L_{sc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} - M_{sr} \begin{bmatrix} \dots & \cos j\alpha & \dots \\ \dots & \sin j\alpha & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{r0} \\ \vdots \\ I_{rj} \\ \vdots \\ I_{r(Nr-1)} \end{bmatrix} \quad (III-20)$$

b - Rotor

Le rotor à cage est représenté par la figure (III.3)

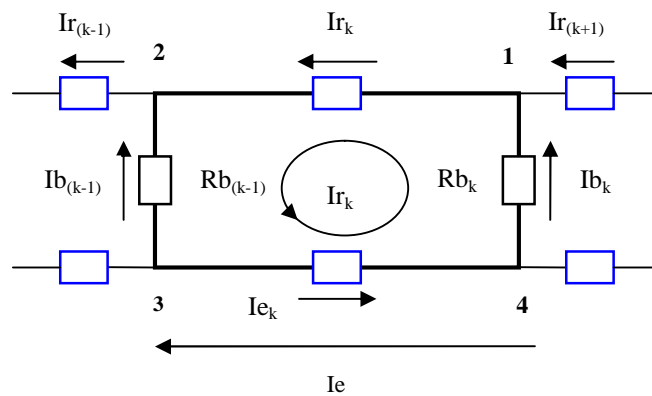


Figure (III.3) : Représentation d'une maille rotorique.

I_{rk} Représente le courant de maille K , I_{bk} le courant de la barre K .

Pour le nœud n° 1: $I_{bk} = I_{rk} - I_{r(k+1)}$ (III-21)

Pour le nœud n° 2: $I_{b(k-1)} = I_{r(k-1)} - I_{rk}$ (III-22)

L'équation électrique relative à la maille K est :

$$0 = \frac{Re}{Nr} I_{rk} - R_{b(k-1)} I_{b(k-1)} + \frac{Re}{Nr} [I_{rk} - I_e] + R_{bk} I_{bk} + \frac{d\Phi_{rk}}{dt} \quad (III-23)$$

Pour simuler la rupture de barre, il faut forcer à zéro ou diminuer fortement le courant parcourant la barre k . pour ce faire, il suffit d'en augmenter suffisamment la résistance.

Le flux induit dans la maille rotorique est donné par :

$$\Phi_{rk} = L_{rp} I_{rk} + M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^{Nr-1} I_{rj} - \frac{3}{2} M_{sr} (I_{ds} \cos K\alpha + I_{qs} \sin K\alpha) + \frac{L_e}{Nr} (I_{rk} + I_{ek}) + L_b (-I_{b(k-1)} + I_{bk}) \quad (III-24)$$

Le terme en L_{rp} représente le flux principal, celui en M_{rr} représente le flux mutuel avec les autres mailles rotoriques, puis viennent les termes de couplage avec le stator. On remarquera le facteur $\frac{3}{2}$ par rapport à l'équation statorique à cause de la transformation de Clark.

Les termes en L_b et L_e représentent les fuites rotoriques.

En le réécrivant uniquement en fonction des courants de maille on aboutit à :

$$\Phi_{rk} = \left(L_{rp} + \frac{2L_e}{Nr} + 2L_b \right) I_{rk} + M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^{Nr-1} I_{rj} - L_b (I_{r(k-1)} + I_{r(k+1)}) - \frac{3}{2} M_{sr} (I_{ds} \cos K\alpha + I_{qs} \sin K\alpha) - \frac{L_e}{Nr} I_e \quad (III-25)$$

Pour k allant de 0 à $Nr-1$

L'équation relative à l'anneau de court circuit est:

$$L_e \frac{dI_e}{dt} - \frac{L_e}{Nr} \sum_{k=0}^{Nr-1} \frac{dI_{rk}}{dt} = - \left(R_e I_e - \frac{R_e}{Nr} \sum_{k=0}^{Nr-1} I_{rk} \right) \quad (III-26)$$

Le système complet $[L] \frac{d[I]}{dt} = [V] - [R][I]$ devient :

$$\begin{bmatrix} L_{sc} & 0 & \dots & \dots & \dots & -M_{sr} \cos j\alpha & \dots & \dots & 0 \\ 0 & L_{sc} & \dots & \dots & \dots & -M_{sr} \sin j\alpha & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & L_{rp} + \frac{2L_e}{Nr} + 2L_b & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} & M_{rr} - L_b & -\frac{L_e}{Nr} \\ \vdots & \vdots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + \frac{2L_e}{Nr} + 2L_b & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} & \vdots \\ -\frac{3}{2} M_{sr} \cos k\alpha & -\frac{3}{2} M_{sr} \sin k\alpha & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} & M_{rr} - L_b & L_{rp} + \frac{2L_e}{Nr} + 2L_b & -\frac{L_e}{Nr} \\ 0 & 0 & \frac{L_e}{Nr} & \dots & \dots & \dots & \dots & -\frac{L_e}{Nr} & L_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ \vdots \\ I_{r0} \\ \vdots \\ I_{rj} \\ \vdots \\ I_{r(Nr-1)} \\ \vdots \\ I_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_e & -WL_{sc} & \dots & \dots & M_{sr} W \sin j\alpha & \dots & \dots & 0 \\ -WL_{sc} & R_e & \dots & \dots & -M_{sr} W \cos j\alpha & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 2\frac{R_e}{Nr} + R_{r0} + R_{r(Nr-1)} & -R_{r0} & 0 & 0 & -R_{r(Nr-1)} & \frac{R_e}{Nr} \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & -R_{r(k-1)} & 2\frac{R_e}{Nr} + R_{rk} + R_{r(k-1)} & -R_{rk} & 0 & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & -R_{r(Nr-1)} & 0 & 0 & -R_{r(Nr-2)} & 2\frac{R_e}{Nr} + R_{r(Nr-2)} + R_{r(Nr-1)} & \frac{R_e}{Nr} \\ 0 & 0 & \frac{R_e}{Nr} & \dots & \dots & \dots & -\frac{R_e}{Nr} & \frac{R_e}{Nr} \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & R_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ \vdots \\ I_{r0} \\ \vdots \\ I_{rj} \\ \vdots \\ I_{r(Nr-1)} \\ \vdots \\ I_e \end{bmatrix} \quad (III-27)$$

Le couple électromagnétique est obtenu par dérivation de co-énergie:

$$C_e = \frac{3}{2} P [I_s dq]^t \frac{\delta}{\delta \theta} \begin{bmatrix} \dots & -M_{sr} \cos(\theta + k\alpha) & \dots \\ \dots & -M_{sr} \cos(\theta + k\alpha) & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vdots \\ I_{rk} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (III-28)$$

$$C_e = \frac{3}{2} P M_{sr} \left\{ I_{ds} \sum_{k=0}^{Nr-1} I_{rk} \sin k\alpha - I_{qs} \sum_{k=0}^{Nr-1} I_{rk} \cos k\alpha \right\} \quad (III-29)$$

On y ajoute les équations mécaniques afin d'avoir la vitesse $\Omega = \frac{W}{P}$

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} P (C_e - C_r - \frac{f}{P} W) \quad (III-30)$$

Et: $\frac{d\theta}{dt} = W$

Le système ci-dessus est très compliqué pour le programmer et l'exécution d'une simulation d'un tel modèle est très lente, c'est pour cela qu'on a optés pour un autre modèle, modèle *dq*.

Pour ce faire, nous avons appliqué une transformation généralisée (*Nr*) qui permet de passer des *Nr* grandeurs équilibrées vers deux grandeurs *dq*. La simulation de ce modèle est très rapide.

III.1.3- La transformation de (*Nr*) grandeurs équilibrées vers deux grandeurs (*d q*)

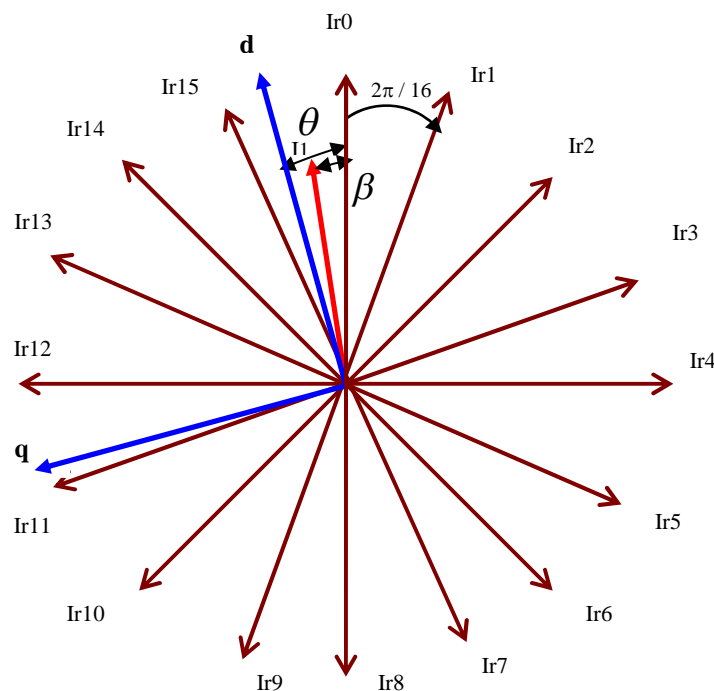


Figure (III.4) : projection du modèle multi enroulement sur le modèle *dq*

La projection de τ_1 sur les axes I_{rk} donne:

$$\begin{cases} I_{r0} = I_1 \cos \beta \\ I_{r1} = I_1 \cos(\beta + \frac{2\pi}{16}) \\ I_{r2} = I_1 \cos(\beta + \frac{4\pi}{16}) \\ \vdots \\ \vdots \\ I_{r15} = I_1 \cos(\beta + \frac{30\pi}{16}) \end{cases} \quad (III-31)$$

Et la projection de τ_1 sur les axes d et q donne :

$$\begin{cases} I_d = I_1 \cos(\theta - \beta) \\ I_q = -I_1 \sin(\theta - \beta) \end{cases} \quad (III-32)$$

Et sous forme matricielle on trouve :

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \frac{2}{16} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{16}) & \cos(\theta + \frac{4\pi}{16}) & \dots & \dots & \cos(\theta + \frac{30\pi}{16}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{16}) & -\sin(\theta + \frac{4\pi}{16}) & \dots & \dots & -\sin(\theta + \frac{30\pi}{16}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{r0} \\ I_{r1} \\ I_{r2} \\ \vdots \\ \vdots \\ I_{r15} \end{bmatrix} \quad (III-33)$$

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} I_{r0} \\ I_{r1} \\ I_{r2} \\ \vdots \\ \vdots \\ I_{r15} \end{bmatrix}$$

III.1.3.1- La matrice de résistance du modèle (dq) équivalent

$$[R_{e,q}] = {}^a A [R] {}^a A^{-1} \quad (III-34)$$

$$\begin{bmatrix} R_s & -WL_{sc} & \dots & \dots & M_s W \sin \alpha & \dots & \dots & 0 \\ -WL_{sc} & R_s & \dots & \dots & -M_s W \cos \alpha & \dots & \dots & 0 \\ \hline 0 & 0 & \frac{2R_r}{N_r} + R_{b0} + R_{b(N_r-1)} & -R_{b0} & 0 & 0 & -R_{b(N_r-1)} & \frac{R_r}{N_r} \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & -R_{b(N_r-1)} & \frac{2R_r}{N_r} + R_{b_k} + R_{b(N_r-k)} & -R_{b_k} & 0 & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & -R_{b(N_r-1)} & 0 & 0 & -R_{b(N_r-2)} & \frac{2R_r}{N_r} + R_{b(N_r-2)} + R_{b(N_r-1)} & \frac{R_r}{N_r} \\ \hline 0 & 0 & -\frac{R_r}{N_r} & \dots & \dots & \dots & \frac{R_r}{N_r} & R_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R1 & R2 & R3 \\ R4 & R5 & R6 \\ R7 & R8 & R9 \end{bmatrix} \quad (III-35)$$

➤ **Passage du modèle polyphasé au modèle biphasé**

A fin de simplifier le calcul de la matrice ci-dessus, on la subdivise en neufs résistances équivalentes, cette subdivision nous permet de mieux comprendre, le passage du modèle de Nr grandeurs vers deux grandeurs dq .

La nouvelle matrice de résistance du modèle dq équivalent, en considérant que toutes les barres sont saines pourra être présentée sous la forme [PFE 2005]:

$$[R_{e\ q}] = \begin{bmatrix} R_s & -WL_{sc} & 0 & -\frac{N_r}{2}WM_{sr} & 0 \\ WL_{sc} & R_s & -\frac{N_r}{2}WM_{sr} & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & S1 & S2 & 0 \\ 0 & 0 & S3 & S4 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & Re \end{bmatrix} \quad (III-36)$$

On calcule les différentes sous matrices ($S1, S2, S3, et S4$) ;

$$S1 = \frac{2}{16} \left[\left(2 \frac{Re}{Nr} + R_{b0} + R_{b15} \right) \cos^2 0\alpha + \left(2 \frac{Re}{Nr} + R_{b1} + R_{b0} \right) \cos^2 1\alpha + \dots + \left(2 \frac{Re}{Nr} + R_{b14} + R_{b15} \right) \cos^2 15\alpha \right] - \frac{4}{16} [(R_{b0} \cos 0\alpha \cos 1\alpha) + (R_{b1} \cos 1\alpha \cos 2\alpha) + \dots + (R_{b15} \cos 15\alpha \cos 0\alpha)] \quad (III-37)$$

$$S2 = -\frac{2}{16} \left[\left(2 \frac{Re}{Nr} + R_{b0} + R_{b15} \right) \cos 0\alpha \sin 0\alpha - \left(2 \frac{Re}{Nr} + R_{b1} + R_{b0} \right) \cos 1\alpha \sin 1\alpha - \dots - \left(2 \frac{Re}{Nr} + R_{b14} + R_{b15} \right) \cos 15\alpha \sin 15\alpha \right] + \frac{2}{16} [(R_{b0} \sin 0\alpha \cos 1\alpha) + (R_{b1} \sin 1\alpha \cos 2\alpha) + \dots + (R_{b15} \sin 15\alpha \cos 0\alpha)] + \frac{2}{16} [(R_{b0} \cos 0\alpha \sin 1\alpha) + (R_{b1} \cos 1\alpha \sin 2\alpha) + \dots + (R_{b15} \cos 15\alpha \sin 0\alpha)] \quad (III-38)$$

$$S3 = -\frac{2}{16} \left[\left(2 \frac{Re}{Nr} + R_{b0} + R_{b15} \right) \cos 0\alpha \sin 0\alpha - \left(2 \frac{Re}{Nr} + R_{b1} + R_{b0} \right) \cos 1\alpha \sin 1\alpha - \dots - \left(2 \frac{Re}{Nr} + R_{b14} + R_{b15} \right) \cos 15\alpha \sin 15\alpha \right] + \frac{2}{16} [(R_{b0} \sin 0\alpha \cos 1\alpha) + (R_{b1} \sin 1\alpha \cos 2\alpha) + \dots + (R_{b15} \sin 15\alpha \cos 0\alpha)] + \frac{2}{16} [(R_{b0} \cos 0\alpha \sin 1\alpha) + (R_{b1} \cos 1\alpha \sin 2\alpha) + \dots + (R_{b15} \cos 15\alpha \sin 0\alpha)] \quad (III-39)$$

$$S4 = \frac{2}{16} \left[\left(2 \frac{Re}{Nr} + R_{b0} + R_{b15} \right) \cos^2 0\alpha + \left(2 \frac{Re}{Nr} + R_{b1} + R_{b0} \right) \cos^2 1\alpha + \dots + \left(2 \frac{Re}{Nr} + R_{b14} + R_{b15} \right) \cos^2 15\alpha \right] - \frac{4}{16} [(R_{b0} \cos 0\alpha \cos 1\alpha) + (R_{b1} \cos 1\alpha \cos 2\alpha) + \dots + (R_{b15} \cos 15\alpha \cos 0\alpha)] \quad (III-40)$$

Si on considère que toutes les barres sont saines ($R_{b0} = R_{b1} = \dots = R_{b15}$)

Les sous matrices $S1, S2, S3, et S4$ Deviennent :

$$S1 = S4 = 2 \frac{Re}{Nr} + 2Rb(1 - \cos \alpha) \quad ; \quad S2 = S3 = 0$$

En posant :

$$Rr = 2 \frac{Re}{Nr} + 2Rb(1 - \cos \alpha)$$

La nouvelle matrice de résistance du modèle dq équivalent, en considérant que toutes les barres sont saines est [BAG 99] :

$$[Re_q] = \left[\begin{array}{cc|cc|c} R_s & -WL_{sc} & 0 & -\frac{Nr}{2}WM_{sr} & 0 \\ WL_{sc} & R_s & -\frac{Nr}{2}WM_{sr} & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & Rr & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Rr & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & Re \end{array} \right] \quad (III-41)$$

Avec :

$$Rr = 2 \frac{Re}{Nr} + 2Rb(1 - \cos \alpha)$$

III.1.3.2- La matrice d'inductance du modèle (d q) équivalent

$$[Leq] = {}^a A [L] {}^a A^{-1} \quad (III-42)$$

$$\left[\begin{array}{cc|cccccc|c} L_{sc} & 0 & \dots & \dots & \dots & -M_{sr}\cos\alpha & \dots & \dots & 0 \\ 0 & L_{sc} & \dots & \dots & \dots & -M_{sr}\sin\alpha & \dots & \dots & 0 \\ \hline \vdots & \vdots & L_{rp} + \frac{2L_e}{Nr} + 2L_b & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} & M_{rr} - L_b & -\frac{L_e}{Nr} \\ \vdots & \vdots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + \frac{2L_e}{Nr} + 2L_b & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} & \vdots \\ -\frac{3}{2}M_{sr}\cos\alpha & -\frac{3}{2}M_{sr}\sin\alpha & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} & M_{rr} - L_b & L_{rp} + \frac{2L_e}{Nr} + 2L_b & -\frac{L_e}{Nr} \\ \hline 0 & 0 & \frac{L_e}{Nr} & \dots & \dots & \dots & \dots & \frac{L_e}{Nr} & L_e \end{array} \right] \quad (III-43)$$

$$\left[\begin{array}{c|c|c} L1 & L2 & L3 \\ \hline L4 & L5 & L6 \\ \hline L7 & L8 & L9 \end{array} \right]$$

➤ **Passage du modèle polyphasé au modèle biphasé**

La nouvelle matrice d'inductance du modèle dq équivalent, en considérant que toutes les barres sont saines pourra être présentée sous la forme [PFE 05]:

$$[L_{sq}] = \begin{bmatrix} L_{sc} & 0 & -\frac{N_r}{2}M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{sc} & 0 & \frac{N_r}{2}M_{sr} & 0 \\ -\frac{3}{2}M_{sr} & 0 & L_{rc} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}M_{sr} & 0 & L_{rc} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_e \end{bmatrix} \quad (III-44)$$

Avec :

$$L_{rc} = L_{rp} - M_{rr} + 2\frac{L_e}{N_r} + 2L_b(1 - \cos\theta)$$

Donc le système complet en considérant que toutes les barres sont saines est :

$$\begin{bmatrix} L_{sc} & 0 & -\frac{N_r}{2}M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{sc} & 0 & \frac{N_r}{2}M_{sr} & 0 \\ -\frac{3}{2}M_{sr} & 0 & L_{rc} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}M_{sr} & 0 & L_{rc} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_e \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \\ I_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s & -\omega L_{sc} & 0 & -\frac{N_r}{2}\omega M_{sr} & 0 \\ \omega L_{sc} & R_s & -\frac{N_r}{2}\omega M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \\ I_e \end{bmatrix} \quad (III-45)$$

III.1.4- Simulation du modèle (dq)

Nous simulons le modèle ci-dessus ;

Les paramètres de la machine utilisée (voir Annexe (machine 2))

$$R_s = 7.828 \Omega \quad , \quad J = 0.006093 \text{ Kg } m^2 \quad , \quad f = 0.00725 \text{ Nm } s / rd$$

Rayon = 0.03575 m , Longueur = 0.065 m , Entrefer = 0.00025 m

$N_s = 160$, $N_r = 16$, $L_{sl} = 0.018 H$

$R_{bsain} = 150 \cdot 10^{-6} \Omega$, $R_e = 72 \cdot 10^{-6} \Omega$, $L_b = 10^{-7} H$

$L_e = 10^{-7} H$

Les figures qui suivent présentent les résultats obtenus par simulation du modèle $d q$.

Les figures (III.5), (III.6), et (III.7) montrent l'évolution de la vitesse, du couple, et du courant statorique, le démarrage de cette machine s'effectue à vide.

Nous constatons que le temps d'établissement de ces variables est rapide (0.23s).

Le couple atteint une valeur maximale de 18.5 N.m, avant de se stabiliser à une valeur nulle en régime permanent.

A l'instant $t = 0.5s$ on applique un couple résistant nominal de 3.5 N.m, qui nous permet de constater que le couple électromagnétique rejoint sa valeur pour compenser cette sollicitation avec une réponse quasiment instantanée.

Une décroissance de la vitesse qui se traduit par un glissement.

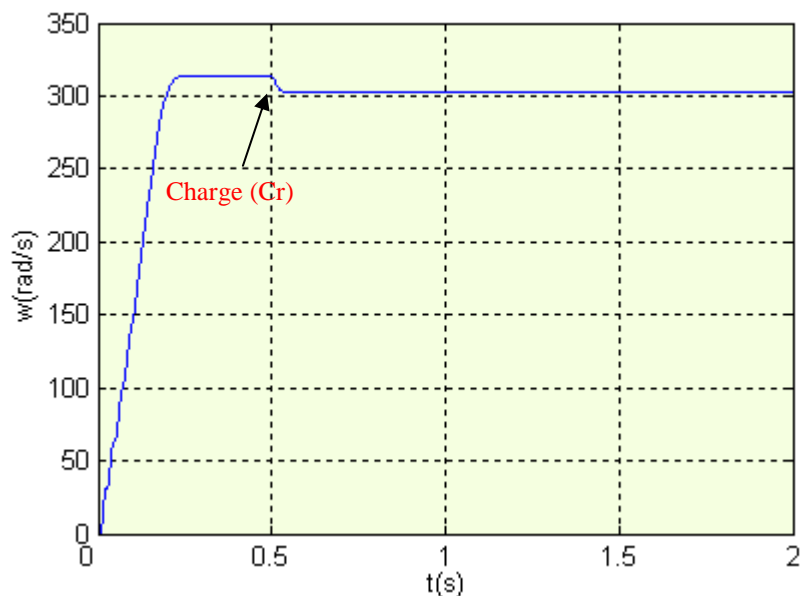


Figure (III.5): Vitesse (moteur sain).

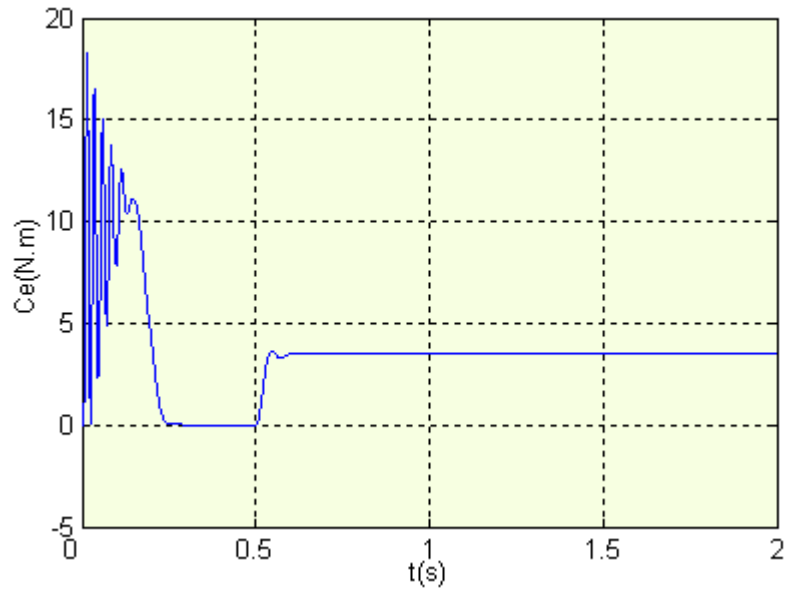


Figure (III.6): Couple (moteur sain).

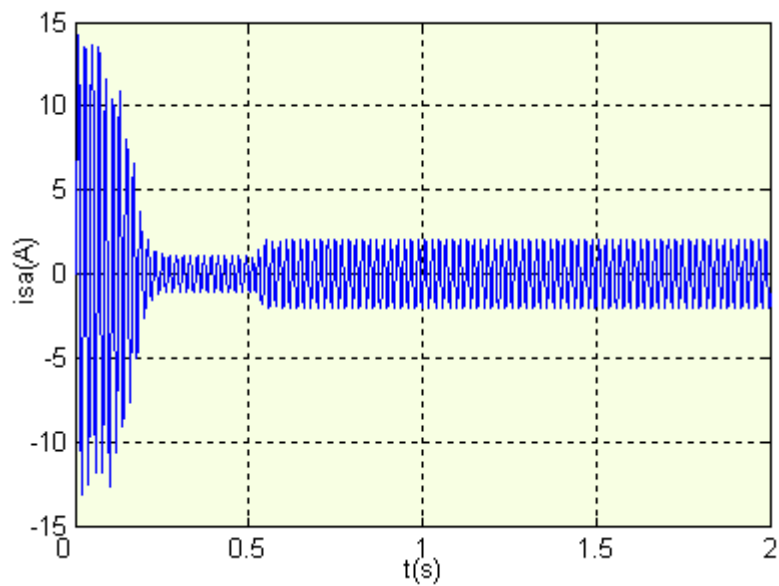


Figure (III.7): Courant statorique (moteur sain).

III.1.5- Modélisation des défauts dans le cas d'une cassure d'une barre ou de deux barres

Le modèle (Eq. (III.45)) élaboré ci-dessus permet de simuler la rupture de barres au rotor. En effet, dans le cas où on veut simuler la rupture d'une barre ou de deux barres les seules valeurs qui vont changer sont: S_1 , S_2 , S_3 et S_4 .

III.1.5.1- Cassures de barres

La cassure des barres est un des défauts les plus fréquents du rotor.

La simulation numérique nous permettra d'identifier les signatures de ce défaut et de prévoir les détériorations provoquées dans le moteur.

Pour illustrer la cassure totale de barres dans le modèle de la machine, la valeur de la résistance barre cassée sera considérée égale à onze (11) fois la valeur de la résistance initiale [BAG 99].

➤ *La cassure d'une barre*

Nous simulons la rupture de la première barre ($k=0$) donc $R_b \text{ cassé} = 11 * R_b \text{ sain}$

Les valeurs de S_1 , S_2 , S_3 et S_4 deviennent :

$$S_1 = 3.29213 * 10^{-5}$$

$$S_2 = 5.45625 * 10^{-6}$$

$$S_3 = 5.45625 * 10^{-6}$$

$$S_4 = 3.29213 * 10^{-5}$$

➤ *La cassure de deux barres*

On simule la rupture de deux barres adjacentes ($K=0$, $K=1$)

Les valeurs de S_1 , S_2 , S_3 et S_4 deviennent :

$$S_1 = 4.11738 * 10^{-5}$$

$$S_2 = 1.86375 * 10^{-5}$$

$$S_3 = 1.86375 * 10^{-5}$$

$$S_4 = 4.11738 * 10^{-5}$$

III.1.5.2- Simulation des défauts rotoriques à la présence d'une charge sur l'arbre du moteur

❖ *Interprétations et commentaires*

- ▶ Les figures suivantes présentent les résultats obtenus par simulation du modèle précédent
- ▶ Les figures ((III.8), (III.9), (III.10)) montrent l'évolution de la vitesse, courant statorique, et le couple électromagnétique lors de cette essai.

- Le démarrage s'effectue à vide.
- A partir de l'instant: ($T=0.5$ s) nous procédons à un échelon de couple résistant nominal de (3.5 N.m).

- ▶ La vitesse chute à (303.6 rad/sec) figure (III.8), et le couple électromagnétique vient équilibrer le couple résistant figure (III.9).
- A: (t =1s), nous provoquons le premier défaut avec la rupture de la première barre (K=0), nous constatons :
 - ▶ La détérioration de la barre réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et fait apparaître les oscillations figure (III.9).
 - ▶ L'oscillation sur la vitesse figure (III.8).
 - ▶ Les courants des phases statoriques sont toujours déphasés entre eux de (120°), ce pendant une ondulation de l'amplitude des courants apparaît avec la cassure de la barre, la figure (III.10) illustre cette ondulation.
 - ▶ Le rotor avec ce défaut de la structure crée en plus de champ rotorique direct qui tourne à ($g \cdot \omega_s$) par rapport au rotor, un champ inverse qui lui tourne à ($-g \cdot \omega_s$) dans le repère rotorique. L'interaction de ces champs avec celui issu du bobinage statorique donne naissance à un couple électromagnétique (somme d'une composante directe constante et d'une composante inverse sinusoïdale), de pulsation ($2g\omega_s$). Elle sera la cause d'oscillations sur la vitesse [BAG 99].
- A: (t = 2 s) on simule la rupture de la barre adjacente (k=1), donc on a deux barres cassées.
 - ▶ Les effets de la cassure de barre (oscillation de W et Ce) croit rapidement avec le nombre de barres cassé ; d'où on observe:
 - ▶ Augmentation de l'amplitude des oscillations. La grande amplitude des oscillations accélère la détérioration de la machine.
 - ▶ L'amplitude des courants des phases statoriques. est proportionnelle au nombre de barres cassées.
 - ▶ Lors des défauts rotoriques, les courants dans les barres cassées chutent pratiquement à zéro, tandis que les courants dans les barres voisines deviennent déséquilibrés. Les courants qui conduisaient les barres cassées se répartit alors dans les barres voisines [BOU 01] [BAG 99].

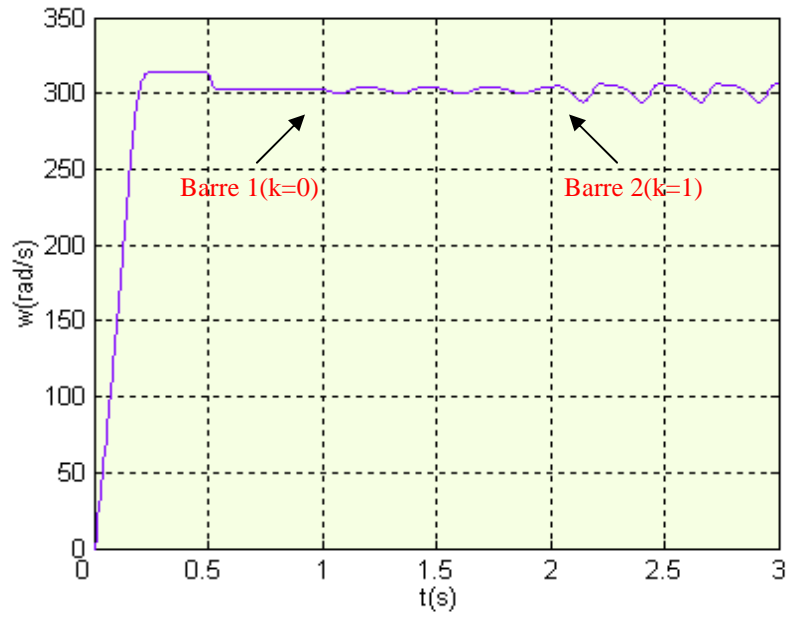


Figure (III.8): Vitesse au démarrage, en charge puis lors de la rupture des barres



Figure (III.9): Couple au démarrage, en charge puis lors de la rupture des barres

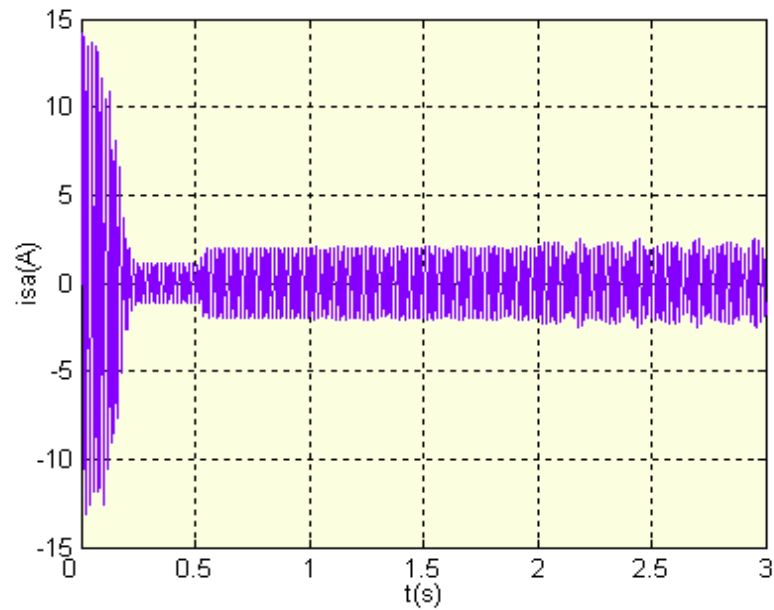


Figure (III.10): Courant au démarrage, en charge puis lors de la rupture des barres

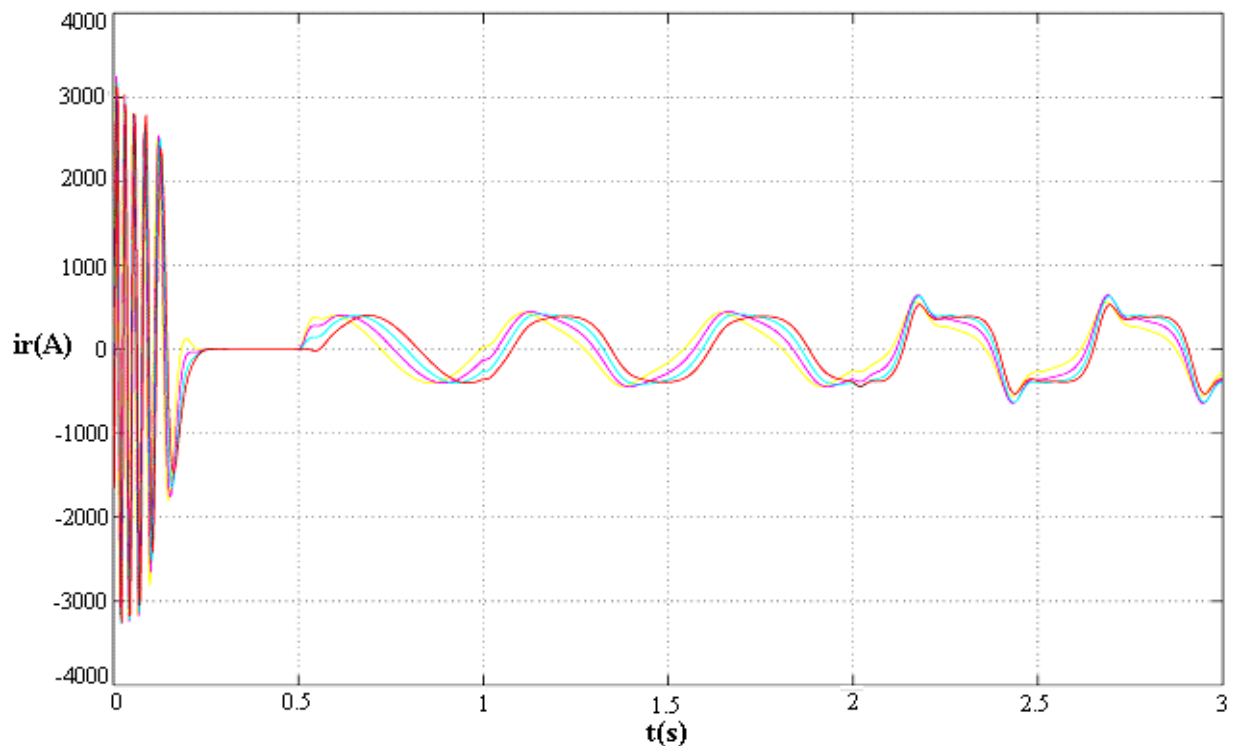


Figure (III.11): Courant dans les quatre barres voisines, au démarrage, en charge puis lors de la rupture de la barre ($k=0$) à 1s et de la barre ($k=1$) à 2s

Cette figure (III.11) représente l'image des courants rotoriques lors de l'application des défauts. On remarque à l'instant $t=1s$ et $t=2s$ où on a appliqué un défaut (la cassure d'une barre), le courant correspondant à cette barre s'annule.

On observe aussi une influence sur les autres courants des barres (mailles adjacentes).

III.2- COMMANDE VECTORIELLE DE LA MACHINE ASYNCHRONE

III.2.1- Introduction

La machine asynchrone, dont le rotor ne tourne pas à la vitesse du champ tournant et dont la seule entrée électrique est au stator, pose des problèmes difficiles pour sa commande.

La commande scalaire est la plus ancienne méthode utilisée pour le contrôle de la machine asynchrone. La simplicité de mise en oeuvre de cette méthode la fait préférer dans des systèmes ne nécessitant pas des fonctionnements à très basse vitesse et fort couple.

Dans le cas contraire, il faut faire appel à la méthode vectorielle pour obtenir des performances élevées et améliorer le comportement dynamique de la machine.

III.2.2- Pour quoi la commande vectorielle

Les machines asynchrones, utilisées en asservissement de vitesse dans les applications industrielles subissent actuellement un développement spectaculaire, au détriment des moteurs à courant continu, qui sont moins performants en terme du couple et notamment beaucoup plus onéreux du point de vue construction et entretien.

La machine à courant continu à excitation séparée offre comme principale avantage, c'est d'être facilement commandable. Le flux et le couple sont découplés et contrôlés indépendamment.

- ✦ Le courant inducteur I_f est producteur de flux.
- ✦ Le courant induit I_a est producteur du couple.

Cependant, la présence du correcteur et des balais a toujours été le point faible de la machine à courant continu. En effet ce commutateur mécanique limite la puissance, la vitesse et son entretien devient plus exigeant.

Face à ces limitations, la simplicité de construction, le coût, l'environnement de fonctionnement et la robustesse des machines asynchrones ont toujours attiré les chercheurs. En effet, dans ces machines, le découplage naturel de la machine à courant continu n'existe plus, ce qui rend la machine difficile à commander, cette difficulté réside dans le fait qu'il existe un couplage complexe entre les variables d'entrées (tension, fréquence) et les variables de sortie (couple, vitesse) en passant par les variables internes de la machine (courant rotorique, flux).

Ainsi, grâce à l'autopilotage, la commande d'un moteur asynchrone devient similaire à celle d'un moteur à courant continu et l'absence du collecteur mécanique assure sa robustesse.

III.2.3- Modélisation de la machine asynchrone

L'étude des machines électriques et de leur commande en régime dynamique nécessite l'emploi d'une méthode particulière de modélisation. La plus utilisée actuellement est celle de Park [BOS 86] [LES 81].

Il apparaît clairement ensuite que les repères de la transformation de Park des grandeurs rotoriques doivent coïncider pour simplifier les équations.

Ceci se fait en liant angles θ_s et θ_r par la relation:

$$\theta_s = \theta + \theta_r \tag{III-46}$$

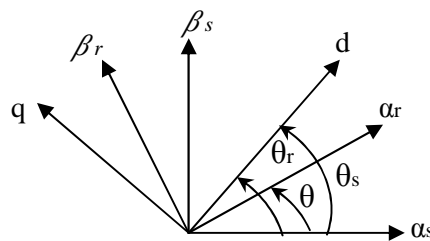


Figure (III.12): Transformation de park

Le flux (Φ) peut représenter:

- ▶ Flux rotorique : $\Phi_{dr} = \Phi_r$; $\Phi_{qr} = 0$
- ▶ Flux statorique : $\Phi_{ds} = \Phi_s$; $\Phi_{qs} = 0$
- ▶ Flux d'entrefer : $\Phi_{gr} = \Phi_g$; $\Phi_{qs} = 0$

Dans les trois cas le couple est proportionnel au produit du flux par la composante du courant statorique en quadrature avec le flux.

L'orientation du flux rotorique permet d'obtenir un couple de démarrage important et nécessite la connaissance des paramètres rotorique.

Dans tout ce qui va suivre l'orientation du flux rotorique est la méthode qui sera retenue.

Les flux dans ce système d'axes s'écrivent:

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \varphi_{dr} = M I_{ds} + L_r I_{dr} \\ \varphi_{qr} = M I_{qs} + L_r I_{qr} \end{cases} \tag{III-47}$$

En tenant compte de ces relations, la puissance mécanique P_m peut s'écrire:

$$P_m = \frac{3}{2} (\varphi_{ds} I_{qs} - \varphi_{qs} I_{ds}) \frac{d}{dt} (\theta_s - \theta_r) \quad \text{Avec: } \frac{d}{dt} (\theta_s - \theta_r) = \frac{d\theta}{dt} = p\Omega \quad (\text{III-48})$$

Et le couple électromagnétique:

$$C_e = \frac{3}{2} p (\varphi_{ds} I_{qs} - \varphi_{qs} I_{ds}) \quad (\text{III-49})$$

Les équations des tensions de la machine s'écrivent dans le référentiel lié au champ tournant comme suit:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ 0 = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_r \varphi_{qr} \\ 0 = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III-50})$$

L'avantage d'utiliser ce référentiel, est d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent. Il est alors plus aisé d'en faire la régulation.

III.2.4- Commande vectorielle de la machine asynchrone

Le but de la commande vectorielle est d'arriver à commander la machine asynchrone comme une machine à courant continu à excitation indépendante où il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux (le courant d'excitation), et celle liée au couple (le courant d'induit). Ce découplage permet d'obtenir une réponse très rapide du couple.

En parlant d'orientation du flux, c'est plutôt le système d'axe d-q que l'on oriente de manière à ce que l'axe d soit en phase avec le flux, c'est-à-dire:

$$\begin{cases} \varphi_d = \varphi \\ \varphi_q = 0 \end{cases} \quad (\text{III-51})$$

La commande vectorielle à orientation du flux rotorique est la plus utilisée car elle élimine l'influence des réactances de fuite rotorique et statorique et donnent de meilleurs résultats que les méthodes basées sur l'orientation du flux statorique ou d'entrefer [BOS 86].

III.2.4.1- Equations des tensions

En imposant $\varphi_{qr} = 0$, Les équations de la machine dans un référentiel lié au champ tournant deviennent :

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_r = \varphi_{dr} \\ V_{ds} = R_s I_{ds} + \sigma L_s \frac{dI_{ds}}{dt} + \frac{M}{L_r} \frac{d\varphi_r}{dt} - \omega_s \sigma L_s I_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \sigma L_s \frac{dI_{qs}}{dt} + \omega_s \frac{M}{L_r} \varphi_r + \omega_s \sigma L_s I_{ds} \\ \tau_r \frac{d\varphi_r}{dt} + \varphi_r = M I_{ds} \\ \omega_r = \frac{M}{\tau_r \varphi_r} I_{qs} \\ C_e = p \frac{M}{L_r} \varphi_r I_{qs} \end{array} \right. \quad (III-52)$$

Après passage par une transformation de Laplace nous obtenons :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = (R_s + p \sigma L_s) I_{ds} + p \frac{M}{L_r} \varphi_r - \omega_s \sigma L_s I_{qs} \\ V_{qs} = (R_s + p \sigma L_s) I_{qs} + \omega_s \frac{M}{L_r} \varphi_r + \omega_s \sigma L_s I_{ds} \end{array} \right. \quad (III-53)$$

$$\varphi_r = \frac{M}{1 + p \tau_r} I_{ds} \quad \text{Ainsi :} \quad \varphi_r = M I_{ds} \quad \text{En régime permanent} \quad (III-54)$$

$$\omega_r = \frac{M}{\tau_r \varphi_r} I_{qs} \quad (III-55)$$

D'où :

$$I_{qr} = \frac{-M}{L_{rc}} I_{qs} \quad (III-56)$$

Ce qui conduit à l'expression:

$$C_e = \frac{3}{2} p \frac{M}{L_{rc}} \varphi_r I_{qs} \quad (III-57)$$

Il existe des méthodes de commande vectorielle directe et indirecte .dans celle-ci, l'angle de park θ_s est calculé à partir de la pulsation statorique .pour la commande directe, l'angle de park est calculé directement à l'aide des grandeurs mesurées ou estimées.

III.2.4.2- Méthodes de commande vectorielle des moteurs asynchrones

a- Commande vectorielle directe

Cette méthode nécessite une bonne connaissance du module du flux et de sa position et celui ci, doit être vérifiée quelque soit le régime transitoire effectué .Il faut donc procéder à une série de mesure aux bornes du système.

La mesure directe permet de connaître exactement la position du flux .Ce mode de contrôle garantit un découplage correct entre le flux et le couple, quelque soit le point de fonctionnement .Toute fois il nécessite l'utilisation d'un capteur de flux, ce qui augmente considérablement le coût de sa fabrication et rend plus fragile son utilisation.

L'application de cette méthode impose plusieurs inconvénients de natures différentes [CAR 95] :

- La non fiabilité de la mesure du flux :
 - problème de filtrage du signal mesuré.
 - précision médiocre de la mesure qui varie en fonction de la température (échauffement de la machine) et de la saturation.
- Le coût de production élevé (capteurs + filtre).

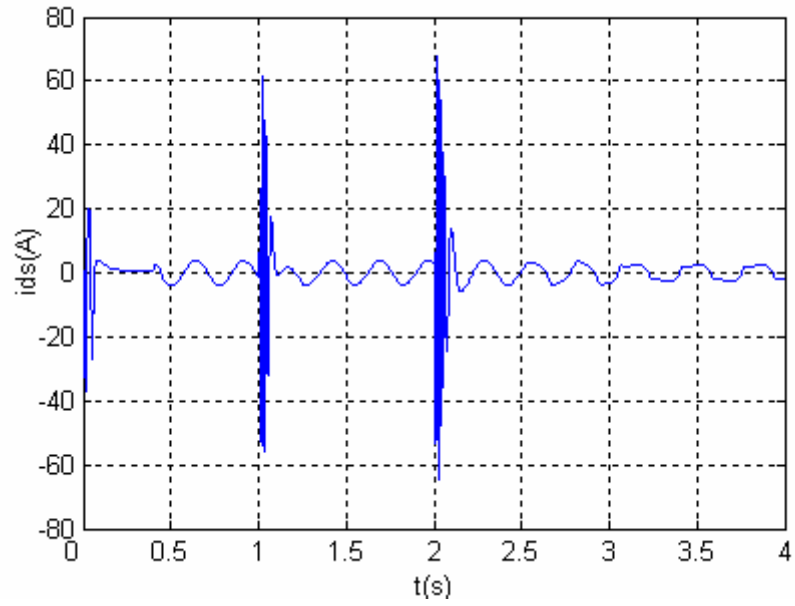
b- Commande vectorielle indirecte par orientation de flux rotorique

Dans ce type de commande, l'angle θ_s utilisé pour la transformation directe et inverse est calculé à partir de la formule suivante [BAG 99].

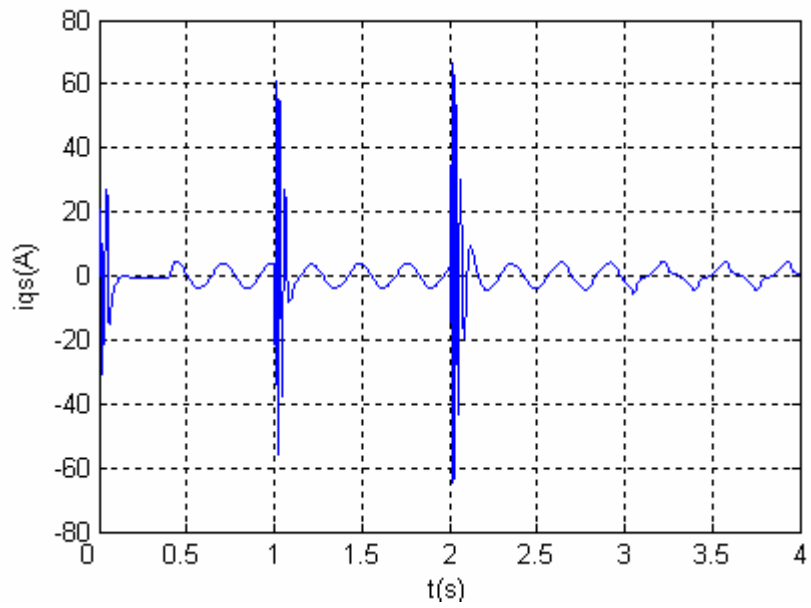
$$\theta_s = \int \left(p\Omega + \frac{\dot{I}_{qs}}{\tau_r \dot{I}_{ds}} \right) dt \quad \text{Ou:} \quad I_{ds}^* = \frac{\Phi_r^*}{M} \quad (\text{III-58})$$

La figure (III.13).représente le schéma bloc d'une régulation de vitesse du moteur asynchrone commandé par orientation du flux rotorique.

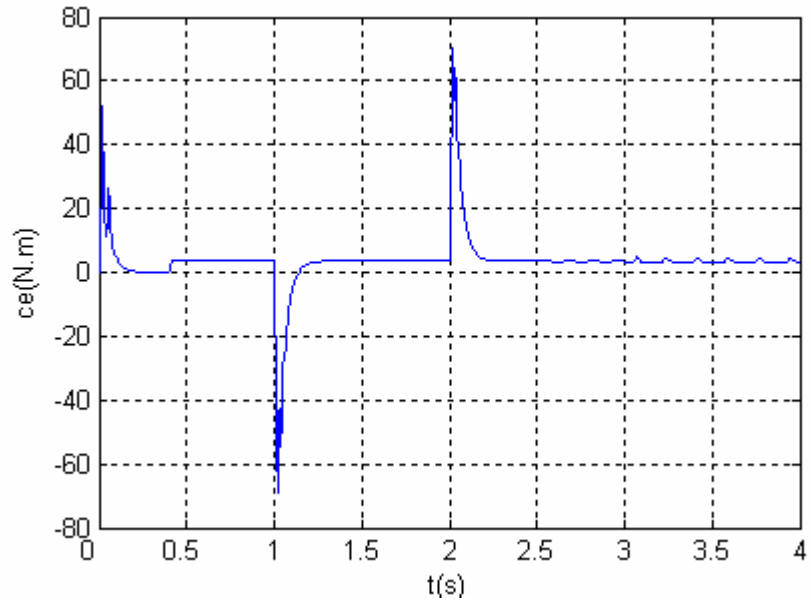
Les principaux constituants dans ce type de commande sont la boucle de régulation de vitesse, celles des courants I_{ds} et I_{qs} , le bloc de calcul de θ_s et les transformations directe et inverse.



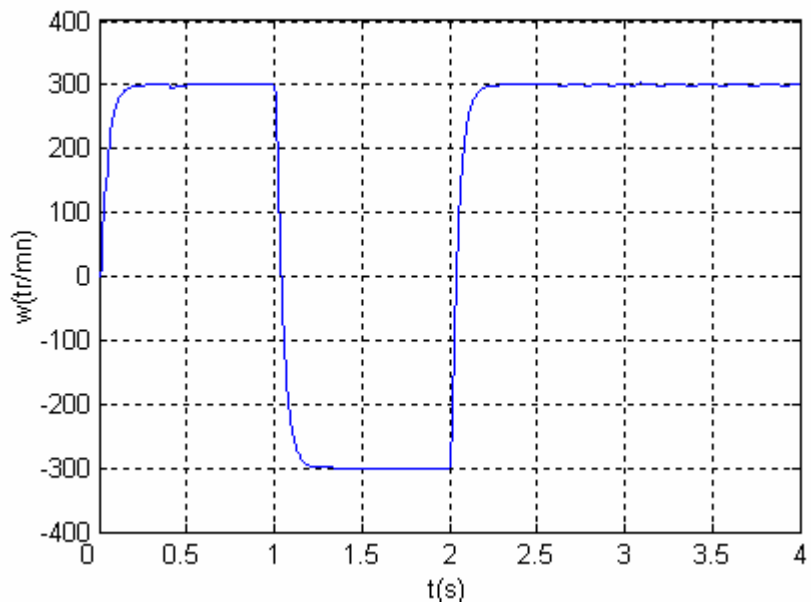
Courant statorique i_{ds}



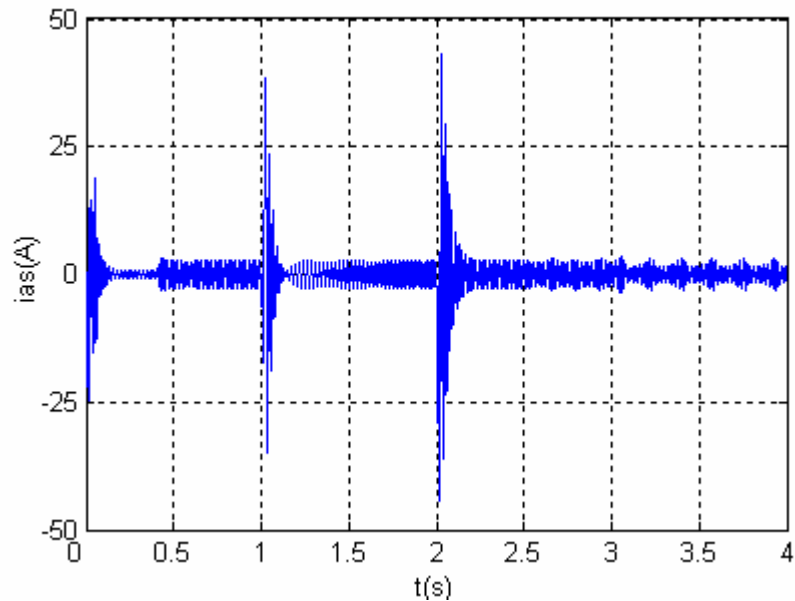
Courant statorique i_{qs}



Couple électromagnétique C_e



Vitesse W



Courant ias(A)

Figure (III.14) : Simulation de la commande vectorielle à inversion du sens de rotation avec cassure de barre

❖ **Interprétations du résultat**

Un échelon de couple de 3.5 N.m est appliqué à $t=0.4s$ nous observons une chute momentanée de vitesse. le régime ainsi établi, à $t=1s$ nous inversons le sens de rotation et retour au premier sens à $t=2s$.

Nous procédons à la simulation d'une première défaut "cassure d'une barre" par une augmentation de la résistance de cette barre. après un régime transitoire très bref, la deuxième défaut " cassure de quatre barres" adjacente cède à $t=3s$. la vitesse toujours peu perturbée par ce défaut. pour le courant Ias on voit bien une déformation lors de la cassure de la barre.

Pour le couple électromagnétique, son amplitude augmente à l' instant où on applique une retour de sens de rotation et première cassure de barre.

III.3- Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre nous avons présenté le modèle multi-enroulement, en considérant que le rotor est constitué de plusieurs résistances séparées, et chaque résistance représente une barre de la cage d'écureuil. Ce modèle nous a permis de simuler les défauts rotoriques, tels que les cassures de barres rotoriques.

Les résultats obtenus permettent de conclure, que la cassure de barres fait apparaître des oscillations sur le courant, le couple et la vitesse. D'autre part les défauts sont caractérisés par des cumulatifs lors de la rupture de barres.

Les résultats obtenus peuvent être utilisés en diagnostic en analysant les harmoniques des courants statoriques qui permettent de constater une corrélation entre le défaut et les amplitudes des composantes à la fréquence égale à $f_s(1 \pm 2.g)$.

Nous avons étudié dans la deuxième partie l'influence d'un défaut rotorique (cassure de barre) sur courant statorique. L'association du modèle multi enroulement et celui de Park nous a permis réaliser la simulation et le commande de la machine en présence d'un défaut.

Nous avons abordé l'influence de la commande sur la réponse de la machine asynchrone qui présente des défauts.

CHAPITRE IV

RESEAUX DE NEURONES

ARTIFICIELS

IV- RÉSEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS

IV.1- Introduction

Le terme "réseaux de neurones artificiels" regroupe un certain nombre de modèles dans l'intention d'imiter certaines fonctions du cerveau humain reproduisant quelques unes de ses structures de base.

Par ailleurs, les réseaux de neurones sont adaptés comme outil d'aide aux opérations de reconnaissance et de classification, entre autre, celles liées à la résolution des problèmes de diagnostic utilisant la classification automatique des signaux et des formes.

Ce chapitre a pour but d'exposer les éléments nécessaires à la compréhension de la théorie et de la pratique des réseaux de neurones, en vue d'élaborer le système automatique de diagnostic des défaillances du système électromécanique.

Le présent chapitre comprend :

- la description des fondements biologiques des réseaux de neurones .
- leur modélisation et la présentation des modèles les plus importants permettant l'apprentissage des RNA .
- l'étude des applications et des perspectives d'utilisation des réseaux de neurones.

Enfin, à la lumière de l'analyse effectuée les principales caractéristiques des RNA utilisés pour l'élaboration du système automatique de diagnostic des défaillances seront définies.

IV.2- Les réseaux de neurones biologiques

Les cellules nerveuses, appelées neurones, sont les éléments de base du système nerveux central , celui-ci en posséderait environ cent milliards. Par ailleurs, il existe de nombreuses variétés de neurones, les différences portant tant sur les aspects anatomiques que sur les aspects fonctionnels.

En général, chaque neurone biologique possède un axone qui peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres, un corps cellulaire où se situe le mécanisme du déclenchement du neurone, des dendrites qui reçoivent des informations des autres neurones et des terminaisons axonales qui émettent des informations vers les autres neurones (fig IV.1). Les neurones sont interconnectés entre eux par des synapses dont le nombre est d'environ 10000 milliards. ceci signifie qu'un neurone reçoit en moyenne des excitations en provenance de 1000 neurones, et qui émet également des informations à 1000 neurones différents.

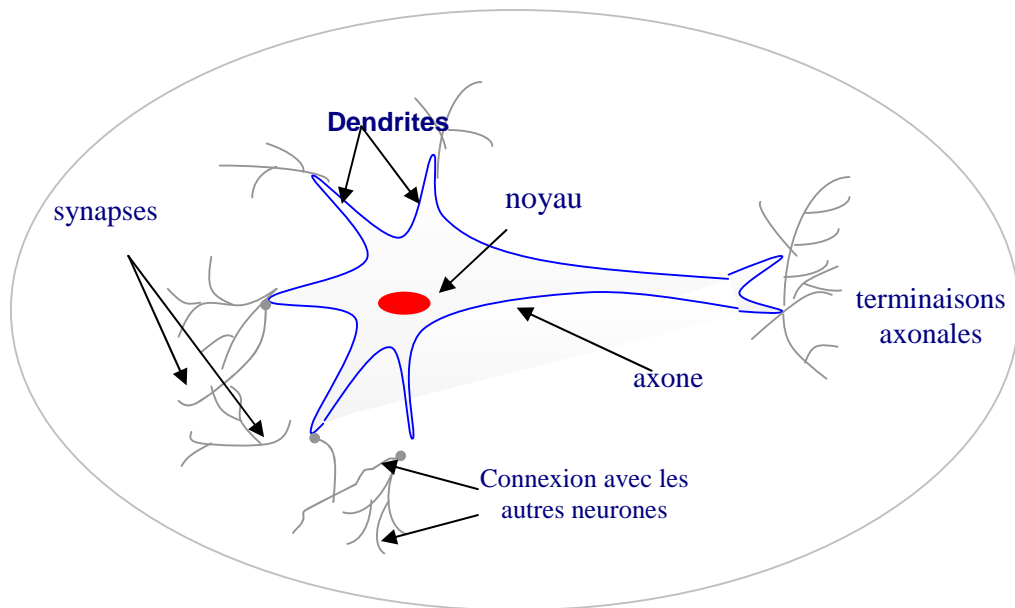


Figure (IV.1): schéma simplifié d'un neurone du cerveau humain.

Il existe quatre modes de communications entre neurones :

- liaison terminaison axonale-dendritique.
- liaison terminaison axonale-corps cellulaire.
- liaison axone-axone.
- liaison dendrite-dendrite.

Le processus de communication entre les neurones se fait par voie électrochimique aux niveaux des synapses par des neurotransmetteurs, ces fonctions spécifiques dépendent essentiellement des propriétés de la membrane externe du neurone, cette dernière remplit cinq fonctions principales:

- elle sert à propager des impulsions électriques tout au long de l'axone et des dendrites;
- elle libère des médiateurs à l'extérieur de l'axone.
- elle réagit au niveau du corps cellulaire aux impulsions électriques que lui transmettent les dendrites pour générer ou non une nouvelle impulsion.
- enfin, elle permet au neurone de reconnaître les autres neurones afin qu'il puisse se situer dans l'architecture anatomique du cerveau et de trouver les cellules auxquelles il doit être connecté.

Généralement, les réseaux de neurones artificiels sont basés sur une théorie électrique selon laquelle la jonction synaptique, est l'endroit où le neurone perçoit un stimulus par voie électrochimique. La membrane synaptique, lorsqu'elle ne reçoit pas d'excitation, est polarisée à une tension supérieure à un seuil donné, le neurone étant alors activé et cela déclenche un

processus de dépolarisation, le neurone émet sur l'axone une tension positive d'environ +60 ÷ +70mv en se comportant comme un système non linéaire. C'est ce type de modèle qui est majoritairement retenu pour simuler artificiellement les neurones du cerveau humain.

IV.3- Les neurones artificiels

Le premier modèle d'un neurone artificiel a été présenté dans les années quarante par Mac Culloch et Pitts. Par analogie avec le modèle électrochimique décrit ci-dessus, ils ont proposé le modèle d'un neurone artificiel qui est établi conformément au modèle non linéaire représenté sur la figure (IV.2).

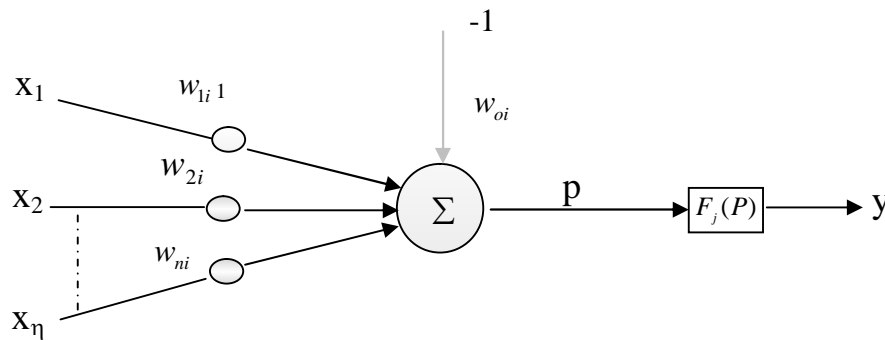


Figure (IV.2): modèle du neurone de Mc CULLOCH et PITTS

Chaque neurone artificiel transforme l'ensemble des signaux qu'il reçoit en un signal de sortie qui est communiqué à d'autres neurones. Cette transformation s'effectue en deux étapes:

Le neurone effectue une sommation pondérée des potentiels (principe de superposition), la valeur numérique obtenue représente l'état du neurone qui l'a émis, afin d'obtenir une stimulation résultante globale :

$$p_i = \sum_{j=1}^{j=N} w_{ij}x_j - w_{oi} \tag{IV-1}$$

A l'aide d'une fonction de transfert, on teste le neurone. Si cette stimulation dépasse un certain seuil, le neurone est activé et transmet une réponse.

Dans ce cas : $s_i = f_i(P)$ (IV-2)

$$f_i(P) = \begin{cases} 1 & \text{si } P > \beta \\ 0 & \text{si } P \leq \beta \end{cases}$$

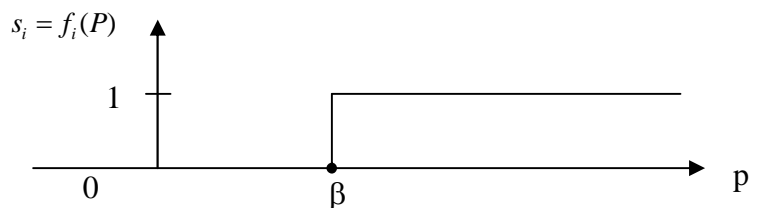


Figure (IV.3): fonction de seuillage avec un sommateur

On peut représenter cette fonction par le graphe suivant:

D'une façon générale, on peut définir un neurone formel (artificiel) par les quatre éléments suivants :

- la nature de ses entrées .
- la fonction d'entrée totale qui définit le prétraitement effectué sur les entrées.
- la fonction d'activation (ou d'état) du neurone qui définit son état interne en fonction de son entrée globale .
- La fonction de sortie.

Nous adopterons par la suite les notations suivantes :

$(e_i) i=1:n$ les entrées .

h la fonction d'entrée totale .

f la fonction d'activation.

g la fonction de sortie.

D'autre part, nous utiliserons également les désignations suivantes :

$E = h(e_1, \dots, e_n)$ comme entrée totale.

$A = f(E)$ comme état du neurone.

$S = f(A)$ comme sortie.

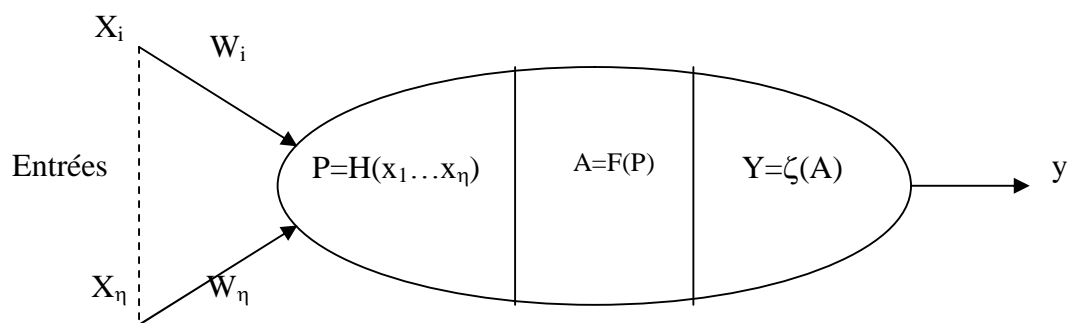


Figure (IV.4): modélisation générale d'un neurone

- **Nature des entrées et des sorties**

elles peuvent être:

- binaires: $(-1,+1)$ ou $(0,1)$
- réelles.

• La fonction d'entrée totale h

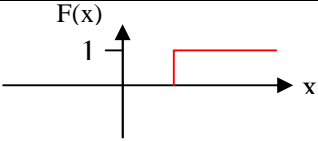
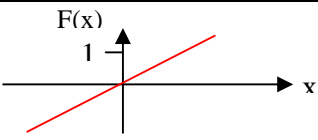
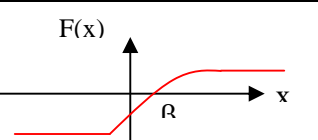
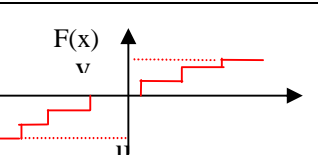
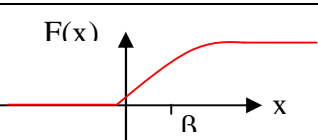
elle peut être :

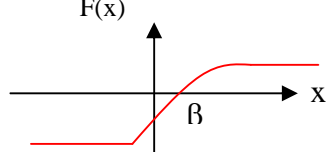
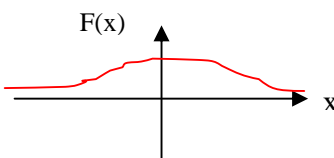
- booléenne .
- linéaire : $h(e_1...e_2) = \sum_{j=1:n} w_j e_j$
- affine: $h(e_1...e_2) = \sum_{j=1:n} w_j e_j - a$ (IV-3)

Ces deux derniers cas sont les plus fréquents , On peut interpréter le (a) par l'utilisation d'un neurone qui fournirait toujours l'entrée -1 au neurone étudié. Cette notation sera utile lorsque nous aborderons les modèles d'apprentissage.

• La fonction de transfert (d'activation)

la fonction de transfert est en général une fonction non linéaire monotone croissante , par ailleurs les fonctions de transfert sont de qualités diverses : elles peuvent être déterministes, continues, discontinues ou aléatoires. Ces fonctions sont présentées dans le tableau suivant :

<p>(a) Fonction de Heaviside</p>	
<p>(b) Fonction linéaire sans saturation</p>	
<p>(c) Fonction linéaire avec seuil</p>	
<p>(d) fonction à seuils multiples</p>	
<p>(e) fonction sigmoïde</p> $F(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$	

<p>(f)</p> <p>fonction sigmoïde</p> $F(x) = \frac{1 - e^{-x}}{1 + e^{-x}}$	
<p>(g)</p> <p>fonction stochastique</p>	

- **La fonction de sortie**

En général, cette fonction $g(E)$ est considérée comme étant la fonction identité $g(E) = f(E)$. Par la suite, nous confondrons activation et sortie du neurone.

Les fonctions d'entrée et d'activation sont choisies en fonction des types d'automates utilisés, dépendant de la nature des entrées et des sorties.

En général, ils sont au nombre de six :

- **les automates booléens**

les entrées et les sorties sont booléennes .

La sortie est une fonction booléenne des entrées.

- **les automates à seuil**

- la sortie est binaire alors, que les entrées peuvent être binaires ou réelles ;
- La fonction d'entrée totale est affine .
- La fonction d'activation est la fonction signe ou la fonction de Heaviside.

- **les automates linéaires**

- Les entrées et les sorties sont réelles .
- La fonction d'entrée totale est linéaire .
- La fonction de sortie est l'identité.

- **les automates à saturation**

- Les entrées et les sorties sont comprises dans un intervalle $[u,v]$.
- La fonction d'entrée totale est linéaire .

- La fonction d'activation est la fonction SATUR.

Si les entrées et les sorties sont entières, on obtient un automate multiseuil.

➤ *les automates continus*

- Les entrées et les sorties sont réelles .
- La fonction d'entrée est linéaire ou affine .
- La fonction d'activation est une fonction sigmoïde .

➤ *les automates probabilistes*

- Les sorties sont binaires et les entrées sont quelconques.
- La fonction d'entrée est affine ou linéaire .
- La fonction d'activation est stochastique.

IV.4- Les réseaux de neurones artificiel

IV.4.1- Introduction

Les recherches actuelles faites sur les réseaux de neurones artificiels n'ont pas permis de donner une définition exacte ou universelle à ce concept.

En effet, la définition admise, utilise la notion de réseaux d'automates ou de système connexioniste . Un réseau de neurones artificiels est composé d'automates connectés en réseau et fonctionnant en parallèle et dans lequel les connexions contiennent la connaissance d'un domaine particulier.

Par ailleurs, il existe une grande variété des réseaux de neurones artificiels, ceux-ci pouvant être définis selon plusieurs critères, parmi lesquels, on peut citer :

- la nature des cellules élémentaires .
- La structure des connexions (architecture) .
- La méthode d'apprentissage .
- Le mécanisme de classification .
- Le mécanisme de mémorisation.

IV.4.2- La nature des cellules

Pour déterminer les fonctions d'entrée et d'activation d'un réseau d'automates, il faut d'abord définir les modes de codage des informations à l'entrée, à l'intérieur et à l'extérieur du réseau. Par exemple un réseau recevra sur les cellules d'entrée des informations codées en continu et fournira une sortie codée en binaire , la fonction d'entrée sera la fonction affine et la fonction d'activation sera la fonction signe ou la fonction de Heaviside (cette dernière utilisée

pour les réseaux à mémoire associative) . Ce dernier exemple sera utilisé dans notre système de détection (RNA), où les entrées sont codées en continu et les sorties codées en binaire , nous mentionnerons toutes ces caractéristiques dans la section (IV-7) (le choix de l'architecture des réseaux de neurones)

IV.4.3- Les mécanismes d'apprentissage

IV.4.3.1- Définition

Les mécanismes d'apprentissage sont la propriété la plus intéressante des réseaux de neurones. A cet effet, les paramètres internes (poids de connexion) d'un réseau de neurones sont modifiés en utilisant un algorithme d'adaptation appelé algorithme d'apprentissage.

Par ailleurs, une autre classification des réseaux de neurones peut être déduite en fonction du type d'apprentissage. En effet on distingue deux grandes

familles d'apprentissage : l'apprentissage supervisé et l'apprentissage non supervisé .

IV.4.3.2- Les algorithmes avec apprentissage supervisé

Dans ce type d'apprentissage, l'algorithme détermine les poids synaptiques à partir d'exemples étiquetés de formes auquel un professeur (teacher) a associé des réponses ou des cibles également étiquetées. Il existe plusieurs algorithmes, parmi lesquels on distingue l'algorithme de rétropropagation qui est destiné aux réseaux à couches (réseaux non bouclés).

IV.4.3.3- Les algorithmes avec apprentissage non supervisé

Dans ce type d'algorithmes, on présente à l'entrée du réseau des exemples connus et le réseau s'organise lui-même autour d'attracteurs qui correspondent à des configurations stables du modèle dynamique non linéaire associé au réseau. L'apprentissage est accompli à l'aide de règles qui changent ou adaptent le poids des coefficients synaptiques en fonction des exemples présentés à l'entrée et dans certains cas en fonction des sorties désirées.

L'apprentissage a lieu souvent en temps réel avec des réseaux qui peuvent être éventuellement bouclés, parmi lesquels, on peut citer : le réseau de HOPFIELD, et les cartes topologiques de KOHONEN.

IV.4.3.4- Les principales règles d'apprentissage

Les stratégies de modification des poids synaptiques découlent des règles suivantes :

- la règle de Hebb où le poids des connexions entre deux processeurs élémentaires est renforcé si ces derniers sont activés simultanément ;
- la règle Widrow-Hoff ou règle delta : le poids synaptique est adapté pour obtenir la diminution de l'erreur entre la sortie réelle du processus élémentaire et la sortie désirée ;
- l'apprentissage compétitif dans lequel tous les processeurs élémentaires sont en compétition. La sélection est réalisée à l'aide d'un processus de compétition, basé sur une mesure de similarité entre l'exemple de référence associé à chaque processeur et l'exemple d'entrée.

Les expressions précises des règles dépendent très étroitement de la nature des fonctions d'entrée totale, des fonctions d'activation et de la nature continue ou discrète des informations contenues dans les cellules de neurones.

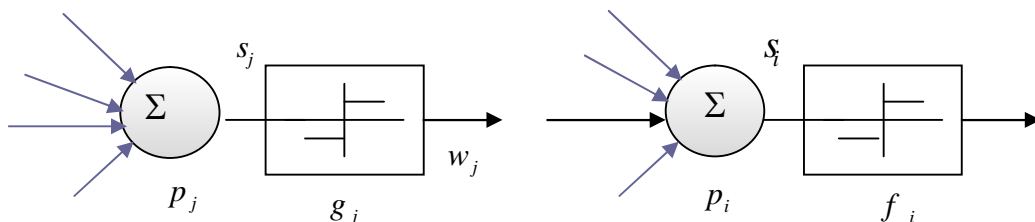


Figure (IV.5): modèle d'apprentissage de la connexion w_{ij} entre deux neurones.

Rumhart a proposé une règle générale de modification du poids synaptique Δw_{ij} valable dans de nombreux mécanismes d'apprentissage, cas d'une cellule p_i avec éventuellement une entrée « professeur » t_i .

$$\Delta w_{ij} = \alpha f_i(s_i, t_i) g_j(s_j, w_{ij}) \quad (\text{IV-4})$$

avec : α : le pas d'adaptation.

f_i et f_j : la fonction d'activation de p_i et p_j .

s_i et s_j : les valeurs d'activation de p_i et p_j .

t_i : l'entrée professeur de p_i .

Dans la règle de Hebb, il n'y a pas de professeur et les fonctions f_i sont linéaires, le mécanisme d'adaptation se réduit à :

$$\Delta w_{ij} = \alpha s_i s_j \quad (\text{IV-5})$$

La règle de Widrow –Hoff, connue également sous le nom de delta-règle (Δ règle) nécessite un professeur et elle peut être écrite en présence de fonctions d'activation linéaires sous la forme :

$$\Delta w_{ij} = \alpha (t_i - s_i) s_j \quad (\text{IV-6})$$

le modèle compétitif de type kohonen met en œuvre l'expression :

$$\Delta w_{ij} = \alpha (t_i - w_{ij}) \quad (\text{IV-7})$$

Après la phase d'apprentissage toute la mémorisation des connaissances est enregistré dans le réseau. C'est la phase la plus longue en calcul connexioniste. Par contre, en phase de reconnaissance, si la forme à reconnaître a déjà été apprise, le réseau fournira instantanément la bonne sortie.

IV.4.4- Les mécanismes de classification

La cellule de décision avec fonction de seuil se comporte comme un adaptateur linéaire qui réalise la séparation des exemples en deux classes w_1 et w_2 à l'aide de la fonction discriminante linéaire.

$$G(x) = w^{tr} x \quad (\text{IV-8})$$

où $w = (w_{1j}, w_{2j}, \dots, w_{nj}, w_{0j})^{tr}$, vecteur des poids synaptiques $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^{tr}$

Cette fonction permet la séparation de l'ensemble des vecteurs x en deux classes w_1 et w_2

$$\begin{cases} x \in w_1 & \text{si } g(x) \geq 0 \\ x \in w_2 & \text{si } g(x) < 0 \end{cases}$$

la figure (IV.6) montre l'interprétation géométrique du mécanisme de classification.

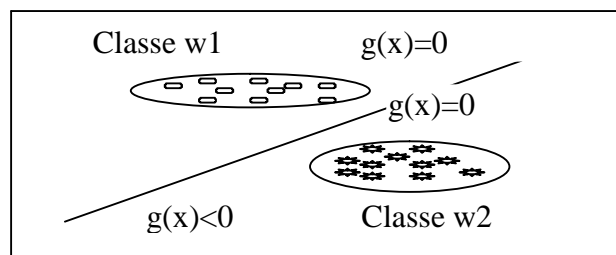


Figure (IV.6) : séparation de deux classes avec adaptateur linéaire.

IV.4.5- Les mécanismes de mémorisation

Une caractéristique importante des réseaux de neurones réside dans la manière avec laquelle sont stockées les informations et dans la façon de les associer. En règle générale, la mémoire des réseaux de neurones est distribuée et tout ou une partie des poids de connexion du réseau, constitue la mémoire de ce dernier. Ainsi un cas pris dans la base des exemples d'apprentissage sera mémorisé par un sous-ensemble particulier des cellules lequel contient

également la mémoire d'autres exemples de la base d'apprentissage. Par ailleurs, les réseaux de neurones utilisés en diagnostic industriel pour la classification des défauts sont appelés des mémoires associatives ou classifieurs. On distingue deux familles de réseaux de neurones appelés souvent neurones "grand-mère" et les réseaux de neurones à mémoires autoassociatives et à mémoires hétéroassociatives. Dans la première les neurones répondent spécifiquement à un seul exemple de la base d'apprentissage, ces réseaux sont adaptés aux problèmes de classification.

Dans la deuxième catégorie, les informations ne sont pas localisées à des emplacements déterminés, mais la mémorisation de chaque exemple est distribuée sur l'ensemble de la structure du réseau qui constitue ainsi la mémoire. Les mémoires autoassociatives ont pour caractéristique essentielle de reproduire en sortie, l'image issue de l'entrée à partir d'un exemple incomplet ou bruité.

Les mémoires hétéroassociatives assimilent la relation entre un exemple donné et une sortie désirée de l'exemple. Un nouvel exemple présenté proche de l'exemple appris, restituera la sortie désirée. Ces mémoires sont particulièrement performantes pour la reconnaissance de caractères des données incomplètes ou bruitées.

IV.4.6- La structure des connexions

Il existe plusieurs types de réseaux de neurones, leurs architectures et leurs principes de fonctionnement diffèrent d'une application à une autre. Si on se réfère aux études biologiques du cerveau, on constate, d'une part, que le nombre de connexions est énorme et, d'autre part, que le réseau est divisé en différentes couches. A l'intérieur d'une même couche les interactions entre les neurones sont en relation étroite.

D'une manière générale l'architecture des réseaux de neurones formels peut aller d'une connectivité totale (tous les neurones sont reliés les uns aux autres) à une connectivité locale où les neurones ne sont reliés qu'à leurs plus proches voisins.

On retient qu'il existe deux types de réseaux de neurones : des réseaux à couches (non bouclés) et des réseaux entièrement connectés (bouclés ou récurrents).

IV.4.6.1- Les réseaux bouclés

Dans les réseaux bouclés ou entièrement connectés, chaque cellule est reliée à toutes les autres avec un retour sur elle même, ils sont particulièrement adaptés pour construire des réseaux de type de Hopfield et de Boltzman avec des procédures d'apprentissage sans professeur

(non supervisé) . Pour les réseaux bouclés, le temps intervient et le comportement des cellules du réseau est exprimée, en général par, des équations différentielles non linéaires. Pour des conditions initiales données correspondant à une situation perfectible, le réseau évolue au cours du temps pour atteindre un état stable ou instable.

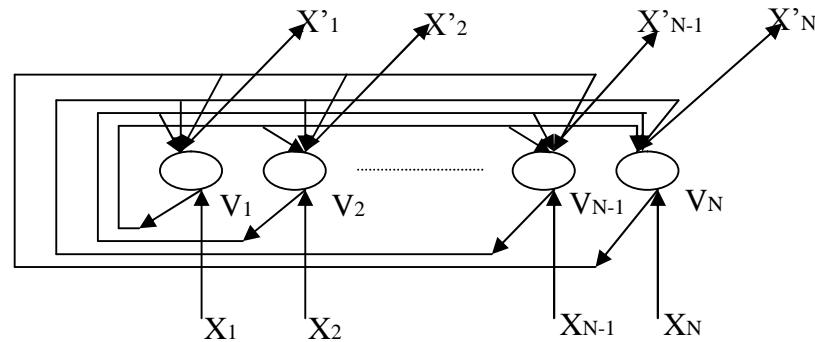


Figure (IV.7): réseau de neurones entièrement connectés (réseau bouclé)

Le réseau original de Hopfield, qui a subi par la suite de nombreuses améliorations est constitué de processus élémentaires effectuant une somme pondérée de toutes les entrées et d'une fonction d'activation à seuil pour fournir une réponse égale à 0 ou à 1. Chaque cellule élémentaire est connectée à toutes les autres de façon bidirectionnelle, .

En 1985, Ackely, Hinton, et Sejnowski ont développé un algorithme d'apprentissage pour le réseau de Hopfield qui permet la dynamique des états de ce réseau, afin d'éviter les minima locaux, en choisissant la position des minima, ou les formes à mémoriser. Ce type de réseau se retrouve sur la machine de Boltzman, dont les neurones ont des caractéristiques probabilistes .

IV.4.6.2- Les réseaux non bouclés (réseaux à couches)

Le réseau non bouclé est constitué de couches, telles que les deux couches extrêmes correspondent, d'une part, à la couche qui reçoit ses entrées du milieu extérieur et, d'autre part à la couche qui fournit le résultat du traitement effectué (couche de sortie), les couches intermédiaires sont appelées les couches cachées, leur nombre est variable. Les neurones qui appartiennent à une même couche ne sont pas connectés entre eux, chacune des couches reçoit des signaux de la couche précédente et transmet le résultat de ses traitements à la couche suivante.

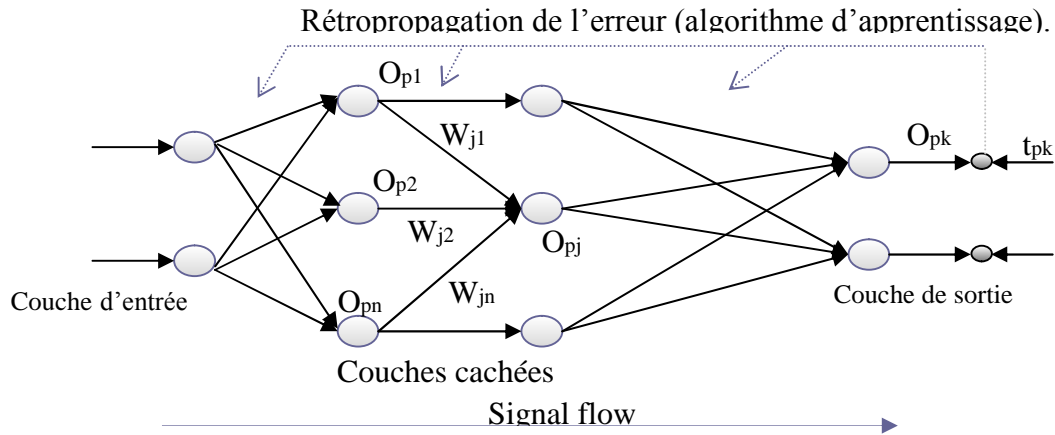


Figure (IV.8): Réseau de neurones multicouches (non bouclés)

Le premier réseau utilisé est le perceptron monocouche, son mode d'apprentissage été de type supervisé, par correction d'erreur. Pour une forme appartenant à une classe présentée à l'entrée de la première couche, on doit avoir une sortie fixée (1 ou -1). Pendant la phase d'initialisation les coefficients synaptiques W_{oi} sont initialisées d'une manière aléatoire, puis les fonctions d'association sélectionnées. Pendant la phase d'apprentissage, la base des données des exemples d'entrée et des sorties associées, est utilisée pour adapter progressivement les poids W_{ij} en comparant la sortie o_i à l'état désiré t_j par :

$$\Delta_p w_{ji} = \eta (t_{pj} - o_{pj}) i_{pi} = \eta \delta_{pj} i_{pi} \tag{IV-9}$$

où η est une constante d'adaptation.

On répète cette procédure itérative jusqu'à ce que l'erreur résiduelle soit la plus faible possible.

Par ailleurs, la limite de la capacité d'un perceptron multicouches, réside dans la lecture des poids synaptiques entre la couche cachée et la couche de sortie. Comme solution, Rumelhart et al ont proposé un algorithme d'apprentissage avec professeur appelé algorithme de rétropropagation pour application sur les réseaux multicouches. En 1970 Werbos a développé cet algorithme, dont la première application a été consacrée à l'estimation d'un modèle dynamique pour prédire la communication sociale.

EN fait, la rétropropagation est une généralisation de l'algorithme de la moyenne des moindres carrés, car dans cet algorithme une fonction d'erreur est définie comme étant égale la moyenne quadratique carrée de la différence entre la sortie désirée et la sortie actuelle d'un réseau à couches. Pour minimiser cette fonction d'erreur, l'algorithme de rétropropagation utilise la technique de la recherche du gradient, appelée la règle delta généralisée.

Dans ces réseaux à couches, les unités d'entrée représentent la couche inférieure et les unités de sortie représentent la couche supérieure. Entre ces deux couches, il peut y avoir plusieurs neurones ou couches cachées, cependant chaque neurone doit transmettre sa sortie aux neurones de la couche supérieure et ses entrées doivent recevoir des informations des neurones de la couche inférieure. Pour un vecteur d'entrée donné, on associe un vecteur de sortie t_p . Si les poids synaptiques ont des valeurs aléatoires, le vecteur de sortie o_p est différent de t_p . Dans ce cas on associe à l'écart entre les valeurs de t_p et o_p calculée comme suit :

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_j (t_{pj} - o_{pj})^2 \quad (\text{IV-10})$$

Ensuite on définit la somme des erreurs de sortie de la couche prévue par :

$$s_{pj} = \sum_i w_{ji} o_{pi} + b_j \quad (\text{IV-11})$$

En utilisant la fonction sigmoïde, son état sera :

$$o_{pj} = f_j(s_{pj}) \quad (\text{IV-12})$$

Pour trouver la généralisation correcte de la règle delta, w_{ji} est mis sous la forme

$$\Delta_p w_{ji} \text{ en fonction de } -\frac{\partial E_p}{\partial w_{ji}} \quad (\text{IV-13})$$

Il est à remarquer la dérivée, précédente se présente comme la résultante d'un produit de deux termes : un terme reflétant la variation de l'erreur (comme

une fonction de variation d'entrée du neurone à l'entrée du réseau) et un terme représentant l'effet de la variation d'un poids.

De ce qui précède nous tirons la relation :

$$\frac{\partial E_{pj}}{\partial w_{ji}} = \frac{\partial E_p}{\partial s_{pj}} \frac{\partial s_{pj}}{\partial w_{ji}} \quad (\text{IV-14})$$

En remplaçant s_{pj} par son équivalent (éq IV-11) on peut écrire :

$$\frac{\partial s_{pj}}{\partial w_{ji}} = \frac{\partial}{\partial w_{ji}} \sum_k w_{jk} o_{pk} = o_{pi} \quad (\text{IV-15})$$

Posons :

$$\delta_{pj} = -\frac{\partial E_p}{\partial s_{pj}} \quad (\text{IV-16})$$

L'équation (IV-14) prend ainsi la forme équivalente :

$$-\frac{\partial E_p}{\partial w_{ji}} = \delta_{pj} o_{pi} \quad (\text{IV-17})$$

Pour appliquer la diminution du gradient dans E_p , nous devons prendre en considération la variation des poids laquelle est définie par :

$$\Delta_p w_{ji} = \eta \delta_{pj} o_{pi} \quad (\text{IV-18})$$

Comme pour la règle delta standard, un résultat intéressant est le calcul simple récursif des coefficients δ qui peuvent être mis en œuvre par la propagation d'un signal d'erreur en aval à travers le réseau.

Pour résoudre l'équation (IV-16), on peut décomposer la dérivée en deux facteurs :

$$\delta_{pj} = -\frac{\partial E_p}{\partial s_{pj}} = \frac{\partial E_p}{\partial o_{pj}} \frac{\partial o_{pj}}{\partial s_{pj}} \quad (\text{IV-19})$$

De (IV-12) on constate que :

$$\frac{\partial o_{pj}}{\partial s_{pj}} = f'_j(s_{pj}) \quad (\text{IV-20})$$

Pour calculer le premier facteur, deux possibilités existent :

- la première suppose que le neurone u_j est une unité d'entrée ou un neurone d'entrée du réseau.
- En ce qui concerne la seconde possibilité, en partant de la définition de E_p , on peut écrire :

$$\frac{\partial E_p}{\partial o_{pj}} = -(t_{pj} - o_{pj}) \quad (\text{IV-21})$$

Par ailleurs, en remplaçant ces facteurs dans (IV-19), on trouve pour chaque neurone u_j :

$$\delta_{pj} = (t_{pj} - o_{pj}) f'_j(s_{pj}) \quad (\text{IV-22})$$

Si u_j n'est pas une unité de sortie, la règle d'ajustement des poids est utilisée pour écrire :

$$\sum_k \frac{\partial E_p}{\partial s_{pk}} \frac{\partial s_{pk}}{\partial o_{pj}} = \sum_k \frac{\partial E_p}{\partial s_{pk}} \frac{\partial}{\partial o_{pj}} \sum_i w_{ki} o_{pi} = \sum_k \frac{\partial E_p}{\partial s_{pk}} w_{kj} = -\sum_k \delta_{pk} w_{kj} \quad (\text{IV-23})$$

Dans ce cas, en substituant les deux facteurs dans l'équation (IV-19), on obtient :

$$\delta_{pj} = f'_j(s_{pj}) \sum_k \delta_{pk} w_{kj} \quad (\text{IV-24})$$

Toutefois, si u_i n'est pas une unité d'entrée. les équations (IV-22) et (IV-24) donnent une procédure récursive pour calculer les coefficients δ pour tous les neurones dans le réseau, lesquels sont donc utilisés pour calculer les variations des poids dans le réseau selon (IV-18). Cette procédure constitue la règle delta généralisée d'un réseau non bouclé.

IV.4.6.3- L'algorithme de rétropropagation

L'algorithme d'apprentissage de rétropropagation est un algorithme de gradient itératif désigné pour minimiser l'erreur quadratique moyenne entre la sortie actuelle du réseau en amont et la sortie désirée. On suppose que la fonction sigmoïde est utilisée de la manière suivante :

Etape 1 : initialisation des poids et des seuils :

Attribuer de faibles valeurs aux poids et aux seuils .

Etape 2 : présentation des entrées et des sorties :

Présenter un vecteur d'entrée en valeur continue et spécifier les sorties désirées. Si le réseau est utilisé comme un classifieur, alors toutes les sorties sont mises à zéro sauf celle correspondant à la classe d'entrée dont la sortie désirée est 1. L'entrée pourrait être nouvelle pour chaque essai ou des échantillons d'un apprentissage peuvent être présentés cycliquement jusqu'à la stabilisation des poids.

Etape 3 : calcul des sorties actuelles :

On utilise la fonction sigmoïde non linéaire, la forme du réseau est celle représentée dans la figure (IV.7).

Etape 4 : Adaptation des poids :

On utilise l'algorithme récursif sur les unités de sortie, on effectue un retour sur la première couche cachée et on ajuste les poids comme suit :

$$w_{ji}(t+1) = w_{ji}(t) + \Delta w_{ji}(t) \quad (\text{IV-25})$$

$$\text{Où: } \Delta_p w_{ji} = \eta \delta_{pj} o_{pi}$$

Dans cette équation $w_{ji}(t)$ est le poids, η est le terme de gain appelé coefficient d'apprentissage, et δ_{pj} un terme d'erreur pour le neurone j.

Si l'indice j correspond à une unité de sortie, alors δ_{pj} peut être calculée par (IV-22) :

$$\delta_{pj} = (t_{pj} - o_{pj}) f'_j(s_{pj})$$

Si l'unité j est une unité d'une couche cachée interne, alors δ_{pj} peut être calculée par :

$$\delta_{pj} = f_j'(s_{pj}) \sum_k \delta_{pk} w_{kj}$$

Les biais sont adaptées d'une manière similaire, ce sont des poids de connexion sur les entrées auxiliaires des neurones qui ont des valeurs constantes. La convergence est quelquefois rapide quand un terme de momentum est ajouté et les variations des poids sont lissés .

$$b_{pj}(t+1) = b_{pj}(t) + \eta \sum \delta_{pj} o_{pi} \tag{IV-26}$$

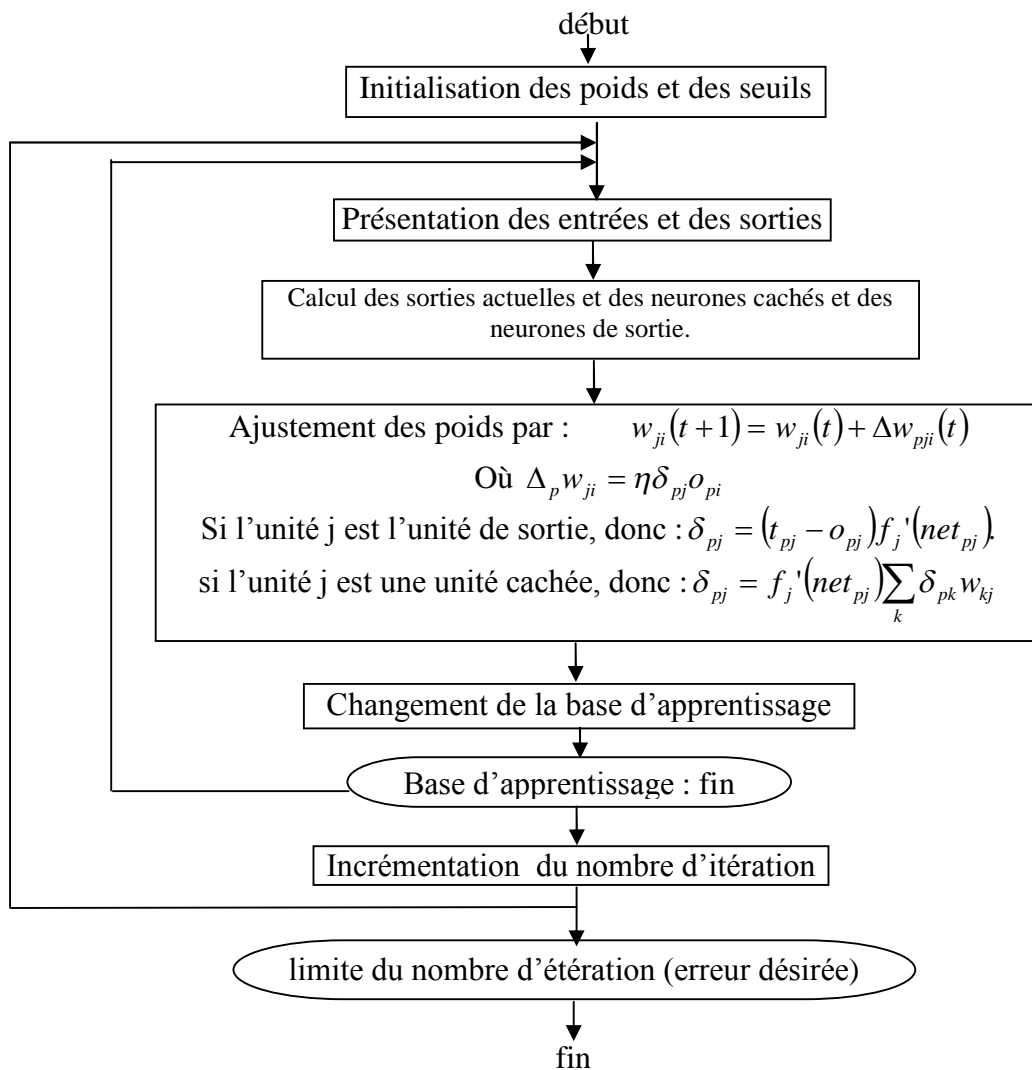


Figure (IV.9): Algorithme d'apprentissage par rétropropagation.

IV.5- Application des réseaux de neurones pour le diagnostic des défaillances des machines asynchrones

IV.5.1- Introduction

L'application des réseaux de neurones pour résoudre un problème (dans le cas présent le diagnostic des défaillances d'un système électromécanique).

nécessite l'emploi d'une méthodologie dont la mise en application peut être décomposée en deux étapes :

- la première consiste en l'étude du problème à résoudre pour valider son adaptabilité à une résolution par les réseaux de neurones et définir les objectifs à atteindre pour pouvoir contrôler la qualité de la solution retenue (voir la méthodologie du diagnostic du chapitre précédent).
- La seconde est axée sur la technique des réseaux de neurones, elle englobe le choix du type de réseau et celui de son implémentation (le type d'apprentissage et le nombre des couches cachées dans le cas de l'utilisation des réseaux non bouclés) en fonction des caractéristiques du problème étudié et des objectifs fixés.

IV.5.2- Analyse de la problématique et Choix du type de RNA

D'une part, les perceptrons multicouches ont montré leur efficacité pour la classification des formes, et d'autre part, dans notre cas d'application, le système de détection est basé sur la classification des signaux. Par conséquent, l'utilisation d'un réseau de neurones à couches est préférable pour essayer de résoudre le problème posé.

Par ailleurs, les réseaux que nous allons simuler sont tous des réseaux à trois couches et les étapes de construction du réseau peuvent être subdivisées de la manière suivante :

- Choix des entrées du réseau, c'est à dire choix du pas d'échantillonnage pour le signal qui va être traité (courant statorique, courant rotorique et vitesse) et détermination du nombre d'entrées du réseau (nombre de neurones de la couche cachée).
- Choix des sorties, c'est à dire détermination du nombre de sorties et leur nature, pour faciliter l'interprétation des résultats de la sortie du réseau par le système expert, notre choix a été orienté sur les nombres binaires (0,1).
- Comme les sorties sont binaires et les entrées réelles, la fonction de sortie sera une fonction linéaire affine et la fonction d'activation une fonction sigmoïde.

- Détermination du nombre de neurones cachés et du nombre des couches cachées: ils seront déterminés par tâtonnement à partir d'un algorithme d'apprentissage.

IV.5.3- Choix du type d'algorithme d'apprentissage

Concernant l'apprentissage, le RNA est entraîné par le modèle de rétropropagation, pour les raisons suivantes :

- Le système d'apprentissage est supervisé.
- Les entrées sont continues.
- Il a été utilisé avec succès dans plusieurs domaines d'applications.

IV.6- Conclusion

Pour l'implémentation d'un réseau de neurones pour une application donnée, il faut tout d'abord étudier le problème posé afin de valider son adaptabilité à une résolution par des réseaux de neurones et précisant les objectifs à atteindre. Par la suite, il faut analyser la technique des réseaux de neurones (qui englobe le choix du type de réseau et celui de son implémentation en fonction des caractéristiques du problème étudié). A cet effet, le présent chapitre a été consacré à la présentation de la théorie des réseaux de neurones, en partant du neurone biologique, jusqu'à l'étude des différents types de réseaux, parmi lesquels on a présenté deux types : les réseaux bouclés et les réseaux non bouclés.

A la lumière de l'étude effectuée, il a été constaté que les réseaux non bouclés correspondent bien à notre cas d'application. En effet, les réseaux de neurones multicouches entraînés par l'algorithme de rétropropagation du

gradient sont aujourd'hui les modèles les plus utilisés en diagnostic en raison de leur capacité à résoudre les problèmes de classification.

CHAPITRE V

ELABORATION DU SYSTEME AUTOMATIQUE DE DIAGNOSTIC DES DEFAUTS D'UNE MACHINE ASYNCHRONE

V- ELABORATION DU SYSTÈME AUTOMATIQUE DE DIAGNOSTIC DES DÉFAUTS D'UNE MACHINE ASYNCHRONE

V.1- Introduction

Automatiser la détection des défaillances des systèmes électromécaniques permet de s'affranchir des faiblesses des opérateurs humains sujets à la fatigue, à l'oubli et à la pression d'un environnement parfois hostile.

C'est typiquement un problème de reconnaissance des formes qui se divise en deux grandes phases :

- *Premièrement une phase de traitement de signal durant laquelle il faut prétraiter le signal reçu, puis en extraire les informations nécessaires afin d'obtenir un signal directement représentatif du comportement du système électromécanique pour tous les cas étudiés (voir dans les chapitre précédents: les caractéristiques obtenues dans les cas des régimes de fonctionnements normaux et anormaux).*
- *Deuxièmement, une phase de classification des données fournies par la phase précédente en vue d'identifier le type et la cause de la défaillance (détection).*

A cet effet, ce chapitre est consacré à l'élaboration du système automatique du diagnostic des défaillances de la machine asynchrone , en construisant le bloc de RNA qui est la partie principale du sous-système d'interprétation de l'information et par la suite les sorties de ce bloc seront testées par le système d'aide à décision, qui va délivrer un protocole de maintenance sur lequel on trouvera le type et les causes du défaut, le lieu de son apparition (localisation) et les remèdes possibles pour l'éliminer (ou l'isoler).

V.2- Description de l'architecture du système automatique de diagnostic des défaillances

L'architecture du système automatique de diagnostic des défaillances, se compose de deux sous systèmes (voir figure (V.1)):

- Un sous-système d'acquisition, de conversion et de traitement de l'information (SACI),
- Un sous-système d'interprétation de l'information.

V.2.1- Sous-système d'acquisition, de conversion et de traitement de l'information (SACI-MTI)

Le sous-système SACI comporte une chaîne de mesure des capteurs $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ des conditionneurs de signaux k_1, k_2, \dots, k_n , un multiplexeur, un filtre anti-repliement (FAR), un convertisseur analogique (CAN) et un module de traitement de l'information réalisé à base d'un logiciel spectral.

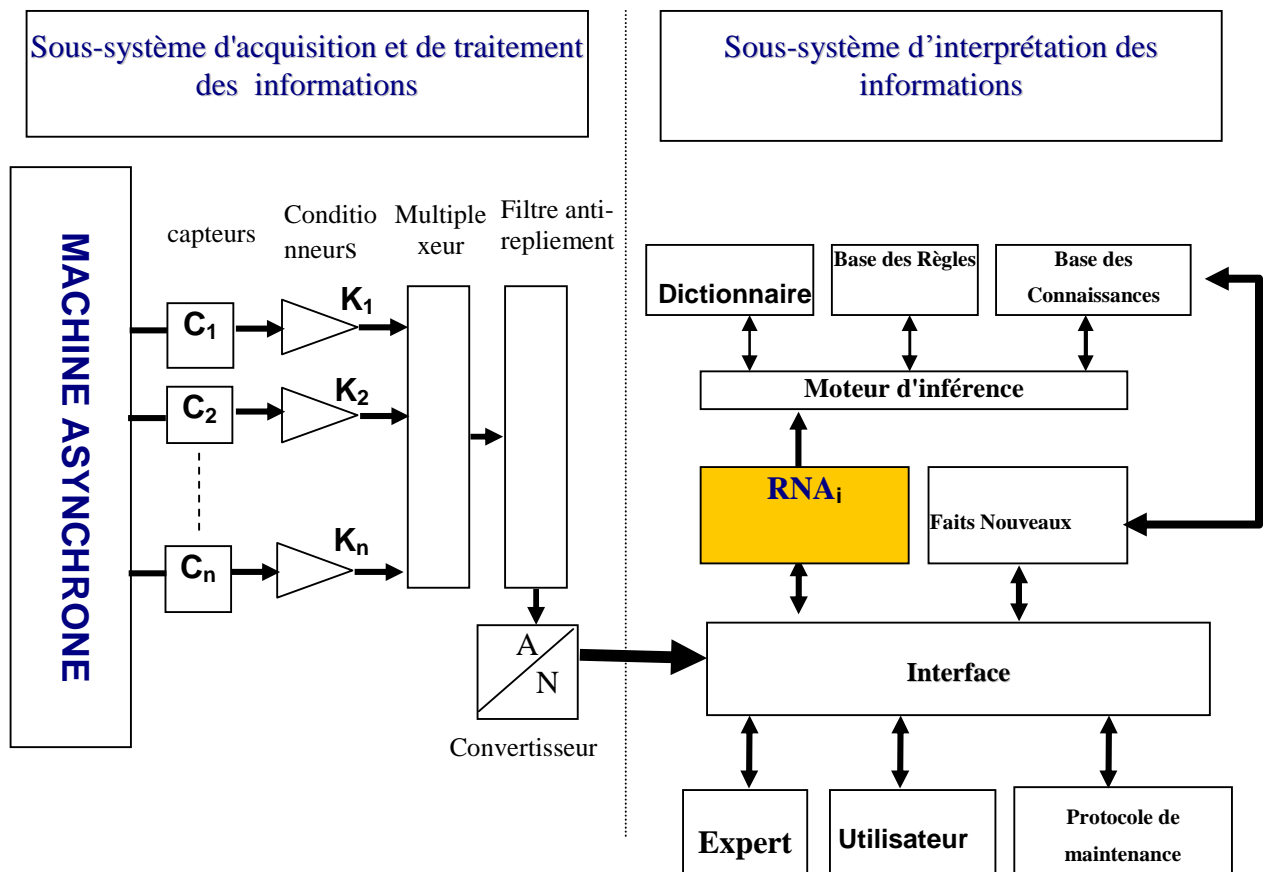


Figure (V.1): Architecture du système automatique de diagnostic des défaillances

Le contrôle de l'état technique des machines asynchrones est effectué par les capteurs de grandeurs électriques (tension, courant, etc.) et mécaniques.

Les signaux $U_1(t), U_2(t), \dots, U_n(t)$ des sorties des capteurs à travers les conditionneurs parviennent à l'entrée du filtre anti-repliement à travers le multiplexeur temporel.

Le filtre FAR permet de limiter la bande passante des signaux avant l'échantillonnage par le convertisseur Analogique-Numérique (CAN) à 8 bits pour éviter le repliement à partir des signaux digitaux $U_1(t), U_2(t), \dots, U_n(t)$, du CAN.

L'analyse spectrale du signal est réalisée à l'aide du module de traitement d'information (MTI) pour diminuer l'erreur de troncature causée par la limitation de la bande passante et la non périodicité des signaux $U_1(t)$, $U_2(t)$,... $U_n(t)$.

a. Les capteurs :

Le contrôle de l'état technique des machines asynchrones est effectué par les capteurs et pour cela, on mesure les grandeurs électriques (tension, courant, etc.) et les grandeurs mécaniques (vitesse, couple, etc.) Ces grandeurs sont représentées sous la forme des signaux d'informations (grandeurs indicatrices).

b. la conversion et le multiplexage :

L'agencement d'un système de mesure autour d'un ordinateur dépend largement des interfaces dont celui-ci est doté au départ.

L'utilisation d'un ordinateur, machine logique par excellence, requiert toujours, une conversion préalable de tous les signaux analogiques à traiter en signaux digitaux (conversion A/N). Réciproquement, les résultats fournis sont souvent reconvertis en signaux analogiques (conversion N/A), lorsqu'il s'agit par exemple de contrôler un processus. D'autre part, l'ordinateur ne traitant en principe qu'un signal à la fois, il est nécessaire de lui accorder successivement, selon une séquence définie et généralement en haute vitesse tous les canaux de mesure. C'est la fonction multiplexeur du (MUX), de même tous les résultats obtenus séquentiellement par l'ordinateur sur le même canal de sortie doivent être dirigés vers les utilisateurs respectifs par un démultiplexeur (DEMUX).

Les performances générales des systèmes de mesure dépendent très largement des caractéristiques des convertisseurs A/N et D/A ainsi que des multiplexeurs.

c. Le filtre anti-repliement :

Aucun signal physique ne possède une limite en fréquence. On s'en approche autant que possible en limitant l'amplitude des composants indésirables de fréquences supérieures à $f/2$ en plaçant, en amont du convertisseur analogique-numérique, un filtre passe bas, appelé dans ce cas filtre anti-repliement, la fonction de transfert $G(f)$ de ce filtre détermine la fréquence d'échantillonnage minimum à utiliser pour une erreur admise donnée.

d. le convertisseur Analogique numérique:

Avant d'être traité sur ordinateur, les grandeurs analogiques (en principe des tensions) doivent être transformées en nombres, c'est le rôle principal du convertisseur (A/N).

V.2.2- Sous-système d'interprétation de l'information

Le sous-système d'interprétation de l'information est composé de:

- ✦ Un modèle de traitement qui sert à la détection du défaut qui est défini par le système de réseau de neurones.
- ✦ Un système d'aide à la décision.

V.2.2.1- Système d'aide à la décision

Les principaux éléments du système d'aide à la décision sont les suivants :

a. La base de connaissances (BC):

La base de connaissances, peut être imaginée comme étant pour le RNA, ce que constitue la base de données pour le système de gestion des bases de données (SGBD). Cependant, une grande différence peut être remarquée: alors qu'une base de données ne contient que des données passives, la base de connaissances, quant à elle, contient à la fois des données passives (les faits) et des données actives (les règles). Ces dernières établissent des relations parmi les faits et déterminent comment les manipuler. L'ensemble des faits et des règles constituent la connaissance dont on dispose sur un sujet donné.

En général, les faits sont sous formes de simples énoncés tels que "l'action est un actif" alors que les règles sont de types :("Si "condition(s)" alors "conclusion(s)"). Les faits sont en réalité des règles dégénérées, c'est à dire qu'ils ne sont soumis à aucune condition. L'ensemble des conditions d'une règle s'appelle la prémisse d'une règle. Lorsque la prémisse d'une règle est vérifiée, on dit que la règle est applicable ou encore activable.

b. La base de faits (BF) :

La base de faits contient à tout moment, à travers le RNA, ce que le réseau a appris sur le problème étudié.

c. Le moteur d'inférence :

Le moteur d'inférence est le programme qui exploite la connaissance (pour ce faire, la définition d'une stratégie de contrôle s'impose). Il scrute à travers la base de connaissance et détermine comment les faits et règles doivent être gérés. Il comprend des mécanismes de raisonnement et résout les problèmes en exploitant la base de connaissances en fonction de la situation courante fournie par la base de faits.

d. L'interface:

Outre ces composants de base, on retrouve différents éléments essentiels (interfaces) dont le rôle est d'échanger les informations, d'une part, entre le sous-système d'acquisition des données et le sous-système d'interprétation des informations, et d'autre part, entre le RNA et

l'utilisateur en vue de lire (afficher) les informations délivrées par le RNA et d'introduire des données dans la base de connaissance.

V.2.3- Les fonctions du sous-système d'interprétation de l'information

Le RNA doit accomplir les fonctions essentielles suivantes:

- Le suivi du fonctionnement du mécanisme en temps réel.
- L'identification des dysfonctionnements et des pannes.
- L'établissement d'un diagnostic approfondi.
- L'élaboration des rapports d'intervention.

V.3- Elaboration du module d'interprétation des informations

Le module d'interprétation des informations est constitué de cinq réseaux de neurones artificiels. Chaque réseau représente un mode de fonctionnement à savoir : le fonctionnement à vide, et les fonctionnements en charge pour différentes valeurs du couple résistant (25%, 50%, 75% et 100%).

En réalité avant l'implantation des blocs RNA dans le sous-système d'interprétation des informations, plusieurs études paramétriques ont été effectuées pour ces réseaux de neurones :

- choix des variables d'entrées.
- Acquisition des données (base d'apprentissage).
- Construction du bloc RNA.
- Apprentissage des RNA sélectionnés.
- Test des réseaux sélectionnés sur de nouveaux exemples.

V.3.1- Choix des variables d'entrées de RNA (les paramètres représentatifs des défauts)

Pour le RNA, nous utilisons les valeurs efficaces des variables ($I_a, I_b, I_c, V_a, V_b, V_c$, et w), d'une part comme des valeurs indicatrices des défauts de la machine asynchrones, et d'autre part, comme des entrées des réseaux de neurones.

V.3.2- Acquisition des données (base d'apprentissage)

Avant la construction du système du bloc RNA pour la détection des défaillances des systèmes électromécaniques (identification des signaux acquis à partir du SACI). On doit tout d'abord accéder à la phase d'acquisition des données (base d'apprentissage) à partir de laquelle le

RNA pourra apprendre. Celle-ci peut toujours se mettre sous forme de fichier ou de tableau (matrice). Ce dernier est constitué de classes de signatures (vecteurs), ou chacune des classes représente un type de fonctionnement, et chaque signature (vecteur) est représentée par des valeurs efficaces.

Pour construire un modèle non paramétrique (RNA) décrivant le comportement du système électromécanique (fonctionnements normaux et anormaux) on doit construire une base de données aussi riche que possible, qui contient beaucoup d'informations sur les défauts et les régimes de fonctionnement et sous différentes formes (l'information sur un défaut doit être extraite d'une façon redondante). Pour réaliser cette dernière on a procédé comme suit:

- ✦ chacun des défauts à été simulé en régime normal (à vide).
- ✦ En régime en charge avec différentes perturbations (25%, 50%, 75%, et 100% de la charge nominale) pour les deux défauts coupure et déséquilibre de tension d'alimentation.
- ✦ Dans la base des données nous avons pris les valeurs efficaces à l'instant (2.00) (en cas de fonctionnement normal et en présence des défauts).

V.3.2.1- Construction de la base d'apprentissage du RNA (Valeurs efficace)

La base d'apprentissage du RNA est mise sous forme de fichier ou de tableau (matrice). Ce dernier est représenté par des classes de vecteurs, ou chacune des classes représente un type de fonctionnement. et chaque vecteur est représenté par les valeurs efficaces. Dans chaque réseau ou pour chaque mode de fonctionnement (à vide et en charge 25%,50%,75%et100% du couple résistant) nous avons considéré plusieurs exemples qui représentent les 7 paramètres mesurables de la MAS. Ces derniers représentent la couche d'entrée du RNA

En fait, pour passer à l'étape de classification nous disposons pour chacun des paramètres, 7 types de fonctionnement y compris le fonctionnement normal (voir le tableau 3.1).

Tableau 3.1 Classification des types des défauts

CATEGORIE	TYPE DE DEFAUT	SYMBOLE	CODE			
			S1	S2	S3	S4
1	Etat sain	ES	0	0	0	0
2	Coupure monophasée	CM	0	1	1	0
3	Coupure biphasée	CB	1	0	1	0
4	Coupure triphasée	CT	1	1	0	0
5	Déséquilibre monophasé	DM	0	1	0	0
6	Déséquilibre biphasé	DB	0	0	1	0
7	Déséquilibre triphasé	DT	1	0	0	0

V.3.3- Construction des blocs RNA

Les réseaux de neurones que nous avons simulés sont tous des réseaux multicouches qui utilisent l'algorithme de rétropropagation pour leurs apprentissages.

Pour l'implémentation des blocs RNA dans le système automatique de diagnostic, on se propose d'étudier cinq réseaux, chaque réseau représente un mode de fonctionnement. Dans ce cas on utilise un sélectionneur qui permet d'activer l'un des cinq réseaux à la fois correspondant à la valeur du couple résistant de la charge entraînée par le MAS.

Les étapes de construction et de validation des réseaux de neurones sont réparties en trois phases:

a. Choix des entrées des réseaux:

Pour les cinq réseaux sélectionnés leurs entrées sont les valeurs efficaces ($I_a, I_b, I_c, V_a, V_b, V_c$ et w), ce qui signifie que le nombre d'entrées de ce réseau est égal à 7 (voir la figure (V.2)).

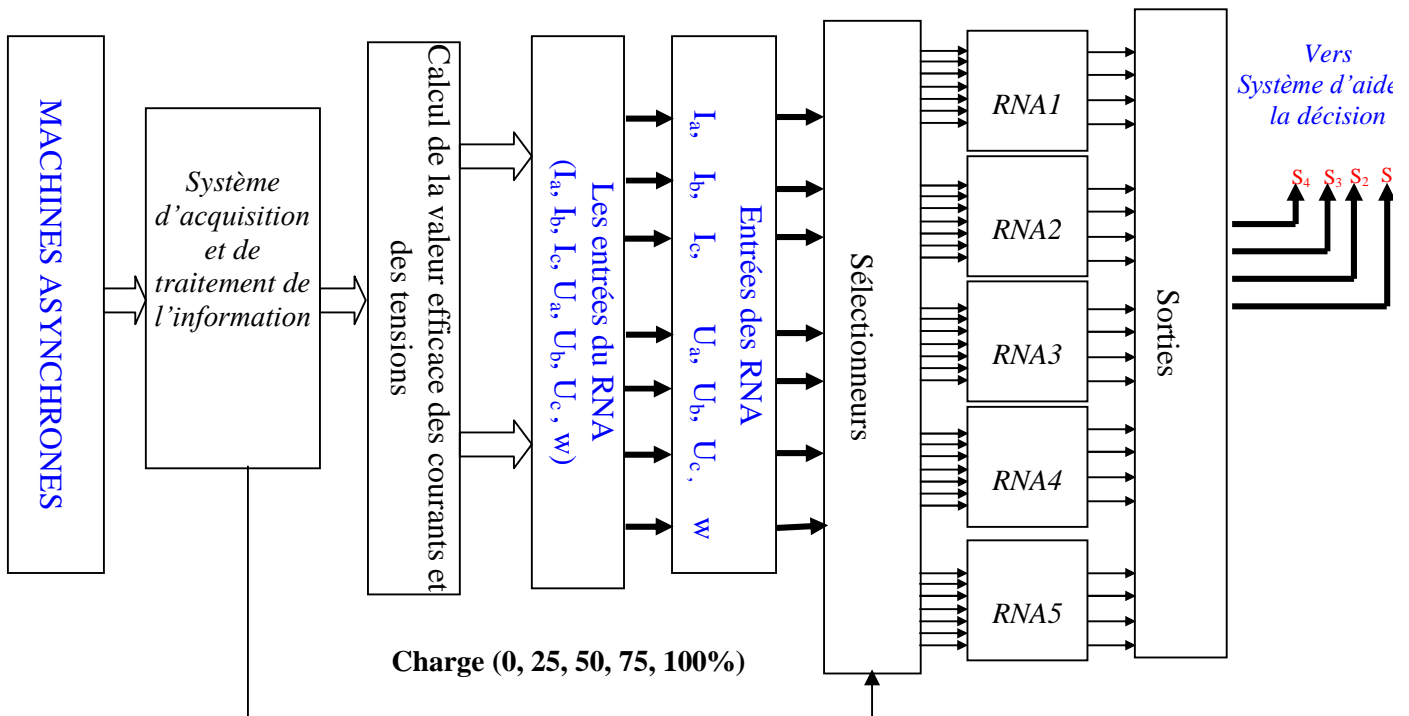


Figure (V.2): Structure du RNA réseau à étudier (les valeurs indicatrices sont les valeurs efficaces)

b. Choix des sorties des réseaux :

Nous avons décidé d'associer une classe à chaque neurone, c'est-à-dire chaque neurone de sortie doit représenter un défaut ; qui est représenté sous différentes formes (vecteurs) ; d'une façon plus claire nous avons associé à chaque classe un code (voir figure (V.3)).

Lors de la détection d'un défaut, le réseau doit indiquer un nombre binaire quelconque (par exemple 0110) à sa sortie, qui correspond à ce type de défaut (défaut de coupure monophasée). C'est-à-dire chaque sortie du réseau doit avoir un seul chiffre soit 1 ou 0.

- Les défauts sont représentés sur le tableau 1, avec leurs symboles et leurs codes associés.
- Le nombre de sorties pour chaque réseau est égal à 4.

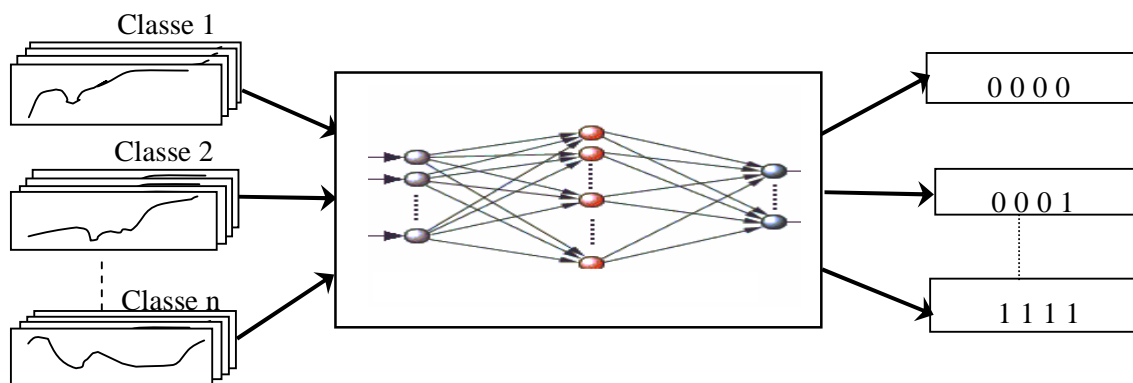


Figure (V.3): Principe de classification des signaux des défaillances

V.3.4- Apprentissage des réseaux de neurones sélectionnés

Le réseau utilisé est un réseau multi couches, comportant une couche d'entrée qui correspond à la rétine, une couche de sortie qui correspond à la décision, et un certain nombre de couches dites cachées. Ces couches cachées constituent les variables de représentation interne des problèmes.

Les réseaux sélectionnés sont entraînés par l'algorithme de rétro propagation. La rétropropagation est le paradigme des **R N A** le plus utilisé. Le terme se réfère à un algorithme pour ajuster les poids de connections en un **R N A** multi couches, ce paradigme a été appliqué avec succès dans différents domaines tel que le domaine militaire, médicale, synthèse de la parole, traitement de signal, etc.

La rétropropagation est basée sur des principes mathématiques. Cette méthode a donné de bons résultats dans beaucoup d'applications. Pour l'appliquer il suffit d'avoir des données d'entrée et des données de sortie.

V.4- Résultats d'essais des réseaux sélectionnés

On peut décrire cette étape pour les cinq réseaux de la manière suivante, on a effectué un apprentissage automatique à l'aide du logiciel MATLAB jusqu'à où on obtenu une erreur quadratique la plus petite (voir figures (V.4.a) et (V.4.b) (V.4.c)) Pour le premier réseau on a obtenu la plus petite erreur après 64 itérations, et pour le troisième après 52 itérations , et pour le quatrième après 77 itérations quand cette étape est effectué on fixe le nombre des neurones de chaque couche pour les cinq réseaux (voir tableau (4.1)).

Tableau 4.1. Différents essais d'apprentissage des RNA

NOMBRES DE NEURONES	COUCHE D'ENTREE	COUCHES CACHEES	COUCHE DE SORTIE	ERREUR QUADRATIQUE MOYENNE
RNA n° 1	7	5-4	4	2.6375e-017
RNA n° 2	7	5-4	4	5.0158e -016
RNA n° 3	7	7-4	4	2.16891e-014
RNA n° 4	7	5-4	4	9.65795e-016
RNA n° 5	7	8-5	4	2.39973e-015

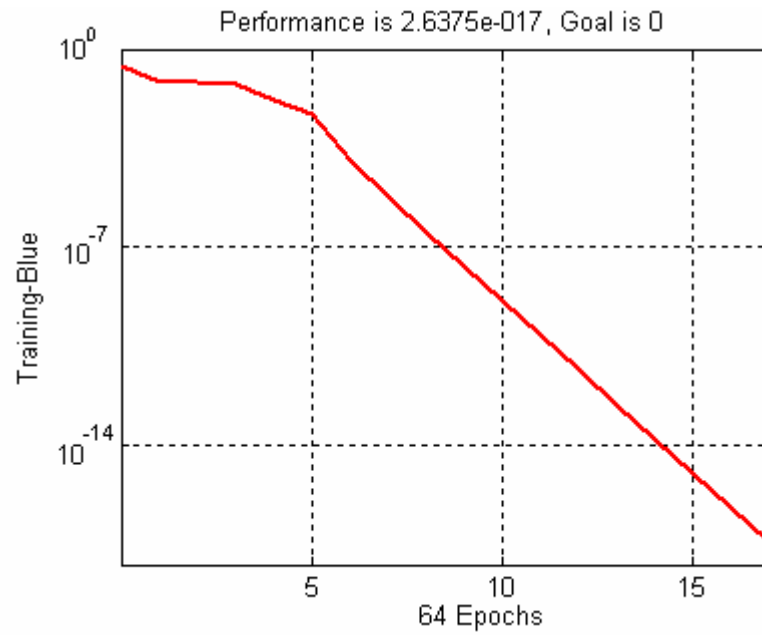


Figure (V.4.a): Evolution de l'erreur quadratique moyenne du RNA n° (1)

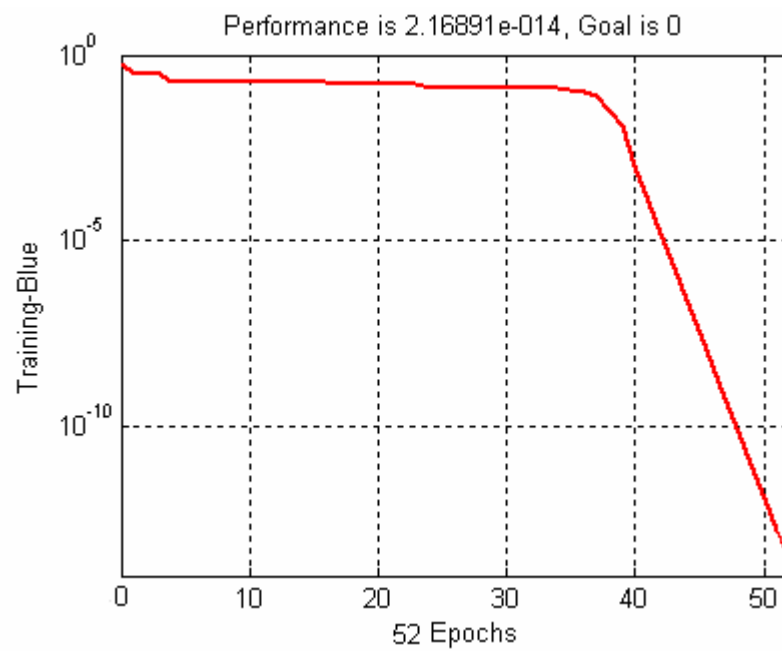


Figure (V.4.b): Evolution de l'erreur quadratique moyenne du RNA n° 3

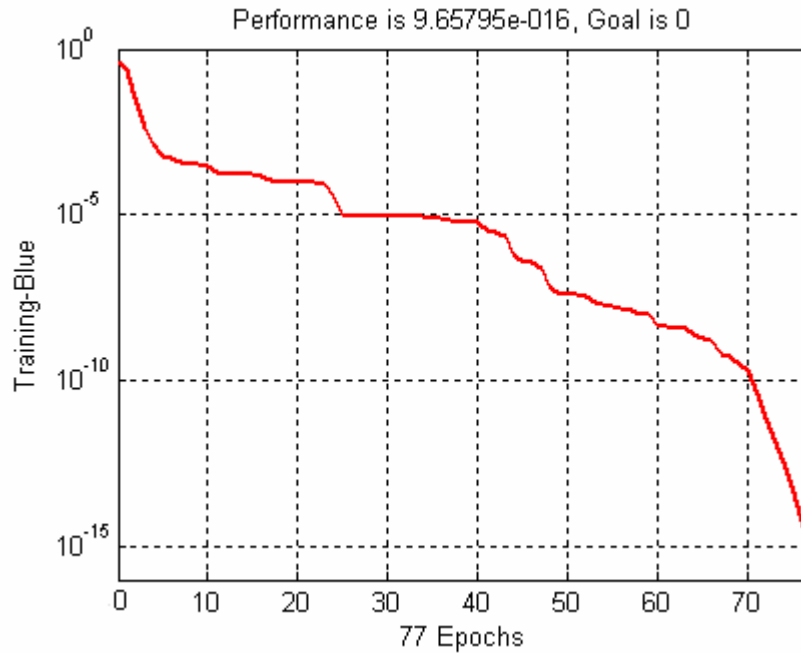


Figure (V.4.c): Evolution de l'erreur quadratique moyenne du RNA n° 4

V.5- Tests de RNA sur le nouvel exemple

Une fois que le RNA construit et que son apprentissage a atteint des performances satisfaisantes, En fait, cet exemple appartient à deux bases de données, la première étant la base d'apprentissage et la deuxième étant la base de tests sur laquelle on procède aux tests de la capacité du réseaux à reconnaître des exemples non appris.

Cette dernière opération permet d'estimer la capacité de généralisation du réseau.

Il est évident que le test de réseaux de neurone sur les exemples appris ou qui appartenaient à la base d'apprentissage du réseau ont donné de meilleurs résultats, car tous les types de fonctionnement (les défauts et le fonctionnement normale) ont été identifiés exactement par le réseaux ; cela peut être expliqué par les résultats obtenus dans la phase d'apprentissage de réseaux (dont les valeurs des erreurs quadratiques moyennes sont proches de zéro).

En ce qui concerne le test des cinq réseaux sur les exemples qui n'ont pas été appris dans la phase d'apprentissage (nouveaux exemples), leurs résultats sont présentés dans les tableaux ci-dessous.

Tableau 5.1. Résultats de simulation (test) du RNA (déséquilibré monophasé pour différentes charges)

SORTIE DU RNA	RNA CHARGE NOMINALE EN %				
	RNA1 0%	RNA2 25%	RNA3 50%	RNA4 75%	RNA5 100%
S ₁	3.0304e ⁻¹¹	1.2017e ⁻¹¹	1.0624e ⁻¹¹	2.8525e ⁻⁹	4.5219e ⁻¹²
S ₂	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
S ₃	4.5699e ⁻⁹	1.7221e ⁻¹¹	1.7974e ⁻¹¹	6.6221e ⁻⁹	2.1536e ⁻⁷
S ₄	1.8067e ⁻¹⁰	2.1553e ⁻¹²	1.4524e ⁻¹²	1.8798e ⁻¹²	1.8067e ⁻¹⁰

Tableau 5.2. Résultats de simulation (test) du RNA (coupure monophasée pour différentes charges)

SORTIE DU RNA	RNA CHARGE NOMINALE EN %				
	RNA1 0%	RNA2 25%	RNA3 50%	RNA4 75%	RNA5 100%
S ₁	4.7282e ⁻⁸	4.7150e ⁻⁸	4.6832e ⁻⁸	1.2570e ⁻⁸	2.8630e ⁻⁸
S ₂	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
S ₃	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
S ₄	2.4980e ⁻⁹	2.5072e ⁻⁹	2.5671e ⁻⁹	2.2968e ⁻⁹	2.2487e ⁻⁹

Tableau 5.3. Résultats de simulation (test) du RNA (coupure biphasée pour différentes charges)

SORTIE DU RNA	RNA CHARGE NOMINALE EN %				
	RNA1 0%	RNA2 25%	RNA3 50%	RNA4 75%	RNA5 100%
S ₁	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
S ₂	3.7282e ⁻⁸	3.7150e ⁻⁸	4.6832e ⁻⁸	1.2570e ⁻⁸	2.8630e ⁻⁸
S ₃	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
S ₄	2.4980e ⁻⁹	2.5072e ⁻⁹	2.5671e ⁻⁹	2.2968e ⁻⁹	2.2487e ⁻⁹

A partir des résultats obtenus dans la phase du test, on constate que les sorties des cinq réseaux évoluent conformément aux sorties désirées préétablies auparavant.

D'un autre côté, on peut présenter les sorties du RNA n°4 d'une autre manière on présente les sorties du RNA graphiquement en temps réel.

Les résultats des sorties du RNA n°4 sont présentés sur les figures suivantes:

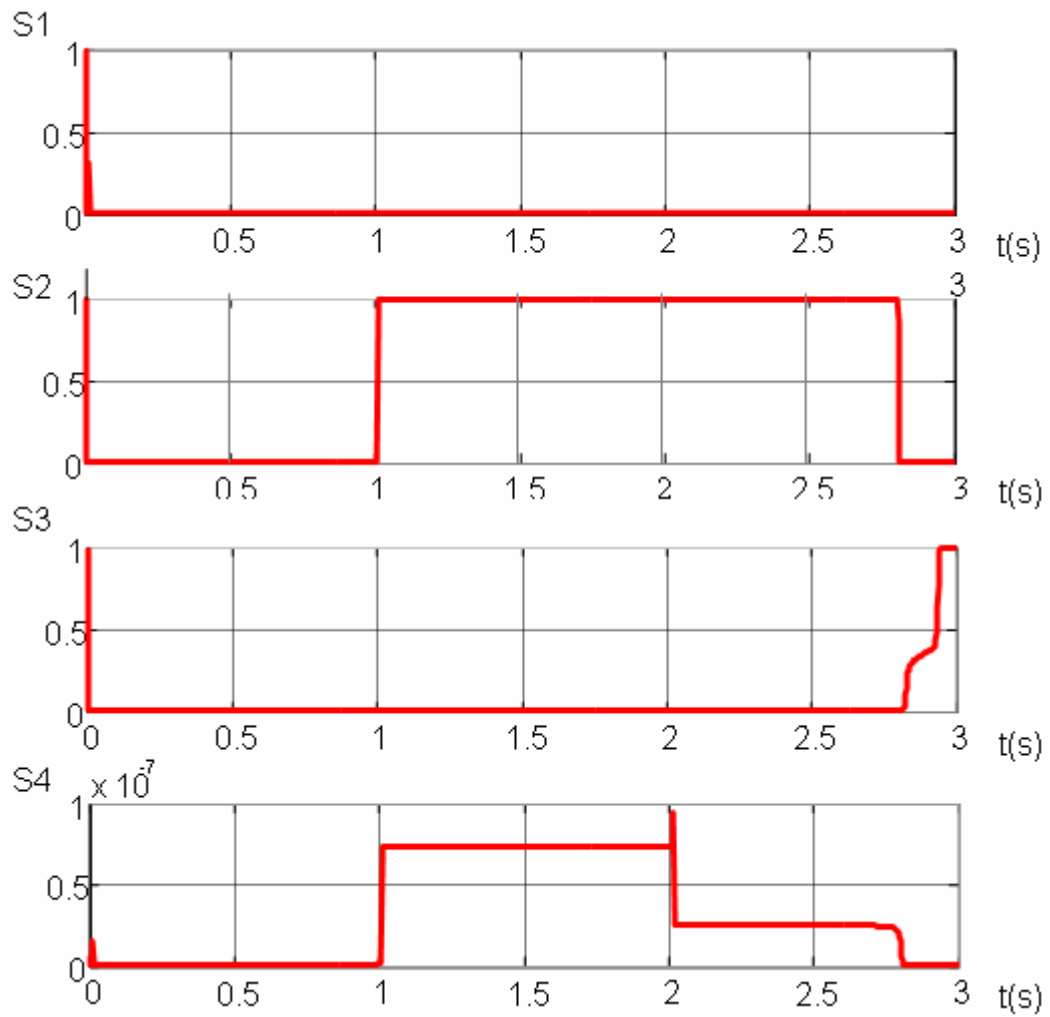


Figure (V.5): Test des sorties du RNA°4 en présence de défaut(déséquilibre monophasé)

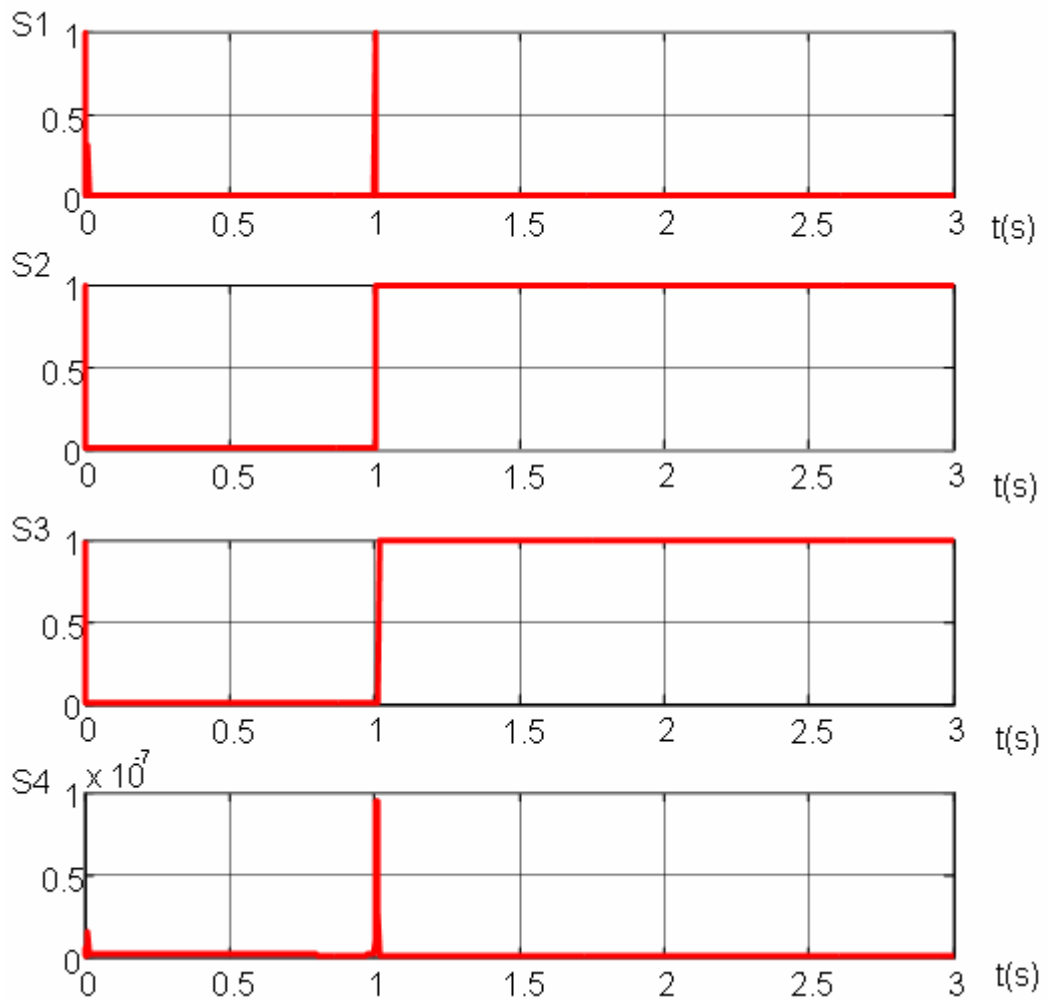


Figure (V.6): Test des sorties du RNA°4 en présence de défaut (Coupure monophasée)

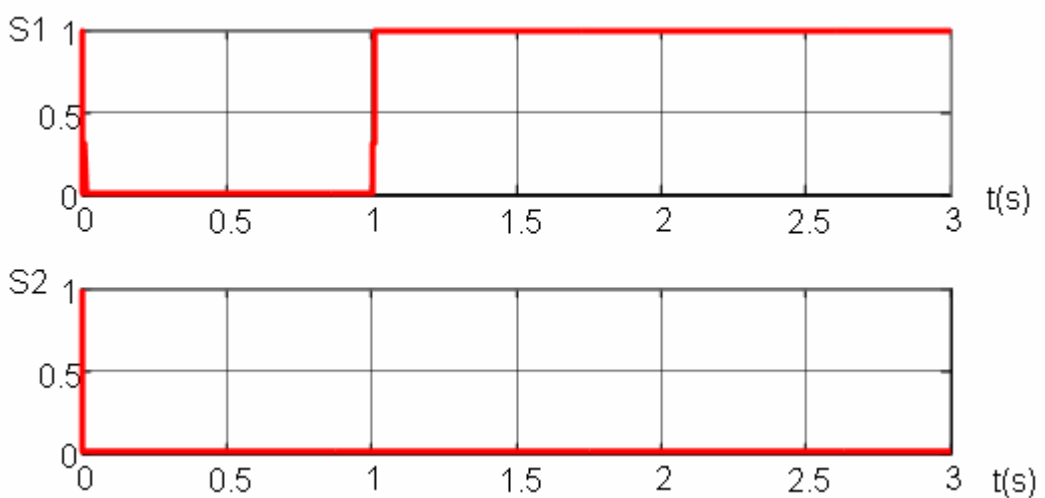




Figure (V.7): Test des sorties du RNA^o4 en présence de défaut (Coupure biphasée)

V.5.1 - Interprétation des résultats

A partir de la présentation en ligne des sorties de RNA n^o4, on peut interpréter que les graphes changent leurs caractéristiques à l'instant de l'application du défaut. Dans notre cas le défaut est créé à l'instant $t=1s$.

A cet instant, par exemple, les sorties : S_1 , S_2 , S_3 , S_4 , indiquent respectivement les valeurs: 0, 1, 0, 0, donc le défaut correspondant est: déséquilibre monophasé.

Les autres défauts appliqués, ont donnés les mêmes valeurs que les valeurs désirées (codes des défauts: coupure monophasé, de la tension et coupure biphasée).

V.6- Localisation des défaillances

Lorsque le système de détection (RNA) détecte un défaut, vient l'étape de la localisation de ce défaut, en donnant son type, sa cause, son endroit d'apparition et si possible les remèdes pour l'éliminer. Toutes ces étapes sont effectuées par le système d'aide à la décision qui interprète les codes donnés par la sortie du réseau de neurones.

Avant que ces codes ne soient interprétés, on doit tout d'abord arrondir les sorties du RNA aux valeurs zéro et un pour faciliter la tâche d'interprétation au système d'aide à la décision. Par conséquent, la méthodologie retenue dans cette phase est la suivante: lorsque le système de diagnostic reçoit à son entrée un exemple (valeurs échantillonnées des deux variables), le réseau de neurones classe cet exemple, en donnant sa sortie correspondante, puis cette dernière est interprétée comme une donnée représentant un fonctionnement normal

si toutes les sorties du réseau sont plus petites que 0.5 (c'est-à-dire plus proches de zéro), et un défaut est apporté à 1 si l'une des sortie est plus grande que 0.5. Cette phase est appelée déduction des codes [17, 18, 64, 77, 88, 97]. Les étapes de déduction et de localisation sont illustrées par les organigrammes suivants:

V.6.1- Détection d'une défaillance et détermination de son code

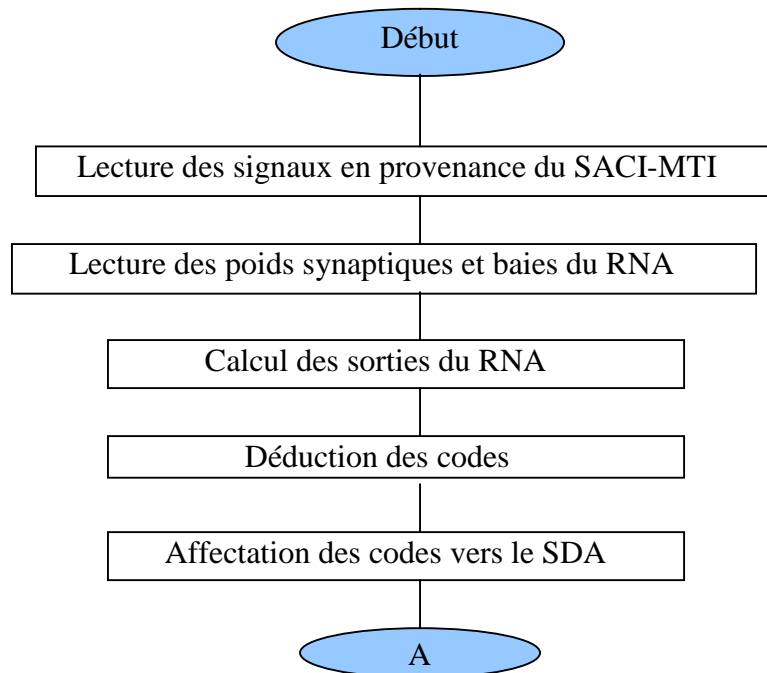


Figure (V.8): Détection d'une défaillance et détermination de son code

V.6.2- Localisation de l'endroit d'apparition des défaillances par le système d'aide à la décision

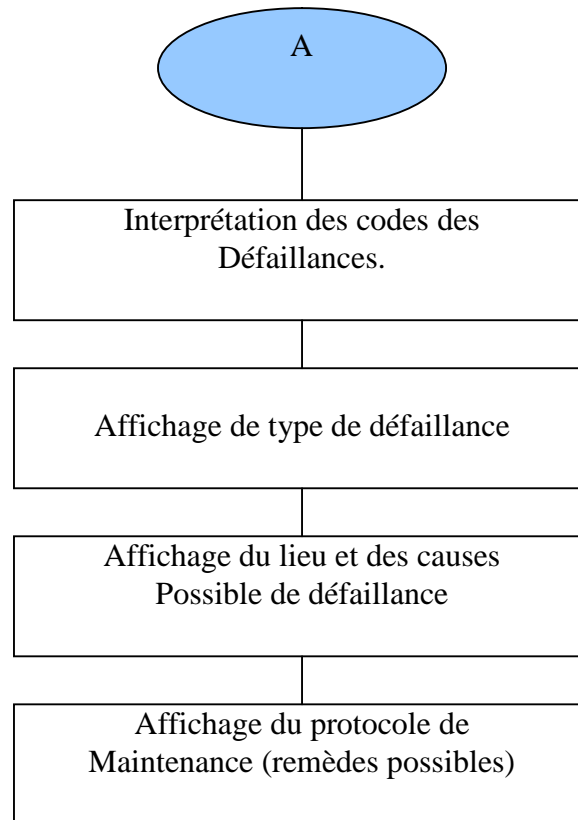


Figure (V.9): Localisation de l'endroit d'apparition des défaillances par le système d'aide à la décision

Après que le système d'aide à la décision interprète le code délivré par le bloc RNA, le type de défaut, son endroit d'apparition, ses causes possibles, et les remèdes correspondant, doivent être générés (afficher sur un écran) pour que l'opérateur puisse intervenir le plus tôt possible, afin d'éliminer le défaut, en utilisant les remèdes proposés par ce système.

dans la figure ci-dessous un exemple de sortie d'un système d'aide à la décision qui affiche sur l'écran toutes les informations (type, lieu, cause, ... etc.).

V.7- Conclusion

Dans ce chapitre nous avons utilisé les RNA pour la détection des défauts qui peuvent surgir sur la MAS. Le principe de cette solution est donc d'avoir un programme neuronal pour traiter les données qui proviennent directement du système d'acquisition. La deuxième partie de cette solution, qui est aussi importante, concerne la phase d'apprentissage.

Les entrées du RNA sont des entrées simples, telles que la valeur efficace des trois courants statoriques des deux enroulements statoriques et celles des tensions d'alimentation et ainsi que la valeur instantanée de la vitesse.

Par ailleurs, cinq réseaux de neurones ont été élaborés, chaque réseau correspond à un mode de fonctionnement donné. Le premier réseau correspond au fonctionnement à vide, et les autres quatre réseaux correspondent respectivement à 25%, 50%, 75% et 100% de la valeur du couple nominale de la charge entraînée par le moteur. A cet effet, un seul réseau fonctionne à la fois, en fonction de la charge actuelle entraînée par le moteur.

Pour la mise en œuvre des réseaux de neurones étudiés, on a tout d'abord passé par plusieurs études paramétrique (choix du type de réseau, choix des entrées, choix des sorties,.....). Ces études ont été précédé par l'opération d'acquisition des données, qui a pour but d'établir la base d'apprentissage des réseaux de neurones afin de définir pendant la phase d'apprentissage le nombre de couche cachée et le nombre de neurones par couche cachée (dimensionnement de l'architecture finale du réseau).

Enfin, les résultats obtenus dans la phase de test des Réseaux de Neurones nous ont permis d'observer la facilité et l'efficacité des RNA dans l'automatisation du diagnostic des défauts de la Machine Asynchrone (coupure et déséquilibre des tensions).

CONCLUSION GENERALE

2006 / 2007

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail consiste à modéliser la machine asynchrone en présence de défauts permettant d'effectuer le diagnostic des différents défauts pouvant survenir sur cette dernière. La modélisation de Park s'avère insuffisante dans le cas d'une machine en situation de défauts. Alors une modélisation plus fine de la machine a été développée, celle-ci nous a permis d'analyser de manière plus proche de la pratique, l'impact des défauts sur le comportement de la machine.

Dans le premier chapitre nous avons présenté de manière générale les différents défauts qui peuvent altérer le bon fonctionnement de la machine asynchrone ainsi que des notions sur le diagnostic. Nous avons cité des défauts qui se produisent au niveau du stator (courts – circuits statoriques), ainsi que des défauts rotoriques (cassures de barres rotoriques). Nous avons également présenté les signatures des défauts de la machine asynchrone. Ce qui nous a permis d'avoir une étude précise sur les signatures des défauts, afin de pouvoir élaborer un modèle qui présente au mieux notre machine asynchrone.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté le modèle de Park et nous avons élaboré, tout au long de ce chapitre, les techniques classiques qui permettent d'établir les équations électriques et mécaniques de la machine, nous avons introduit deux types de modélisation de la machine asynchrone; deux représentations d'états qui prennent en considération les différents défauts de la machine (courts – circuits statoriques et cassures de barres rotoriques).

Une modélisation imparfaite de la machine asynchrone peut générer des perturbations qui peuvent gêner son fonctionnement. Alors une bonne modélisation, et surtout en situation de défauts est nécessaire pour éviter ce type de problème. Une perturbation est une grandeur qui agit sur le modèle de la machine, et que l'on ne connaît pas. Dans ce travail, nous n'avons pas pris en compte les perturbations lors de la phase de modélisation de la machine asynchrone, alors d'autres travaux complémentaires peuvent être menés dans ce sens, pour arriver à des résultats encore beaucoup plus proche de la réalité.

Dans le troisième chapitre, l'étude de la commande vectorielle de la machine en question dans le cas où un défaut surviendrait à cette dernière exige la disponibilité d'un modèle permettant la prise en considération de ces défauts (cassure de barres rotorique).

Pour ce faire, nous nous sommes préoccupé par la suite du modèle qui tient compte de la structure réelle de rotor de la machine. L'approche que nous avons retenue dans la modélisation multi enroulements est celle qui considère le rotor comme un ensemble de mailles interconnectées entre elles, chacune formée par deux barres adjacentes et les portions d'anneaux qui les relient.

Le modèle ainsi développé nous permet d'étudier en simulation le comportement dynamique d'une machine asynchrone aussi bien en régime non commandé qu'en commandé vectorielle pour une régulation de vitesse avec rotor sain et défaillant.

Dans les deux derniers chapitres, l'objectif de ce travail est d'appliquer les réseaux de neurones artificiels pour la commande de la machine asynchrone, cela a été réalisé grâce à une implémentation logicielle utilisant MATLAB comme logiciel de simulation, et la règle de rétro propagation comme règle d'apprentissage des RNA. D'après l'étude effectuée, nous avons établi que l'augmentation du degré de confiance pour la prise de décision, est dépendante de l'utilisation des valeurs efficaces, les résultats obtenus dans la phase de test des Réseaux de Neurones nous ont permis d'observer la facilité et l'efficacité des RNA dans l'automatisation du diagnostic des défauts de la Machine Asynchrone (coupure et déséquilibre des tensions).

L'intérêt de ce travail, réside également dans le fait qu'il constitue une étape vers une application des réseaux de neurones pour la commande de la machine asynchrone, une telle application permettra de profiter pleinement des avantages qu'offrent les réseaux de neurones en termes de vitesse, simplicité de calcul et de robustesse aux perturbations.

Annexe

Paramètres des machines étudiées

Machine 1:

Plaque signalétique :

Constructeur : CEN

U : 220 /380 V.

$I_n = 21 /12$ V.

$\Omega_n = 1420$ tr/min.

$P_n = 5.5$ KW.

Les paramètres de la machine utilisée :

$R_s = 2.25 \Omega$	$\tau_s = 0.0546$ s
$R_r = 0.7 \Omega$	$\tau_r = 0.160$ s
$L_s = 0.1232$ H	$\sigma = 0.09$
$L_r = 0.1122$ H	$J = 0.038$ Kg.m ² (machine seule)
$M = 0.1118$ H	

Machine 2 :

Plaque signalétique :

Constructeur ABB

U : 220 /380 V.

$I_n = 4.5 / 2.6$ A .

$\Omega_n = 2850$ tr / min

$P_n = 1.1$ KW

Les paramètres de la machine utilisée :

$R_s = 7.828 \Omega$	$Nr = 16$
$J = 0.006093$ Kg m ²	$L_{sl} = 0.018$ H
$f = 0.00725$ Nm s / rd	$R_{bsain} = 150 \cdot 10^{-6} \Omega$
Rayon = 0.03575 m	$R = 0.00165 \Omega$
Longueur = 0.065 m	$Re = 72 \cdot 10^{-6} \Omega$
Entrefer = 0.00025 m	$L_b = 10^{-7}$ H
$N_s = 160$	$Le = 10^{-7}$ H

Notation et symboles utilisés

SYMBOLE	SIGNIFICATION	UNITE
N_s	nombre de spires statoriques par phase	
N_r	nombre de barres rotorique	
e	l'épaisseur de l'entrefer	[m]
f_s	fréquence d'alimentation	[Hz]
μ_0	perméabilité magnétique de l'air	
l	langueur active du circuit magnétique	[m]
Bs	induction magnétique crée dans l'entrefer par le courant statorique	[T]
l	langueur active du circuit magnétique	[m]
L_{sf}	inductance de fuite rotorique	[H]
L_b	inductance d'un barre rotorique	[H]
L_e	inductance total de l'anneau de court-circuit	[H]
L_{sc}	inductance cyclique	[H]
I_e	courant dans l'anneau de court- circuit	[A]
I_{bK}	courant de barre	[A]
I_{rK}	courant dans la boucle rotorique	[A]
I_{eK}	courant dans un portion d'anneau	[A]
I_a, I_b, I_c	courants des phases statorique	[A]
V_{abc}	les tensions statorique	[V]
ϕ_{abc}	les flux statorique les flux statorique	[wb]
θ_r	position du rotor	[rd]
α	angle électrique entre deux mailles rotorique	[rd]
R	rayant moyen de l'entrefer	[m]
R_r	résistance de l'enroulement rotorique	[Ω]
R_s	résistance de l'enroulement statorique	[Ω]
r_s	résistance d'une phase statorique	[Ω]
d, q	indices pour les composantes de PARK directe et quadrature, respectivement	
w_r	vitesse de rotation mécanique	[rad/s]
K_0	coefficient de frottement	
P	la puissance	[W]
P	opérateur de Laplace	

p	nombre de paires de pôles	
θ	Angle décrivant une position particulière dans l'espace, mesuré par rapport à une référence fixée par rapport au stator	
g	glissement	
L_s	est l'inductance propre d'une phase statorique	[H]
L_r	est l'inductance propre d'une phase rotorique	[H]
M_s	est l'inductance mutuelle entre deux phases statoriques	[H]
M_r	est l'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques	[H]
M_{sr}	est le maximum de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique	[H]
J	Moment d'inertie du rotor	[Kg.m ²]
C_e	Couple électromagnétique	[N.m]
C_r	Couple résistant	[N.m]
T_s	Constante de temps statorique	
T_r	Constante de temps rotorique.	



Bibliographie

[BOS 86] Bose, B. K., « *Power electronics and AC drives* », Prentice Hall, 1986 , 402p.

[CAR 95] Caron,J. P.; Hautier, J. P., « *Modélisation et commande de la machine asynchrone* », Ed Technip, 1995, 279p.

[LES 81] Lesenne, J.; Notelet, F.; Segulier, G., *Introduction à l'électrotechnique approfondie*, Technique et Documentation, 1981, 247p.

[KRA 87] Paul C. Krausse, « *Analysis of electric machinery* », McGraw –Hill Book Company, Singapore, 1987

[BOUG 98] A. Boughaba, « *Contribution à l'étude du contrôle d'une machine à induction : analyse d'algorithme de la commande vectorielle.* », thèse de magister », Université de Batna, 1998.

[REZ 03] Rezzoug.A, Hubert R, Abed .A « *Un modèle du moteur asynchrone à cage dédiée à la simulation et au diagnostic* », Université Henri Poincaré Nancy1, Notes de cours 2003.

[BAG 99] Baghli, « *Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques* », Thèse de doctorat, université Henri Poincaré, Nancy, jan 1999.

[BEL 05] BELHAMDI Saad « *Prise en Compte D'un Défaut Rotorique Dans la Commande d'un Moteur Asynchrone* »Thèse de Magister , Université Mohamed Khider Biskra, Soutenue 2005

[PFE 05] S.Siouani, F.Ben khelil « *Identification des défauts rotoriques de la machine asynchrone* » PFE 2005 Université de M'sila.

[ZEM 03] Mohammed Ryad Zemmouri « *Contribution à la surveillance des systèmes de production à l'aide des réseaux de neurones dynamiques* » Thèse de Doctorat, Université de franche compté, Déc 1999.

[SCH 99] E. Scheffer, « *Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts* », Thèse de Doctorat, Université de Nantes, Décembre 1999.

[CAS 03] R. Casimir, « *Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes* », Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, Décembre 2003.

[BOU 01] T. Boumegoura, « *Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic* », Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, Mars 2001.

[MOR 99] Moreau S., Trigeassou J.C., Champenois G., Gaubert J.P, « *Diagnosis of induction machines: A procedure of electrical fault detection and localization* », IEEE SDEMPED 99, Spain, September 1999.

[RAZ 01] H. Razik et G. Didier, « *Sur la détection d'un défaut au rotor des moteurs asynchrones* », IEEE Transactions on Automatic Control, Décembre 2001.

[RAZ 03] H. Razik et G. Didier, « *Notes de cours sur le diagnostic de la machine asynchrone* », Université Henry Poincaré, Nancy 1, 7 Janvier 2003.

[STE 88] J. Stein, E.D. Endicott, « *Noninvasive detection of broken bars in operating induction motors* », IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 3, NO. 4, December 1988.

[HAD 00] D.Hadiouche, H.Razik, A.Rezzoug, « *Modelling of a double-star induction motor with an arbitrary shift angle between its three phase windings* », EPEPEMC 2000 , Kosice.

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DE DIPLOME
D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE ELECTROTECHNIQUE

OPTION : ELECTROMECHANIQUE

Proposé et dirigé par : M^r. KHODJA Djalal Eddine

Présenté par : M^{rs}. DAHMANI. A & TOUNSI. B & BELKHIRI. A

Thème :

**DETECTION DES DEFAUTS PAR LES RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS
DE LA MACHINE ASYNCHRONE CONTROLEE PAR LA TECHNIQUE
DU FLUX ORIENTE**

Résumé :

Ce mémoire présente une étude de l'architecture du système de diagnostic automatique des défaillances de la machine asynchrone contrôlée par la technique du flux orienté.

Notre travail entre dans le cadre d'application de la stratégie de l'intelligence artificiel (réseaux du neurone) pour la détection et la localisation des défauts de la machine asynchrone. Nous commençons par l'étude de la problématique du diagnostic des défauts de la machine asynchrone.

Ensuite, pour l'extraction des valeurs indicatrices des défauts de la machine asynchrone, nous avons effectué la modélisation et la commande de la machine asynchrone en régime sain et présence des défauts.

Par ailleurs, plusieurs réseaux de neurones artificiels ont été appliqués pour la détection des défauts de la machine asynchrones. En effet, nous avons utilisé un sélectionneur qui permet d'activer un seul réseau à la fois en fonction de la charge entraînée par le moteur. Dans ce cas, le réseau sélectionné détecte uniquement les défauts correspondant à un mode de fonctionnement donné.

Enfin, des résultats de simulation ont été présentés pour montrer l'efficacité de la technique des Réseaux de Neurones Artificiels pour le diagnostic automatique des défaillances.

Mots clés : Machine asynchrone, commande à flux rotorique orienté, diagnostic automatique, défauts, réseaux de neurones, valeurs efficaces (RMS), algorithme de rétropropagation.