REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE Yahia Farés

جامعة الدكتور يحي فارس

FACULTE de Technologie

Projet de fin d'études de Master

Département : génie électrique

Spécialité : Commandes électriques

Détection et localisation des défauts dans le système d'entraînement de la machine asynchrone

Présenté par :

- **Mohamed Houti**
- **Oussama Nadri**

Promoteur :

Dr. Noureddine Henini

Année universitaire

2021/2020

Remerciements

Je tiens à passer mes remerciements les plus sincères à notre professeur, docteur : « HENINI Noureddine », pour son assistance assidue et ses directifs précieux contribuant à enrichir notre sujet d'étude de tous les côtés.

J'exprime aussi toute ma gratitude au jury et pour l'ensemble des professeurs qui s'y trouve pour leurs conseils et leurs apports afin d'améliorer nos compétences techniques.

Je voudrais aussi exprimer mes remerciements à notre professeur « LAKROUT Abdelkader » et le doyen de la faculté de technologie « BACHENE Mourad » et son adjoint « GUEMANA Mouloud ».

Enfin, je voudrais rendre hommage à tous les professeurs de la spécialité génie électrique en général et le professeur « MOULOUD Sofiane » en particulier.

Dédicace

Louange à dieu le miséricordieux qui a illuminé ma voie et a été toujours à mon aide. Je dédie ce travail à celle qui est chère à moi, à celle qui est la raison de mon existence dans cette vie et sur cette terre, à celle qui abrite le paradis sous ses pieds et à qui je m'incline devant elle respectueusement, celle que je demande sa bénédiction. A ma chère mère « HAFIDHA » que dieu la garde pour nous.

Je dédie également ce travail à celui que je lui ma vie, celui qui m'a toujours soutenu, qui se brulait comme une bougie afin d'illuminer mon chemin, à celui que je respecte beaucoup à mon cher père « LAÏD » que dieu le garde pour nous.

A mon plus grand support dans ma vie celle qui m'a toujours accompagné pour le meilleur et pour le pire, la lumière de ma vie « SARAH ».

A tous les membres de ma famille particulièrement mon frère « AHMED CHERIF » et mes trois sœurs « HOURIA, SABIHA et NOUR EL HOUDA ».

A tous mes amis sans exception et tous mes professeurs qui m'ont aidé et m'ont soutenu jusqu'à la fin.

En fin, je prie dieu de nous donner tout ce qui peut être bénéfique pour nous et ainsi pour notre patrie.

HOUTI Mohamed.

Dédicace

Je tiens à exprimer ma plus grande reconnaissance et mes remerciements à mes plus grandes personnes dans ma vie ceux qui ont toujours été avec moi pour me soutenir et m'aider à accomplir tout ce que dont j'avais envie. Je dédie ce travail à mes parents « MOHAMED et ZAHIA » qui ont beaucoup souffert pour moi et pour ma réussite. A vous deux, je vous remercie tant pour ce que vous avez fait pour moi.

A ma petite famille qui a toujours fait mon bonheur éternel mes sœurs « ASMAA, FATMA ZAHRAA ET HADJER ».

A tous mes amis proches en particulier et mes connaissances en général.

A mes professeurs qui m'ont assisté pour accomplir ce travail.

En fin, je prie dieu de nous donner tout ce qui peut être bénéfique pour nous et ainsi pour notre patrie.

NADRI Oussama

ملخص:

يتم استخدام أنظمة القيادة الكهربائية القائمة على محركات غير المتزامنة، على نطاق واسع في التطبيقات الصناعية بسبب التكلفة المنخفضة والأداء والمتانة.

هذا العمل هو جزء من موضوع كشف وتحديد الاعطال في أنظمة القيادة الكهربائية، خاصة تلك القائمة على الآلات الغير المتزامنة اختيار محرك مبرر من خلال نجاح المتزايد الذي اثاره على وجه الخصوص في قيادة الكهربائية متغير السرعة.

عملنا مهتم برصد وتشخيص أعطال المحرك غير متزامن، مثل اعطاء الجزء الثابت ودوار، في هذا السياق، اقترحنا نهج للرصد عن الأعطال من خلال مراقبة تيار الثابت باستعمال نهج الاشارة، حيث يقوم على معالجة وتحليلي الإشارة الزمنية أو الترددية للجزء الثابت.

Résumé

Les systèmes d'entraînements électriques à base de machine asynchrone sont largement utilisés dans les applications industrielles en raison de leurs faibles coûts, de leurs performances et de leurs robustesses.

Ce travail est une partie de sujet de la détection et localisation de défauts dans les systèmes d'entraînements électriques et en particulier ceux à base de machine asynchrone. Le choix de la machine est justifié par le succès grandissant qu'elle a suscité, notamment, dans les entraînements électriques à vitesse variable.

Notre travail s'intéresse à la surveillance et au diagnostic des défauts dans la machine asynchrone tels que les défauts statoriques. Dans ce contexte, nous avons proposé une approche de détection de défaut par la surveillance du courant statorique en l'occurrence l'approche signal, elle se base sur le traitement et l'analyse du signal temporel ou fréquentiel du courant statorique.

Mots clés : Détection, diagnostic, machine asynchrone, défauts statoriques, RMS, logique floue, court circuit entre spires, analyse spectrale.

Abstract

Electric drive systems based on Asynchronous machine are widely used in industrial applications due to their low costs, performance and robustness.

This work is a part of the subject of the detection and localization of faults in electrical drive systems and in particular those based on asynchronous machines. The choice of the machine is justified by the growing success it has generated, in particular in variable speed electric drives.

Our work is concerned with the monitoring and diagnosis of faults in the asynchronous machine such as stator and rotor faults,

In this context, we have proposed a fault detection approach by monitoring the stator current,in this case the signal approach; it is based on the processing and analysis of the time signal or frequency signal of the stator current.

I. Etat de l'art sur le diagnostic

I.1. Introduction.....
I.2. Intérêt et objectifs du diagnostic.....
I.3. Concepts et définition.....
I.4. Principe de diagnostic des défauts.....
I.4.1. Redondances d'information.....
I.4.2. Redondance physique ou matérielle.....
I.4.3. Redondance analytique.....
I.4.4. Procédure de détection et d'isolation des défauts.....
I.5. Classification des méthodes de diagnostic.....
I.5.1. Méthodes qualitatives.....
I.5.2. Méthodes quantitatives.....
I.5.3. Détection des défauts par traitement de signal.....
I.6. Critère de performances d'un système de diagnostic.....
I.7. Principe de génération de vecteur résidu pour la détection et la localisation de défauts.....
I.7.1. Génération des résidus.....
I.7.2. Isolation des défauts.....
I.7.3. Méthodologie générale de génération du vecteur résidu.....
I.7.4. Technique d'évaluation de résidus.....
I.8. Reconstruction de défauts.....
I.9. Performance d'une procédure de diagnostic.....
I.10. Les différents types de défauts.....
I.10.1. Les défauts actionneurs.....
I.10.2. Les défauts capteurs.....
I.10.3. Les défauts composants ou systèmes.....
I.11. Conclusion.....

Chapitre II. Modélisation de la machine asynchrone Multi-enroulements48

II.1 Introduction
II.2 Modélisation de la machine asynchrone en régime normal « Sain » (modèle triphasé)
II.2.1 Hypothèses de simplification.....
II.2.2 Modèle triphasé équivalent d'une machine asynchrone.....
II.2.3 Définition de la matrice de transformation.....
II.2.4 Transformation « triphasé-triphasé » des équations du modèle.....
II.2.4.1 Les équations électriques et magnétiques.....
II.2.4.2 Les équations mécaniques
II.2.5 Mise en équation d'état du modèle triphasé.....
II.2.6 Simulation de la machine dans le régime normal.....
II.2.6.1 Résultats de simulation
II.2.6.2 Interprétations des résultats.....
II.3 Modélisation de la machine asynchrone en régime défectueux.....
II.3.1 Modélisation d'un défaut statorique « court-circuit entre spires statoriques ».....
II.3.1.1 Simulation de la machine asynchrone en présence de défaut de court-circuit entrespires
II.3.1.2 Résultats de la simulation
II.3.1.3 Interprétations des résultats.....

II.4 Analyse des défauts statoriques par traitement de signal.....
II.4.1 Analyse spectrale par FFT .....
II.4.2 La transformée de Fourier à court terme TFCT ou STFT.....
II.4.3 Analyse spectrale des courants statoriques .....

Conclusion

Chapitre III :

Introduction.....
III.1. Principe et définitions.....
III.2 . Opérateurs et normes.....
III.3. Inférence.....
3.1. Méthode d'inférence Max-Min.....
2.3.2. Méthode d'inférence Max-Produit.....
2.3.3. Méthode d'inférence Somme-Produit.....
III. 4. Fuzzification.....
III.5. Inférence.....
III.6.Défuzzification.....

a. **Model en défaut.....**
b. **Détection du défaut par l'utilisation de la logique floue .....**
c. **Interprétation des résultats de simulation .....**

Conclusion

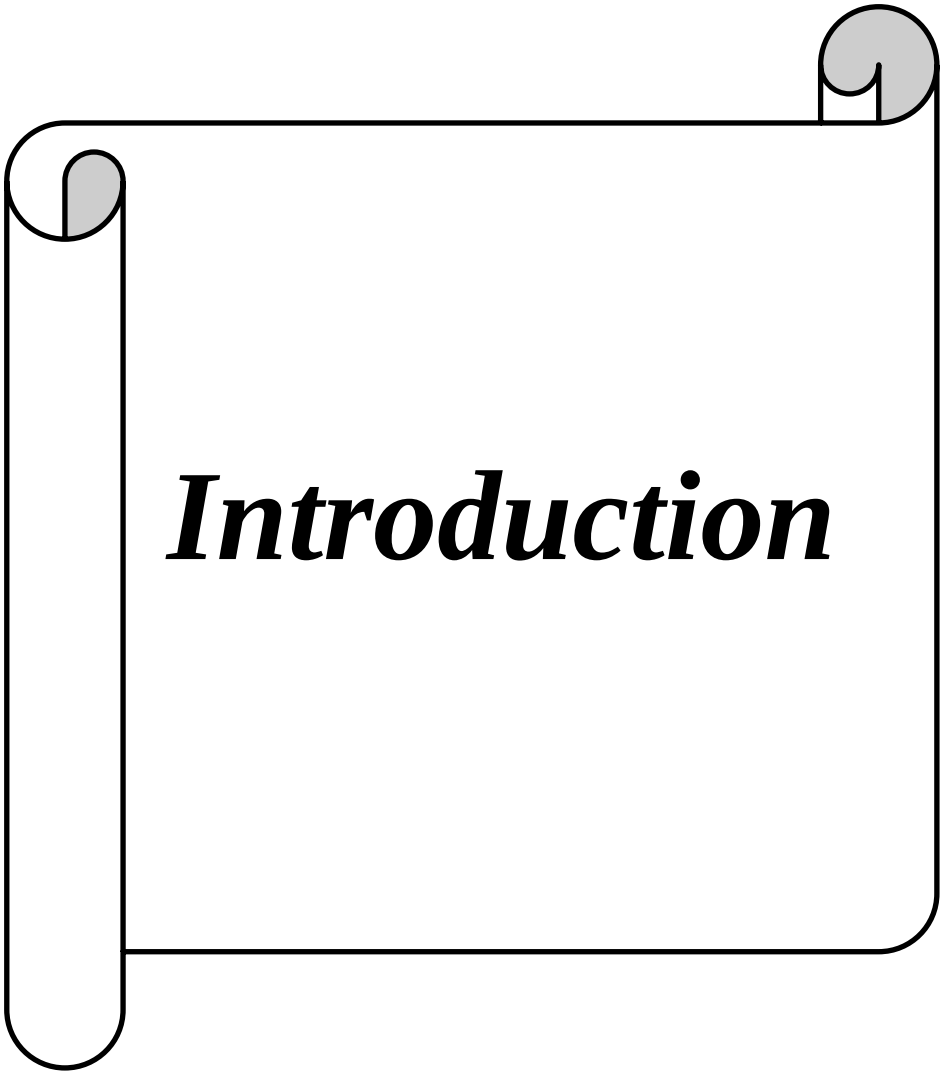
CONCLUSION Général ……

Glossaire

IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MCC	Moteur à Courant Continu
MAS	Moteur Asynchrone
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
AFNOR	Association Française de Normalisation
CEI	Commission d'Electrotechnique Internationale
CND	Contrôle Non Destructif
DLD	Détection et Localisation de Défauts
RDF	Reconnaissance De Formes
SIF	Système d'Inférence Floue
FFT	Fast Fourier Transformation
STFT	Short Time Fourier Transformation
WT	Wavelette
FL	Fuzzy Logic
PLC	Programmable Logic Controller

Nomenclature

Pe	Puissance électrique	[W]
Pm	Puissance mécanique	[W]
I	Courant	[A]
Isa, Isb, Isc	Courants statoriques correspondent aux trois phases (a,b,c)	[A]
Ira, Irb, Irc	Courants rotoriques correspondent aux trois phases (a,b,c)	[A]
U ou V	Tension	[V]
Vsa, Vsb, Vsc	Tensions statoriques correspondent aux trois phases (a,b,c)	[V]
Vra, Vrb, Vrc	Tensions rotoriques correspondent aux trois phases (a,b,c)	[V]
Tem ou Cem	Couple développer ou électromagnétique	[N.m]
Tr ou Cr	Couple résistant	[N.m]
ω	Vitesse de rotation	[rad/s]
Ω	Vitesse de rotation	[rad/d]
Θ	Position angulaire entre le stator et le rotor	[°]
R	Résistance	[Ω]
Rs	Résistance propre d'une phase statorique	[Ω]
Rr	Résistance propre d'une phase rotorique	[Ω]
$\emptyset$	Flux magnétique	[Wb]
$\emptyset_{sa}$, $\emptyset_{sb}$, $\emptyset_{sc}$	Flux magnétique statoriques correspondent aux trois phases (a,b,c)	[Wb]
$\emptyset_{ra}$, $\emptyset_{rb}$, $\emptyset_{rc}$	Flux magnétique rotoriques correspondent aux trois phases (a,b,c)	[Wb]
Ms	Inductance mutuelle entre deux phases statoriques	[H]
Mr	Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques	[H]
Msr	Inductance mutuelle entre une phase de stator et une autre de rotor	[H]
Mss	Inductance mutuelle entre deux phases statoriques	[H]
Ls	Inductances statoriques	[H]
Lr	Inductances rotoriques	[H]
Lsf	Inductance de fuite statorique	[H]
Lrf	Inductance de fuite rotorique	[H]
J	Moment d'inertie	[$Kg.m^2$]
f	Coefficient de frottement	-
fsa, fsb, fsc	Coefficient de court-circuit	-


Introduction

Introduction générale

La machine asynchrone, de par sa construction, est la machine la plus robuste et la moins chère du marché. Les progrès réalisés en commande et les avancées technologiques considérables, tant dans le domaine de l'électronique de puissance que dans celui de la microélectronique, ont rendu possible l'implantation de commandes performantes de cette machine faisant d'elle un concurrent redoutable dans les secteurs de la vitesse variable et du contrôle rapide du couple.

Cependant, de nombreux problèmes demeurent. L'influence des variations des paramètres de la machine, le comportement en fonctionnement dégradé, la présence d'un capteur mécanique sont autant de difficultés qui ont aiguisé la curiosité des chercheurs dans les laboratoires. En témoigne, le nombre sans cesse grandissant des publications qui traitent le sujet. Bien que déjà présents dans d'autres domaines, la logique floue, constituait, une nouveauté dans le domaine de l'électrotechnique.

Nous avons voulu savoir quel pourrait être l'apport de cette méthode appliquée à l'identification et la localisation des défauts de la machine asynchrone. Des questions se posent alors naturellement : cette méthode qui ne relève, en tout cas pas à première vue, d'une logique cartésienne classique, peut-elle conduire à de meilleurs résultats ? Sinon, que présente-elle comme avantages et inconvénients par rapport aux techniques conventionnelles ? Ce qui nous a le plus motivé dans ce travail, c'est qu'il comporte de nombreux volets et touche à plusieurs disciplines en même temps. Il comporte par-dessus tout une partie théorique forte en enseignements et qui nous permet, non seulement de voir concrètement l'aboutissement et la finalité de l'étude, mais aussi de faire ressortir les problèmes cruciaux de mise en œuvre.

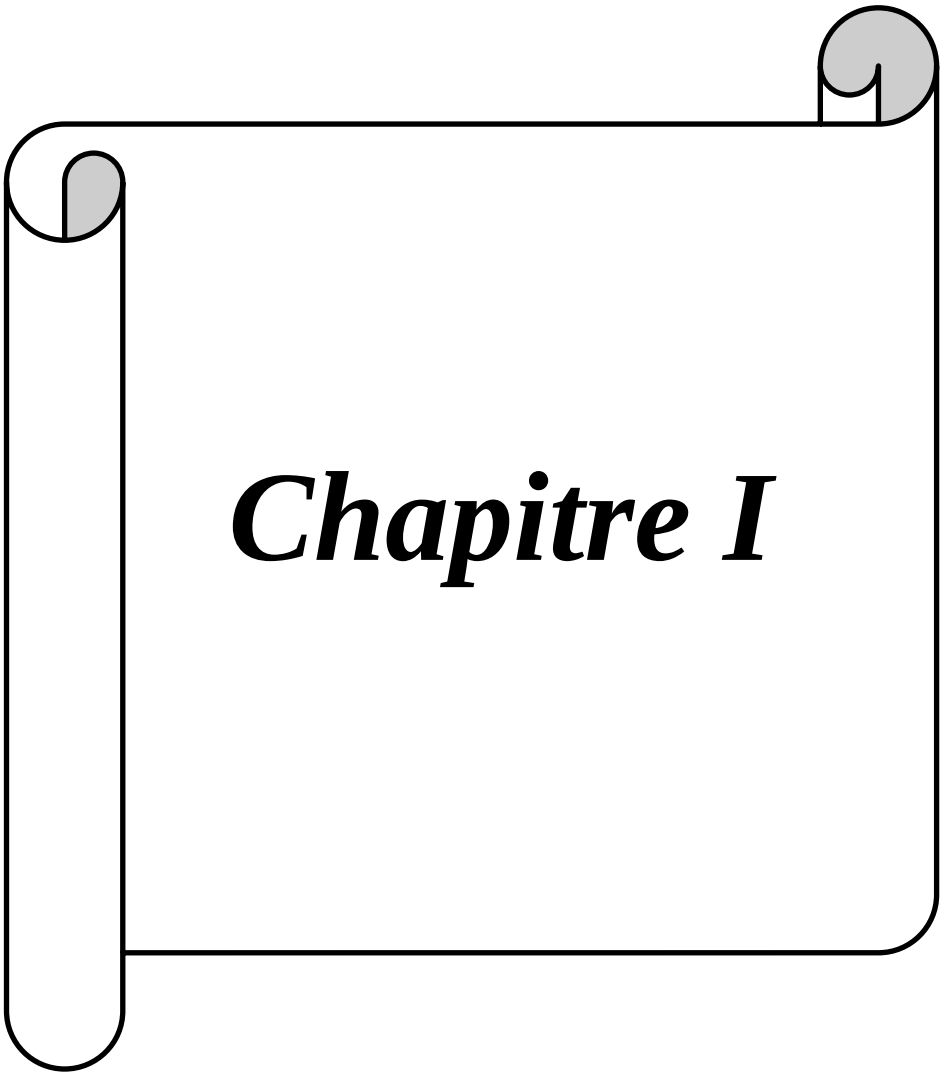
Il est évidemment impossible de cerner toutes les possibilités et les combinaisons où peuvent intervenir cette technique. Nous examinerons plus précisément la régulation ainsi que son optimisation. Il nous apparaît nécessaire de commencer par présenter cette méthode puis d'expliciter les manières les plus simples de la mettre en œuvre.

Tout au long de ce travail, nous avons gardé comme objectif l'implantation de la méthode développée. En effet, combien de procédés donnent de très bons résultats en simulation. Nous essayerons aussi d'éviter les procédés trop complexes pour une implantation raisonnable ou qui ne permettent pas de tirer des conclusions quant aux performances obtenues. L'aspect théorique revêt donc une très grande importance. Il permet de valider la méthode établie par un travail théorique et de simulation. Il met également en évidence certaines lacunes

dues à une mauvaise modélisation ou identification. Dans de nombreux cas, les résultats sont assez satisfaisants puisque la régulation pallie ces erreurs, mais il arrive que la méthode, une fois implantée, ne fonctionne pas du tout. L'expérimentation en laboratoire constitue donc un garde-fou avant l'étape d'industrialisation

La détection des défauts dans les machines à induction devient de plus en plus importante. La principale difficulté dans cette tâche est le manque d'un modèle analytique précis pour décrire une machine défectueux. Dans cette thèse, la logique floue est utilisée pour prendre des décisions concernant l'état du stator. Le système flou est basé sur des connaissances exprimées dans des règles et des fonctions d'appartenances, qui décrivent le comportement de l'enroulement du stator. Ce travail présente une méthode fiable pour la détection de Défauts d'enroulement du stator basés sur la surveillance du courant de ligne (amplitudes) en utilisant la simulation dans MATLAB SIMULINK et de concevoir un algorithme par la logique flou pour détecter et analyser les défauts électriques du machines asynchrones. Plusieurs types de défauts électriques tels que des défauts de sous-tension, déséquilibre, défaut de surcharge peuvent être détecté aussi.

Les différents travaux concernant le sujet font l'objet de trois chapitres qui constituent ce mémoire.


Chapitre I

I.1 Introduction

De manière générale, lorsqu'on parle de diagnostic des défauts, on se réfère à la procédure de détection et d'isolation de ces derniers, que l'on retrouve souvent sous le nom : FDI (Fault Detection and Isolation). Cette procédure nous permet d'avoir des informations sur l'apparition d'un défaut et sur sa provenance le plus rapidement possible. Les méthodes de détection et de localisation des défauts ont connu un essor considérable depuis le début des années 70 [8], [9]. En effet, de nombreux chercheurs ont investi dans ce domaine proposant alors diverses approches et techniques répondant à la diversité des applications.

Ce chapitre présente un état de l'art sur le diagnostic des défauts dans les systèmes physiques. Il est question, dans un premier temps, de donner les différents concepts et notions rencontrés dans la littérature concernant le diagnostic des défauts, car un bon diagnostic nécessite une bonne compréhension de ces notions. Le principe de base du diagnostic sera alors présenté ainsi que les différentes méthodes proposées dans ce domaine [2].

D'autre part, nous allons présenter la procédure générale de détection et d'isolation des défauts par les méthodes à base de modèle mathématique. Cette dernière passe par deux étapes essentielles : la génération et l'évaluation du vecteur résidu.

I.2 Intérêt et objectifs du diagnostic

Dans le domaine de l'industrie et de la production industrielle le champ de la compétitivité repose sur plusieurs critères de performance, de robustesse et de qualité. Mais malgré toutes les assiduités pour l'établissement de ces conceptions, les défaillances de celles-ci se font fréquentes et peuvent résulter soit d'une fin de cycle de vie d'un élément et aussi de l'apparition soudaine d'une panne brusque. Alors que ces éléments de production représententpour la plupart du temps des enjeux majeurs soit à buts lucratifs ou pour assurer un service. Elles peuvent aussi toucher à un élément des plus importants qui représente la sécurité matérielle, environnementale, et même humaine. Pour éviter des conséquences irréversibles, des méthodes de supervision et de surveillance ont été mises en place et qui reposent toutes sur le diagnostic des systèmes [6].

Le diagnostic consiste à détecter, à localiser et éventuellement à identifier les défaillances et/ou les défauts qui affectent un système. Plus généralement, le diagnosticapporte une contribution à la solution de détection et de localisation d'un mauvais fonctionnement.

I.3 Concepts et définition

I.3.1 Le diagnostic : C'est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillances à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'information provenant d'une inspection, d'un control ou d'un test. Cette définition met en évidence une étape d'observation qui consiste à recueillir les informations provenant du système, suivie d'une étape de détermination de la cause de cette défaillance à partir d'un raisonnement logique fondé sur les informations obtenues [5].

I.3.2 Une anomalie : est une particularité non conforme à la loi naturelle ou logique [16].

I.3.3 Défaillance : interruption permanente de la capacité du système à accomplir samission dans des conditions de fonctionnement opérationnelles spécifiées [5].

I.3.4 Une Panne : est l'inaptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise. Unepanne résulte toujours d'une défaillance [16].

I.3.5 Défaut : déviation non acceptable d'au moins une caractéristique d'un système parrapport à sa valeur nominale. Il est noté : $f(t) \in R^n f$ [5].

I.3.6 Une perturbation : consiste en tout phénomène conçu comme normal influençant un processus, non ou mal représenté par un modèle de référence [26].

I.3.7 Un résidu : signal conçu comme indicateur d'anomalie fonctionnelle ou comportementale, sensiblement nul en absence de défauts et non nul en leur présence. Il est noté : $(t) \in {}^{nr}$ [5].

I.3.8 Un symptôme : est un caractère distinctif d'un état fonctionnel ou comportemental anormal [5].

I.3.9 La surveillance : est une tâche continue, réalisée en temps réel, qui permet de déterminer l'état d'un système physique, elle consiste en l'enregistrement des informations ainsi qu'en la reconnaissance et l'indication des anomalies du comportement [5].

I.3.10 La sensibilité : représente la capacité d'un système de diagnostic à générer des résidus sensibles aux défauts à détecter. Ces défauts sont généralement caractérisés par une certaine amplitude.

I.3.11 La supervision : est la surveillance d'un système physique et la prise de décisions appropriées en vue de maintenir son fonctionnement lors de l'apparition de défauts [26].

I.3.12 L'erreur : Tout écart entre la valeur mesurée ou calculée, et la valeur réelle [23].

I.4 Principe de diagnostic des défauts

I.4.1 Redondances d'informations

Le principe de base du diagnostic des défauts repose sur la notion de redondance, qui fournit au système plusieurs informations différentes sur une même variable. Des tests vont alors permettre de vérifier la cohérence de ces informations. Cependant, il existe deux approches :

- Le première est dite traditionnelle et consiste à ajouter des capteurs afin d'obtenir des informations supplémentaires sur l'état du système. C'est la redondance matérielle.

L'inconvénient majeur de cette approche est le cout additionnel en équipement.

- La deuxième approche est dite redondance analytique. Elle consiste à développer des algorithmes de détection de défauts en utilisant des mesures disponibles sur le système. Une équation de redondance analytique est une équation dont laquelle toutes les variables sont connues. Pour éviter les fausses alarmes ou le manque de détection, ces algorithmes doivent tenir compte des bruits de mesure, des perturbations ainsi que des erreurs de modélisation. Les méthodes basées sur cette approche sont plus simples, plus flexibles, moins couteuses et plus écologiques que l'approche traditionnelle [8].

On résume les deux tâches essentielles en diagnostic [23]:

- Observer les symptômes (indices) de la défaillance.
- Identifier la cause de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur ces observations.

La procédure de diagnostic de défaillances et des dégradations susceptibles d'affecterles différentes entités d'un processus industriel s'articule autour des étapes suivantes [23] :

- ✓ L'extraction des informations à partir de mesures appropriées ou d'observations.
- ✓ La mise en œuvre d'une méthode de diagnostic.
- ✓ La prise de décision.

I.4.2 Redondance physique ou matérielle

La redondance physique consiste à utiliser plusieurs actionneurs, capteurs, processeurs

et logiciels pour mesurer et/ou contrôler une variable particulière. Un principe de vote est applique sur les valeurs redondantes pour décider si une faute est présente ou non. Cette approche entraîne un coût important en instrumentation mais s'avère extrêmement fiable et difficile à implanter. Elle est mise en œuvre essentiellement sur des systèmes à hauts risquestels que les centrales nucléaires ou les avions.

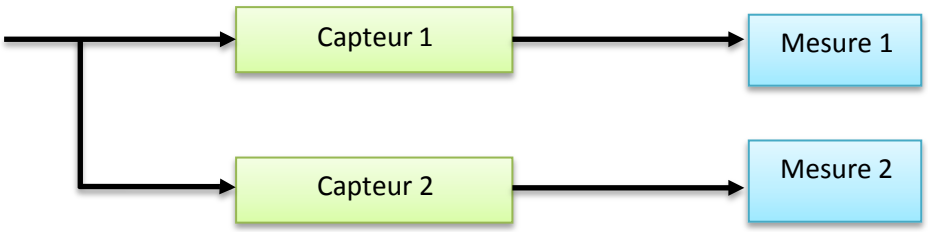


Fig.I.1. *Schéma représentant la redondance matérielle.*

Le diagnostic utilisant la redondance physique se limite à la surveillance des éléments redondants (capteur, actionneurs, ...) présents sur une installation. A l'aide de cette unique technique, il ne sera pas possible de détecter des pannes survenant sur des éléments non redondants [16].

I.4.3 Redondance analytique

Un complément à la redondance physique consiste à exploiter les contraintes liant les différentes variables du système. Ces contraintes peuvent souvent s'exprimer sous la forme derelations analytiques liant les variables connues (relations d'entrée / sortie ou de sortie/sortie). Ces relations sont appelées relations de redondances analytiques. Le principe de la surveillance consiste à vérifier la fermeture algébrique de ces relations en utilisant les mesures prélevées en ligne sur le système. Le concept de redondance analytique repose sur l'utilisation d'un modèle mathématique du système à surveiller. Pour cette raison, les méthodes utilisant laredondance analytique pour la surveillance sont appelées méthodes à base de modèle. Le principe de la surveillance utilisant un modèle peut être sépare en deux étapes : la génération de résidus et la prise de décision [16].

I.4.4. Procédure de détection et d'isolation des défauts

Comme elle est représentée par la figure I.2, La procédure de détection et d'isolation des défauts passe par trois étapes essentielles [11]:

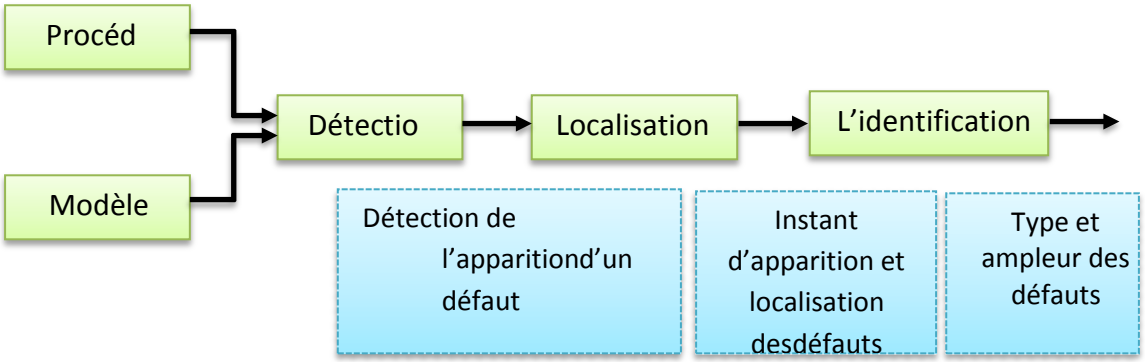


Fig.I.2. *Procédure de détection et d'isolation des défauts.*

Ces étapes de diagnostic sont résumées dans le schéma suivant [23] :

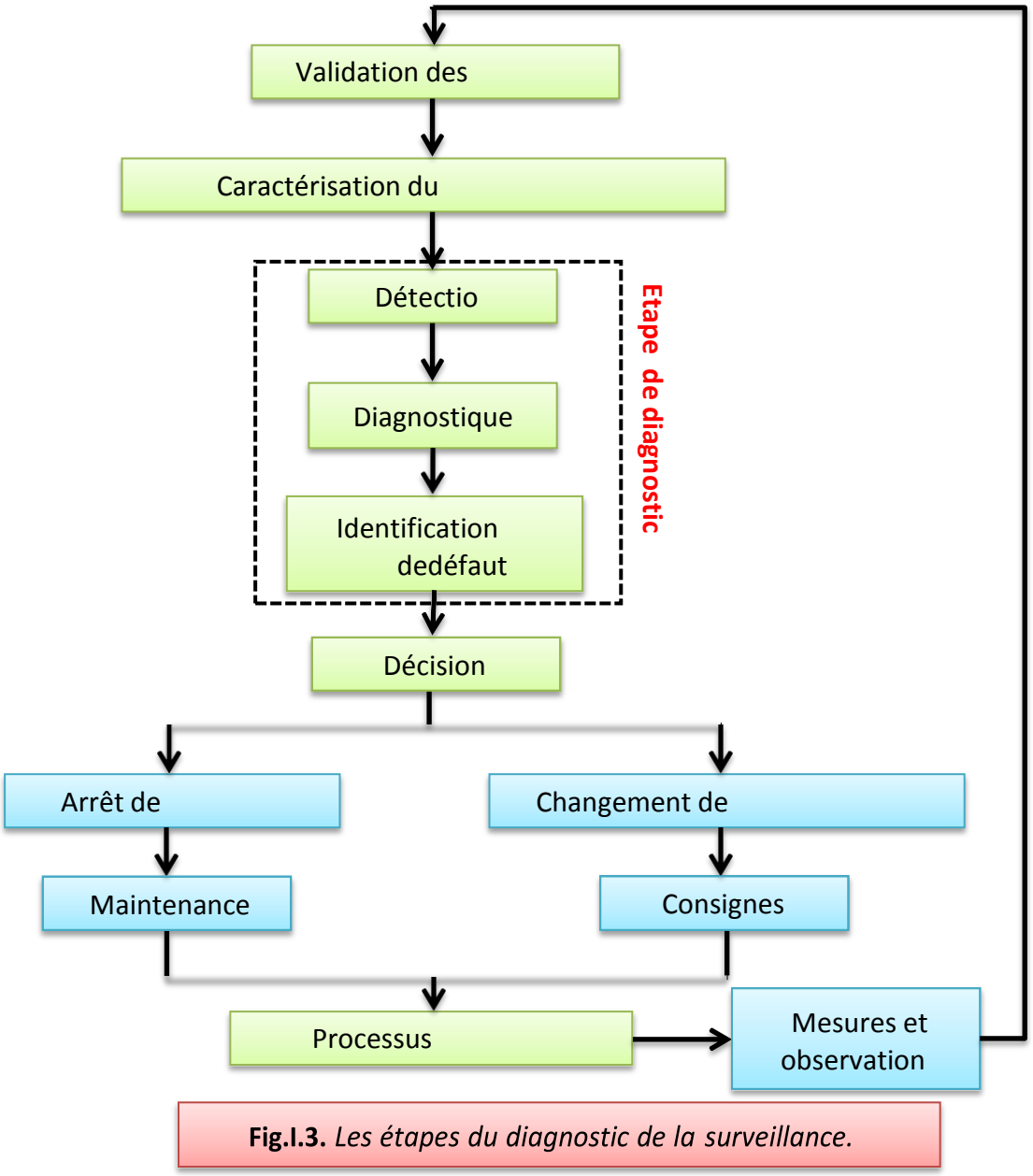


Fig.I.3. *Les étapes du diagnostic de la surveillance.*

I.5 Classification des méthodes de diagnostic

Des méthodes modernes de l'automatique et de l'intelligence artificielle sont mises en œuvre grâce au spectaculaire progrès réalisé dans le domaine des calculateurs numériques, ce qui permet d'éliminer la redondance matérielle pour le diagnostic des systèmes industriels [8].

On peut globalement citer deux grandes familles dans les méthodes de diagnostic [8]:

- Les méthodes basées sur l'intelligence artificielle que nous appellerons diagnostic qualitatif (sans modèle) qui ne nécessitent pas de modèle mathématique mais surtout de données de référence.
- Les méthodes basées sur la modélisation des systèmes ou des signaux que nous appellerons diagnostic quantitatif (avec modèle).

Il est possible de classer ces méthodes selon le schéma de la figure (I.4) [8] :

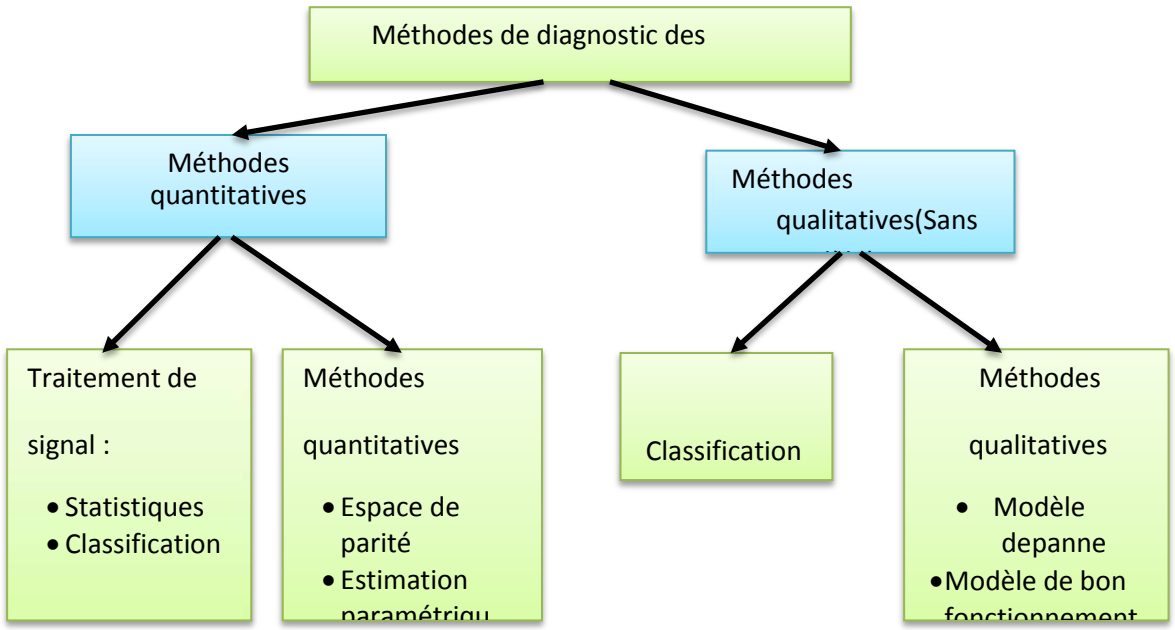


Fig.I.4. *Classification des méthodes de diagnostic des défauts.*

I.5.1 Méthodes qualitatives

I.5.1.1 Diagnostic à base de modèle qualitatif

Il est souvent difficile de développer des modèles mathématiques permettant de représenter la dynamique de système de manière exacte. D'une part, il est plus aisé de manipuler des descriptions générales des systèmes. C'est dans ces contextes que des approches de diagnostic des défauts, basées sur des connaissances sur le système réel, ont été développées. Ces méthodes sont dites qualitatives ou encore heuristiques. L'information heuristique peut être exprimée de plusieurs manières, telles que l'utilisation de termes linguistiques (petit, grand, moyen…) ou les observations de l'opérateur humain ou encore l'arbre de défaillance, qui représente les connexions entre les symptômes et les défautsd'autres approches de méthodes qualitatives ont été proposées telles que l'utilisation des systèmes experts et des chaînes de Markov [8].

I.5.1.2 Méthodes de Classification

Le rôle d'un système de diagnostic est d'identifier le défaut le plus probable qui a engendré l'apparition d'un symptôme. Ce dernier se traduit par la différence entre des dispositifs en fonctionnement et les mêmes dispositifs fonctionnant sans défaillance. Larelation entre les dispositifs et les symptômes passe par une procédure d'apprentissage expérimentale. Elle est sauvegardée de façon à avoir une base de données. Le principe des méthodes de classification est illustré sur la figure (I.5) :

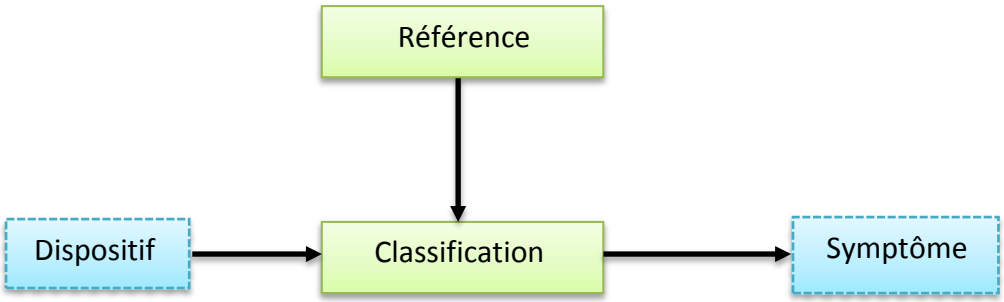


Fig.I.5. *Principe des méthodes de classification.*

Parmi les approches de classification, il est possible de citer : la classification Bayesienne, la classification géométrique, l'approche par logique floue et l'approche à basede réseaux de neurones [8].

I.5.1.3 Méthodes basées sur l'intelligence artificielle

L'intégration des connaissances symboliques et quantitatives, en utilisant un système neuro-flou, constitue un nouvel axe de recherche dans la domaine de la localisation des défauts. De tels systèmes combinent entre l'habilité des réseaux de neurones et représentation explicite de la logique floue, ce qui constitue un avantage considérable pour la résolution du problème FDI, en particulier, pour les systèmes non linéaires [8].

- ✓ **L'avantage principal des méthodes qualitatives:**

  Possibilité de n'utiliser que le modèle qualitatif: aucun besoin de grandeurs numériquesdes paramètres *n*i de connaissances profondes sur la structure du système.

- ✓ **Inconvénients**

Il n'est pas aisé de déterminer les valeurs limites inférieures et supérieures des déviations. D'autre part un problème combinatoire peut apparaître lors des procédures d'inférences pour les systèmes complexes.

I.5.2 Méthodes quantitatives

Les méthodes de diagnostic quantitatives ou à base de modèle mathématique reposent sur la connaissance approfondie du procédé sous la forme d'un modèle numérique représentatif, qui fournit des grandeurs caractéristiques du procédé. Ces dernières sont constamment comparées aux grandeurs issues de procédé réel. Le problème FDI à base de modèle mathématique a attiré l'attention de nombreux chercheurs, tels que Willskey, Isermann,…etc. Les méthodes proposées, dans ce contexte, peuvent être regroupées en trois catégories :

- ➢ Méthodes d'espace de parité.
- ➢ Méthodes d'estimation paramétrique.

- Méthodes à base d'observateurs.

Bien que ces approches soient différentes, leur but est le même ; il consiste à générer un vecteur caractéristique : le résidu, qui est sensiblement nul en absence de défauts et non nul enleur présence. Ainsi, le problème de diagnostic des défauts par ces méthodes peut se reformuler sous la forme d'un problème de génération de résidus. Ces derniers devant justifierde certaines propriétés. C'est ce que l'on retrouve dans la littérature sous le nom de Problème Fondamental de Génération de Résidus '' FPRG '' (Fundamental Problem of Residual Generation) [8].

I.5.2.1 Méthodes des équations de parité

Initialement, les méthodes des équations de parité utilisaient des schémas dits de redondance parallèle. Pour structures, le nombre de mesures est plus grand que le nombre de variables et les résidus sont directement issus de la comparaison de redondantes. Cette approche a été ensuite généralisée pour l'utilisation de la redondance temporelle. Par dualité, cette redondance est également appelée redondance série. Le terme parité a été emprunté au vocabulaire employé par les systèmes logiques ou la génération des bits de parité permet la détection des erreurs.

Dans cette approche, l'ensemble des valeurs que peuvent prendre les résidus compose un espace, dans lequel, le vecteur de parité est défini comme étant la valeur des résidus à un instant donné. Ce vecteur prend alors une direction dans le cas de l'apparition d'un défaut [8].

I.5.2.2 Méthodes d'estimation paramétrique

La détection et la localisation des défauts peuvent être effectuées en utilisant des techniques d'identification, si la structure du modèle est connue. L'idée de base consiste à estimer les paramètres du système en temps réel et de les comparer aux paramètres non affectés par les défauts. On en distingue deux approches [8] :

- Méthodes de l'erreur d'équation.
- Méthodes de l'erreur de sortie.

La procédure de détection de défauts par la méthode d'estimation paramétrique est résumée dans ce qui suit :

1- Modélisation mathématique du procédé.
2- Description des relations entre les constantes physiques supposées connues et paramètres du modèle.
3- Estimation des paramètres du modèle à partir des entrées et sorties du système.
4- Estimation des paramètres du système.
5- La vecteur de résidus est obtenu en faisant la différence entes les grandeurs estimées et les valeurs nominales.

Il existe plusieurs méthodes d'estimation de paramètres, dont il est possible de citer : l'estimation par projection orthogonale, l'estimation Bayesienne, l'estimation au sens du maximum de vraisemblance ou encore l'estimation au sens des moindres carrés.

I.5.2.3 Méthodes de diagnostic à base d'observateurs

Les méthodes de diagnostic des défauts à base d'observateurs sont basées sur le principede génération de résidus en comparant les grandeurs disponibles du système réel aux grandeurs estimées (issues de l'observateur). Cette technique se voit donner une importance grandissante car elle donne lieu à la conception de générateurs de résidus flexibles.

De très nombreux travaux ont été développés concernant la synthèse d'observateurs pour le diagnostic des systèmes physiques. Les travaux de Clark vers la fin des années 70, constituent les premiers pas dans ce domaine [8].

I.5.3 Détection des défauts par traitement de signal

L'analyse d'un signal est une source d'informations. En effet la mesure d'un signal indique des oscillations qui peuvent être harmoniques, de nature stochastique ou les deux simultanément. La variation de ces signaux peut être reliée au défaut Pour extraire les caractéristiques d'un signal relatif à un défaut, généralement, on extrait l'amplitude ou les densités d'amplitude. Il existe toutefois d'autre possibilités qui consistent à déterminer les fonctions d'autocorrélation, les transformées de Fourier ou la densité spectrale [8].

I.6 Critère de performances d'un système de diagnostic

La conception d'un système de diagnostic nécessite la prise en compte d'un certain nombre de critères, qui permettront d'en évaluer les performances. Les principaux critères à prendre en considération sont [8] :

I.6.1 La détectabilité : se traduit par l'aptitude du système de diagnostic à déceler la présence d'un défaut. Ce critère est fortement lié au résidu qui doit être généré de manière à détecter l'apparition du défaut le plus rapidement possible.

I.6.2 L'isolabilité : consiste en l'aptitude du système de diagnostic à pouvoir retrouver quel organe a été affecté par le défaut. Cette notion est liée à la structure du résidu qui doit permettre la discrimination entre les différents défauts afin de retrouver leur origine.

I.6.3 La sensibilité : représente la capacité d'un système de diagnostic à générer des résidus sensibles aux défauts à détecter. Ces défauts sont généralement caractérisés par une certaine amplitude.

I.6.4 La robustesse : qui s'explique par le fait que le système de diagnostic doit être non seulement sensible aux défauts que l'on désire détecter mais aussi insensible aux entrées inconnues (perturbations) et aux entrées de commande. Ceci se traduit par la génération de résidus dits robustes, c.-à-d. sensibles aux défauts tout en rejetant les perturbations et les signaux de commande.

Il existe cependant, d'autre critères qu'il il est nécessaire de prendre en compte en pratique, tels que : la rapidité de détection, le cout les contraintes ergonomiques et économique.

I.7 Performance d'une procédure de diagnostic

L'étape de détection est très importante dans le processus de diagnostic des systèmes. Si cette étape n'est pas correctement réalisée, des défauts peuvent être mal ou pas détectés et que des fausses alarmes peuvent apparaître. L'efficacité de la détection passe aussi par sa robustesse face aux incertitudes du modèle.

Ainsi les performances attendues d'une procédure de détection et d'isolation de défauts reposent sur la définition de critères qualitatifs de la méthode de diagnostic, se décomposant en critères à minimiser tel que le retard à la détection et le taux de fausse alarme et de mauvaise détection et en critères à maximiser tel que la sensibilité à des défauts de faible amplitude et l'insensibilité aux bruits et aux perturbations mais aussi aux incertitude sur les paramètres du modèle [16].

I.8 Les différents types de défauts

Les défauts sont des événements qui apparaissent à différents endroits du système. Dans la littérature, les défauts sont classés en fonction de leur localisation.

Les défauts affectant un système peuvent être de différentes natures et sont généralement classés en défauts actionneurs, défauts capteurs et défauts système. [18].

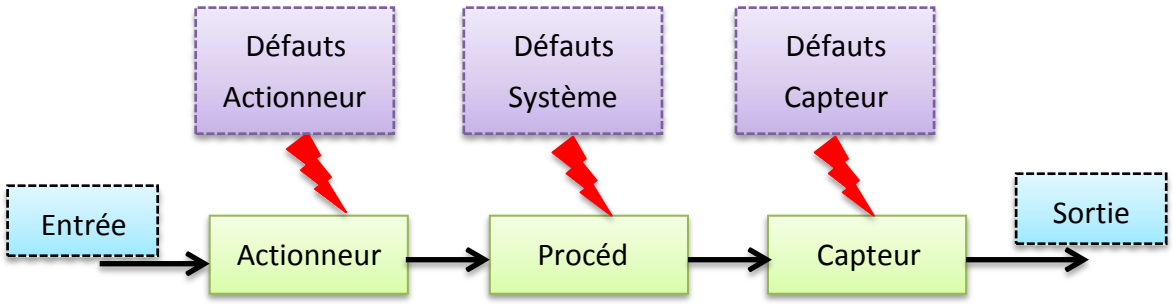


Fig.I.11. *Différents types de défauts agissants sur système.*

I.8.1 Les défauts actionneurs

Les défauts actionneurs agissent au niveau de la partie opérative et détériorent le signal d'entrée du système. Ils représentent une perte totale (défaillance) ou partielle d'un actionneur agissant sur le système. Un exemple de perte totale d'un actionneur est un actionneur qui est resté "collé" sur une position entraînant une incapacité à commander le système par le biais de cet actionneur. Les défauts actionneurs partiels sont des actionneurs réagissant de manière similaire au régime nominal mais en partie seulement, c'est-à-dire avec une certaine

dégradation dans leur action sur le système. (Perte de puissance d'un moteur, fuite dans unvérin,...) [18].

I.8.2 Les défauts capteurs

Ce type de défaut est la cause d'une mauvaise image de l'état physique du système. Un défaut capteur partiel produit un signal avec plus ou moins d'adéquation avec la valeur vraie de la variable à mesurer. Ceci peut se traduire par une réduction de la valeur affichée par rapport à la valeur vraie, ou de la présence d'un biais ou de bruit accru empêchant une bonne lecture. Un défaut capteur totale produit une valeur qui n'est pas en rapport avec la grandeur àmesurer [18].

I.8.3 Les défauts composants ou systèmes

Ce type de défaut provient du système lui-même ; bien souvent les défauts n'appartenant pas à un défaut capteur ou actionneur sont classés de manière arbitraire dans cette catégorie. Néanmoins, un défaut composant résulte de la casse ou de l'altération d'un composant du système réduisant les capacités de celui-ci à effectuer une tâche. En pratique, ceci revient à considérer une modification des caractéristiques du système proprement dit (la CTN: résistance à Coefficient de Température Négatif, d'une chaufferie est cassée, un roulement est altéré,...).

Comme aussi, les défauts peuvent être classés relativement à leurs effets sur les performances du système, dont deux classes de défauts peuvent être distingués [24] :

- **Des défauts additifs :** Ils correspondent à des entrées inconnues agissant sur le système, et les sorties de ce système varie indépendamment des entrées connues.
- **Des défauts multiplicatifs :** Ils correspondent à des modifications des paramètres du modèle représentant le système, ils engendrent des variations des sorties du système dont l'amplitude dépend de la valeur des entrées connues.

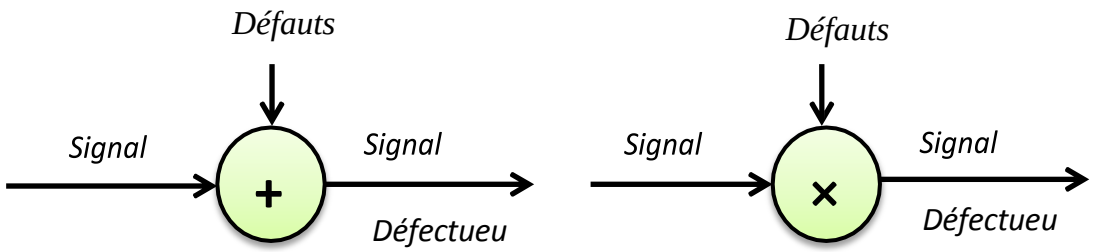


Fig.I.12. *Classification des défauts : additifs et multiplicatifs.*

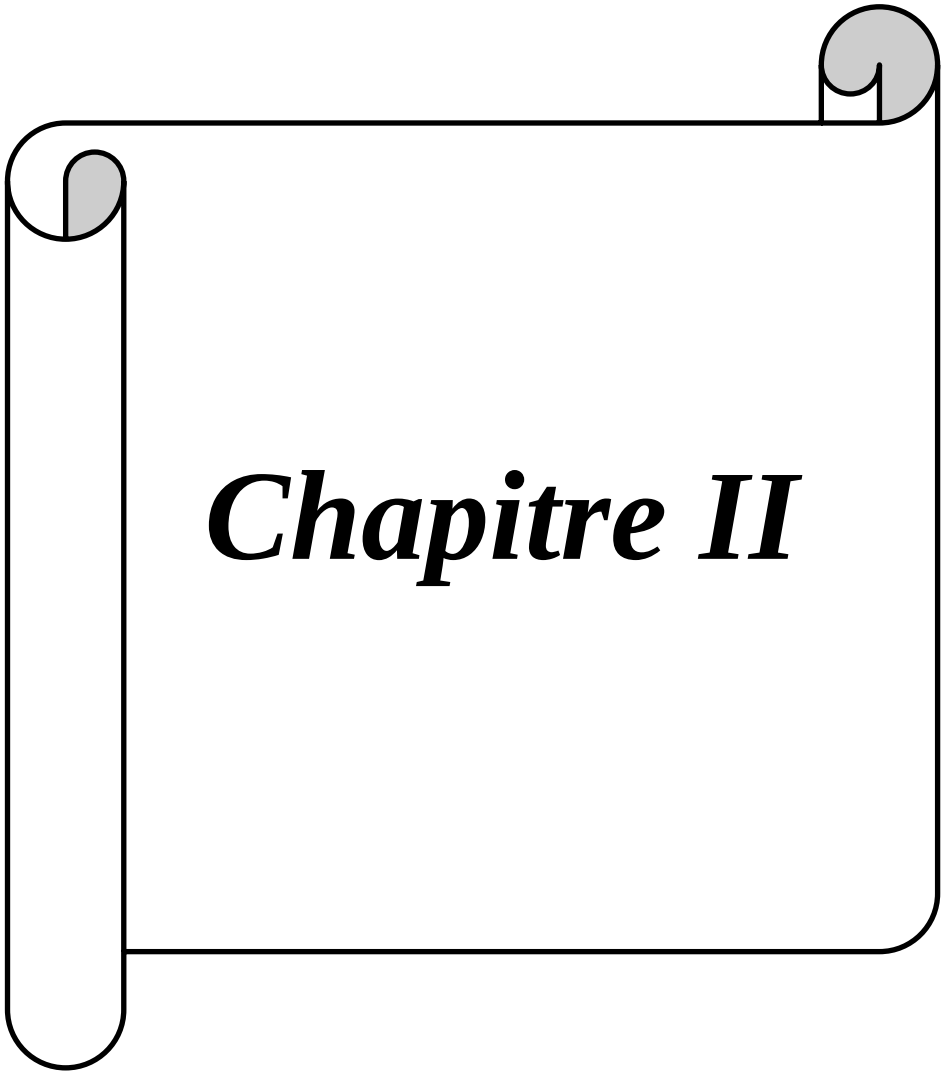
Les défauts sont aussi classés en **défauts additifs** et **défauts multiplicatifs**. Souvent, les défauts multiplicatifs sont transformés en défauts additifs. Soit, par exemple, une défaillance dans un actionneur donné.

Les défauts peuvent être différenciés selon leur forme et leur comportement dans le temps. En générale on distingue trois types [16] :

- ***Défaut abrupt :*** il est caractérisé par une discontinuité de l'évolution temporelle de la variable, il correspond à une panne brutale.
- ***Défaut intermittent :*** Ce défaut est un cas particulier de défaut abrupt avec la propriété particulière que le signal revient de façon aléatoire à sa valeur normale. Ce type dedéfauts caractérise les faux contacts.
- ***Défaut graduel :*** Ce défaut a un comportement temporel lent ce qui le rend difficile à détecter, il caractérise un encrassement ou une usure d'une pièce.

I.9 Conclusion

Ce chapitre a eu pour objectif de présenter une revue de littérature sur le diagnostic des défauts et les différentes méthodes proposées dans ce domaine. Bien qu'il existe dans la littérature plusieurs classifications, nous avons distingué, essentiellement, entre les méthodes analytiques ou quantitatives (estimation d'état, estimation paramétrique, équation de parité) qui sont basées sur l'existence de modèles mathématiques et les méthodes symboliques ou qualitatives (intelligence artificielle, logique floue, réseaux de neurones,…etc.) qui sont utilisées dans le cas où la modélisation mathématique du système serait complexe ou inexistante. Notre intérêt a porté sur l'étude des méthodes à base de modèle mathématique. Nous avons présenté la procédure de détection et l'isolation de défauts par celles-ci. Cette dernière passe par deux étapes essentielles : la génération et l'évaluation du vecteur des résidus.


Chapitre II

I.1 Introduction:

Modélisation de la machine asynchrone triphasée (MAS). Dans un premier lieu, on donnera de manière explicite le modèle mathématique de la machine asynchrone (Equations électriques et mécaniques) dans son référentiel triphasé. Puis, on réduira l'ordre du système par une transformation dite de PARK. Cette transformation modélise la MAS dans un nouveau référentiel, biphasé cette fois. Dans un dernier lieu, on donnera la simulation numérique des différentes grandeurs de la MAS[4].

Dans les pays industrialisés, plus de 60% de l'énergie électrique consommée est transformée en énergie mécanique par des entraînements utilisant les moteurs électriques.Le modèle mathématiqued'une Machine Asynchrone (MAS) nous facilite largement son étude et permet sa commande dansles différents régimes de fonctionnement transitoire ou permanent[5].

La représentation de la machine asynchrone par des équations selon le système triphasé donne un modèle, dont les équations sont à coefficients variables en fonction dutemps [6]. dans le but de faciliter leur résolution, on a recours à une modélisation dite«transformation de Park», qui consiste à transformer le système triphasé en système à deuxaxes orthogonaux. L'élaboration d'une tel e modélisation est indispensable pour l'étude durégime de contrôle du flux, de couple, de régulation de tension et de vitesse[3].

Dans ce chapitre nous nous intéresserons à la modélisation de la machine asynchrone par:

- La mise en équation de la machine asynchrone à partir d'hypothèses simplificatrices.
- La simplification de ces équations par l'introduction de la transformation de Park.
- La mise sous forme d'équation d'état.

I.2 Définition de la machine asynchrone :

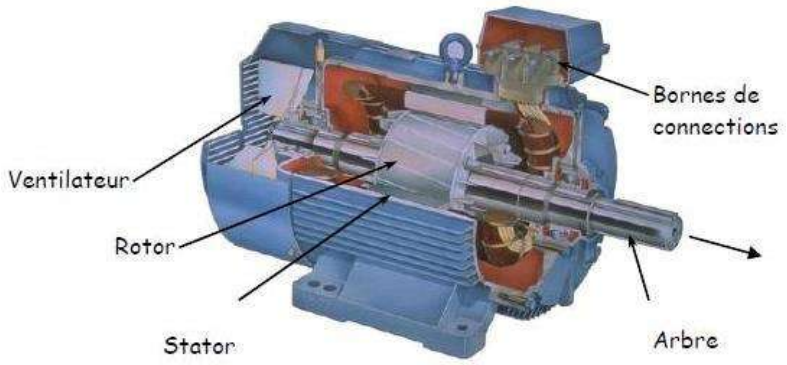
On appelle machine asynchrone toute machine, qui, ayant (2 p) pôles et étant reliée à un réseau defréquence f_s , ne tourne pas exactement à la vitesse asynchrone($60\ f_s/\pi$). On parle généralement de moteurs asynchrones car ces machines sont destinées à fournir de la puissance mécanique à partir duréseau électrique.

Parmi les machines asynchrones, on peut distinguer deux types[7]:

- Les machines d'induction.
- Les machines à collecteur.

Le moteur d'induction est tellement plus utilisé que les autres que lorsqu'on parle de moteur asynchrone on sous-entend d'induction. La machine d'induction est caractérisée par une armature non alimentée (rotor), parcourue par des courants induits par l'autre armature qui est alimentée à partir d'un réseau de fréquence (stator) f_s [8].

I.3Description de la machine asynchrone triphasée :



FigI.1 Constitution de La machine asynchrone

La machine asynchrone comporte une partie fixe constituée d'une carcasse àL'intérieure de laquelle sont logés le circuit magnétique et le bobinage du stator d'unepart, etune partie mobile appelée rotor d'autre part. La carcasse nervurée à ailettes longitudinales est un monobloc en fonte ou en acier [9].

Le principe de fonctionnement du moteur asynchrone est basé sur l'induction descourants dans le bobinage du rotor par un champ tournant dans l'entrefer dû à la circulationdes courants polyphasés dans le stator. Ce champ tournant va créer un couple moteur qui s'exerce sur les conducteurs des courants induits, Il provoque ainsi le démarrage et la rotationdu rotor dans le même sens que le champ tournant[10].

En fonctionnement normal, le rotor de la machine asynchrone tourne à la vitesse de Ω_r exprimée en radians par seconde, et la force magnétomotrice produite par les courants statoriques tourne à la vitesse de synchronisme à Ω_S exprimée en radians par seconde, mais la vitesse $\Omega_r$est généralement inférieure à Ω_S et on a :

$$\Omega_S = \frac{\omega_S}{P} (\mathbf{I-1})$$

Avec :

ω_S : Pulsation statorique , liée à la fréquence du stator.

p : nombre de pair de pôle de la force magnétomotrice résultante.

Le rotor est constitué de manière à obtenir trois enroulements ayant un nombre de pôles identique à celui du stator. Les enroulements rotoriques sont en court circuit, la vitesse de rotation du rotor est inférieure à Ω_S , et on note :[11]

g: Glissement de la vitesse de rotation par apport à celle du champ tournant statorique

$$g = \frac{\Omega_S - \Omega}{\Omega_S} (\mathbf{I} - 2)$$

I-4Avantages et inconvénients la machine asynchrone :

Le moteur asynchrone est le moteur électrique le plus utilisé dans l'industrie; il est peucoûteux, on lefabrique en grande sérié, il est robuste, fiable et économique.

Il fonctionne directement sur le secteur alternatif, sans transformations préalables del'énergie électrique qui l'alimente, c'est le moteur industriel par excellence qui ne possède pasd'organes délicats comme le collecteur du moteur à courant continu et qui n'utilise pas decontacts glissants comme le moteur synchrone (pour l'excitation du rotor).

Les courants qui circulent dans le stator, constituent l'unique source externe du champmagnétiq ue. Sa vitesse varie un peu quand on le charge, on dit qu'il glisse, mais ce glissementest en générale ne dépasse pas quelques centièmes de la vitesse à vide, il est négligeable leplus souvent.Le démarrage desmoteurs asynchrones ne pose pas de problèmes pour les unités de petite puissance. Par contre, pour les moteurs de forte puissance, il faut démarrer soustension réduite pour éviter un appel de courant trop élevé.

Par contre dans le moteur asynchrone les courants statoriques sont à la fois à générer leflux et le couple. Le découplage naturel de la machine à courant continu n'existe pas. D'autrepart on ne peut connaître les variables internes du rotor à cage qu'à travers le stator.

L'inaccessibilité du rotor nous amènera à modifier l'équation vectorielle rotorique pourexprimer les grandeurs rotoriques à travers leurs actions sur le stator. La simplicitéstructurelle cache donc une grande complexité fonctionnelle due aux caractéristiques quiviennent d'être évoquées mais également aux non linéarités, à la difficulté d'identification etaux variations des paramètres (Rr en particulier) [12].

I•5 Modélisation de la machine asynchrone:

I-5•1 Hypothèse simplificatrices :

La modélisation de la machine asynchrone s'appuie sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, qui sont:

- Les circuits magnétiques sont symétriques.
- La répartition de l'induction dans l'entrefer est sinusoïdale.
- L'entrefer est constant.
- On néglige les phénomènes de saturation, ce qui permet de considérer le flux magnétique comme fonction linéaire des courants .
- L'effet de l'encochage est négligeable .

- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas prise en compte.

Ainsi, parmi les conséquences importantes des ces hypothèses, on peut citer :

- L'additivité du flux.
- La constance des inductances propres.
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques etrotoriques en fonction de l'angle électrique entre leurs axes magnétiques.

I.5.2 Modélisation de la MAS dans le plan triphasé abc :

Soit une machine asynchrone triphasée au stator et au rotor représentée schématiquement par la figure I.2 et dont les phases sont repérées respectivement par SA, SB, SC. L'angle électrique θ variableen fonction du temps définit la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phases SA et Ra choisis comme axes de référence [9].

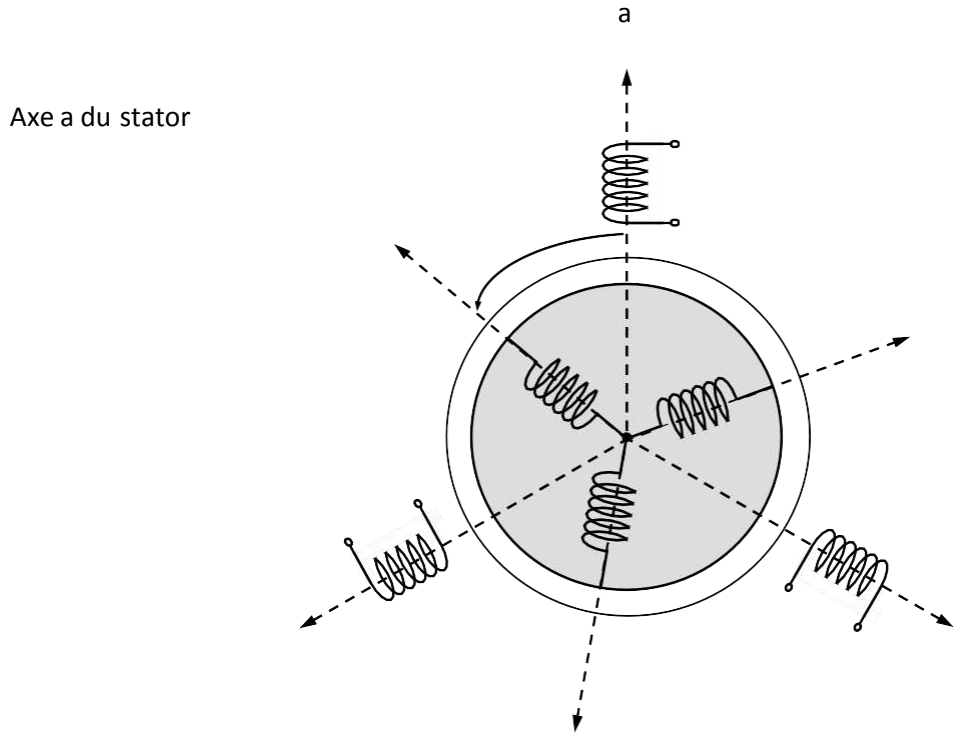


Fig I.2 Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée.

I.5.3 Équations générales de la machine asynchrone triphasée :

Dans ces conditions, si on considère que le moteur à induction est triphasé au stator et au rotor. Lestrois types d'équations traduisant le comportement du moteur sont[13]

a-Equations électriques :

es équations de tension des trois phases statoriques et des trois phases rotoriquesSont:

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s i_{sa} + \dfrac{d}{dt}\Phi_{sa} \\ V_{sb} = R_s i_{sb} + \dfrac{d}{dt}\Phi_{sb} \\ V_{sc} = R_s i_{sc} + \dfrac{d}{dt}\Phi_{sc} \end{cases} (\mathbf{I}-3)$$

$$\begin{cases} V_{ra} = R_r i_{ra} + \dfrac{d}{dt}\Phi_{ra} \\ V_{rb} = R_r i_{rb} + \dfrac{d}{dt}\Phi_{rb} \\ V_{rc} = R_r i_{rc} + \dfrac{d}{dt}\Phi_{rc} \end{cases} (\mathbf{I}-\mathbf{4})$$

En désignant par:

Vsa, Vsb, Vsc : Tensions appliquées aux trois phases statoriques. isa, isb, isc : Courants qui traversent les trois phases statoriques.$\Phi sa, \Phi sb, \Phi sc$: Flux totaux à travers ces enroulements.

Vsa, Vsb, Vsc:Tensions rotoriquesisa, isb, isc: Courants rotoriques $\Phi sa, \Phi sb, \Phi sc$: Flux rotoriques

R_S : Résistanced'unephasestatorique.R_r: Résistanced'unephaserotorique

Les équations $(I \bullet 2)$ et $(I \bullet 3)$ peuvent être écrites sous la forme matricielle suivante:

Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \text{ (I-5)}$$

Ou sous la forme condensée comme suit :

$$\left[V_{s(abc)}\right] = [R_s]\left[i_{s(abc)}\right] + \frac{d}{dt}\left[\Phi_{s(abc)}\right] (\mathbf{I-6})$$

Pour le rotor:

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{\mathrm{ra}} \\ \Phi_{\mathrm{rb}} \\ \Phi_{\mathrm{rc}} \end{bmatrix} (\mathbf{I-7})$$

Ou sous la forme condensée comme suit :

$$\left[V_{r(abc)}\right] = [R_r]\left[i_{r(abc)}\right] + \frac{d}{dt}\left[\Phi_{r(abc)}\right]_{(\mathrm{I-8})}$$

b-Equation magnétiques :

Les hypothèses simplificatrices citées antérieurement conduisent à des relations linéaires entre les flux et les courants de la machine asynchrone,ces relations s'écrivent matricielle ment comme suit : [14]

Pour le stator:

$$\begin{bmatrix}\Phi_{sa}\\ \Phi_{sb}\\ \Phi_{sc}\end{bmatrix} = [L_s]\begin{bmatrix}i_{sa}\\ i_{sb}\\ i_{sc}\end{bmatrix} + [M_{sr}]\begin{bmatrix}i_{ra}\\ i_{rb}\\ i_{rc}\end{bmatrix} \text{ (I-9)}$$

Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix}\Phi_{ra}\\ \Phi_{rb}\\ \Phi_{rc}\end{bmatrix} = [L_r]\begin{bmatrix}i_{ra}\\ i_{rb}\\ i_{rc}\end{bmatrix} + [M_{sr}]\begin{bmatrix}i_{sa}\\ i_{sb}\\ i_{sc}\end{bmatrix} \text{ (I-10)}$$

Telque:

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

On désigne par:

[] : Matrice des inductances statoriques.

$[L_r]$: Matrice des inductances rotoriques.

$[M_{sr}]$: Matrice des inductances mutuelles statoriques.

[]: Matrice des inductancesmutuelles rotoriques.

Où :

$$[L_s] = \begin{bmatrix}l_s M_s M_s\\ M_s l_s M_s\\ M_s M_s l_s\end{bmatrix} \text{ (I-11)}$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix}l_r M_r M_r\\ M_r l_r M_r\\ M_r M_r l_r\end{bmatrix} (\mathrm{I} - \mathbf{12})$$

Ainsi :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M_0\begin{bmatrix}\cos(\theta)\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\cos(\theta)\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\cos(\theta)\end{bmatrix} \text{ (I-13)}$$

Avec :

l_s : Inductance propre d'une phase statorique.

l_r : Inductance propre d'une phase rotorique.

M_s: Inductance mutuelle entre phases statoriques.M_r : Inductance mutuelle entre phases rotoriques.

θ: Angle électrique définit la position relative instantanée entre les axes statoriques et les axes rotoriques qui sont choisi comme axes des références.M : Maximum de l'inductance mutuelle entre phase du statoret la phase Correspondent du rotor

c-Equations mécaniques :

L'étude des caractéristiques de la machine asynchrone fait introduire du variation non seulement des paramètres électriques (tension, courant, flux) mais aussi des paramètres mécaniques (couple, vitesse) [15] :

$$C_e = P\left[i_{s(abc)}\right]^T \frac{d}{dt}[\mathrm{M}_{sr}]\left[i_{r(abc)}\right] \quad (\mathrm{I}-14)$$

Pour avoir un modèle complet de la machine il nécessite d'introduire l'équation du mouvemente dela machine est exprimée comme suivant :

$$J\frac{d}{dt}\Omega_r = C_e - C_r - f\Omega_r \quad (\mathbf{I}-\mathbf{15})$$

Avec :

J : Moment d'inertie des masses tournantes.

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

Ω_r: Vitesse rotorique.

C_e: Couple électromagnétique.

f : Coefficient de frottement visqueux.

Les équations (I.4) ainsi obtenus sont à coefficients variables entraînant la complexitéde résolution du modèle défini par (I.3). Cela conduira à l'usage de latransformation de Parkqui permettra de rendre constant ces paramètres.

I-6 Transformation de Park :

Latransformation de Park a pour but de traiter une large gamme de machines de façon unifiée en le ramenant à un modèle unique, Cette conversion est appelée souvent transformation des axes, fait correspondant aux deux enroulements de la machine originale suivie d'une rotation, les enroulements

équivalents du point de vue électrique et magnétique.Cette transformation ainsi, pour l'objectif de rendre les inductances mutuelles du modèle indépendantes de l'angle de rotation [16].

I-6.1Différents repères :

L'isotropie du moteur asynchrone permet une grande souplesse dans la composition des équations de la machine selon deux axes à l'aide des composantes de Park, cela nécessite l'utilisation d'un repère qui permet de simplifier au maximum les expressions analytiques. Il existe différentes possibilités pour le choix du repère d'axes, se ramène pratiquement à trois référentiels (systèmes biphasés) orthogonaux[10]:

Où :

1) Référentiel immobile par rapport au stator : $(\alpha - \beta) \rightarrow \omega_{obs} = 0$.
2) Référentiel immobile par rapport au rotor: $(x - y) \Rightarrow \omega_{obs} = \omega_R$
3) Référentiel immobile par rapport au champ tournant : $(d - q) \rightarrow \omega_{obs} = \omega_S$

ω_{obs} : Vitesse angulaire de rotation du système d'axes biphasé par rapport ausystème d'axestriphasé.

6.2 Modélisation de la MAS dans le plan biphasé dq:

Du fait de l'existence des termes trigonométriques continus dans la matrice des inductances mutuelles [Msr], les coefficients des équations différentielles sont variables et la résolution analytique du système se heurte à des difficultés pratiquement insurmontables Pour obtenir un système d'équations à coefficients constants, on transforme les enroulements statoriques et rotoriques en deux enroulements biphasés orthogonaux dq selon la transformation de PARK. La conversion implique la transformation des enroulements équivalents du point de vue électrique et magnétique. La figure (I-3) représente la transformation des enroulements réels abc en enroulements orthogonaux d-q [13].

- Direct selon l'axe (d).
- Quadrature (transversal) selon l'axe (q).
- Homopolaire (o).

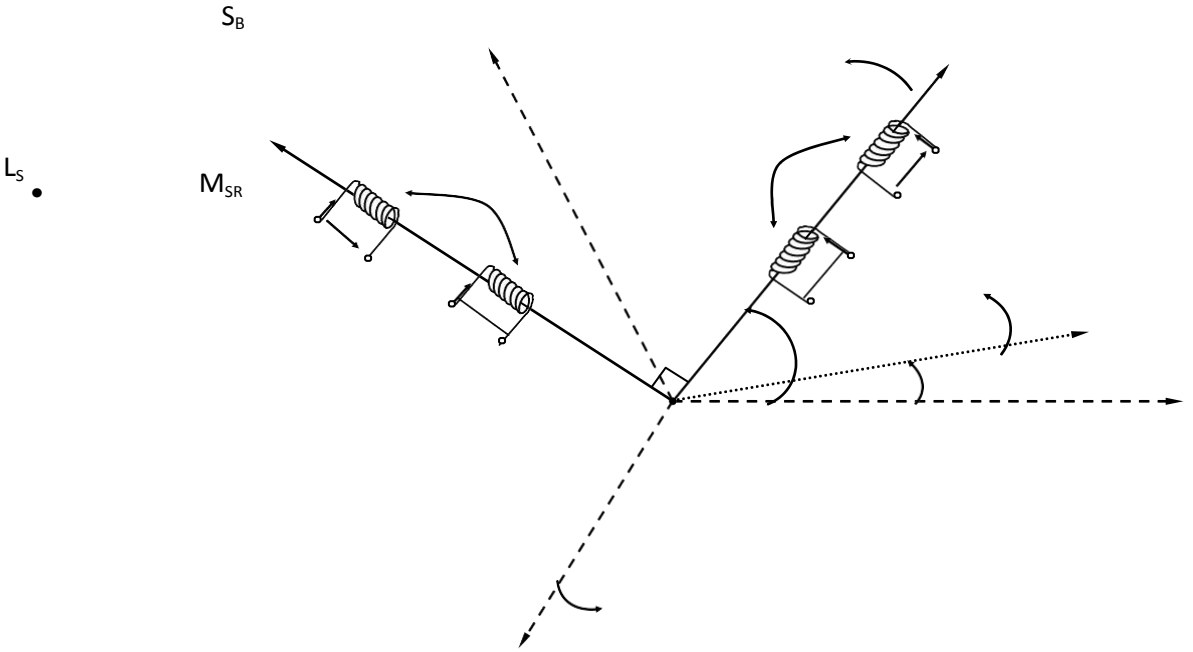


Fig I.3Référentiel tournant d'axes (d– q).

Où :

$\theta_{obs} = \int \omega_{obs} dt$: est une position quelconque d'observation entre les systèmes d'axes biphasé par rapport au système d'axes triphasé.

La application de la transformation de Park à la machine asynchrone correspond à une transformation des trios bobine (statorique et rotorique) à deux bobine équivalente reprenant les mémés considération ou aspects en terme, de flux, de couple, de courant ou du mois une image qui leur sera parfaitement proportionnelle[3].

Pour le passage du système triphasé vers le systèmebiphasé, on a les équivalents suivants[5] :

- L'équivalent de tension :$[V_{dq0}] = [P(\theta_{obs})][V_{abc}]$
- L'équivalent de courant :$[i_{dq0}] = [P(\theta_{obs})][i_{abc}]$**(I-16)**
- L'équivalent de flux :$[\Phi_{dq0}] = [P(\theta_{obs})][\Phi_{abc}]$

Ou :

$[()]$ **:**est la matrice de Park Dans le cas d'un passage inverse, on a :

$$\begin{cases} [\boldsymbol{V_{abc}}] = [P(\theta_{obs})]^{-1}[\boldsymbol{V_{dq0}}] \\ [\boldsymbol{i_{abc}}] = [P(\theta_{obs})]^{-1}[\boldsymbol{i_{dq0}}] \\ [\Phi_{abc}] = [P(\theta_{obs})]^{-1}[\Phi_{dq0}] \end{cases} (\mathbf{I-17})$$

$$[P(\theta_{obs})]^T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{obs}) & -\sin\left(\theta_{obs} - \frac{2\pi}{3}\right)\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta_{obs} - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_{obs} - \frac{2\pi}{3}\right)\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta_{obs} + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_{obs} + \frac{2\pi}{3}\right)\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \text{(I-19)}$$

Le facteur $(\sqrt{\frac{2}{3}})$: est là pour conserver la puissance électrique instantanée[14].

Lorsque l'angleθ_{obs} est attribué à la valeur zéro, la transformation de Park est diteTransformation de Clarke et la matrice de passage s'écrit comme suit:

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

L'application de la transformation de Park aux modèles matriciels électriques, (I-3)et (I-4), etmagnétiques, (I-5), (I-6), permet d'obtenir les équations suivantes:

I-6.3Equation électrique[17] :

a-Equations des tensions :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s \\ \omega_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{sq} \\ \Phi_{sd} \end{bmatrix} \text{ (I-21)}$$

$$\begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -(\omega_s - \omega_r) \\ (\omega_s - \omega_r) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{rq} \\ \Phi_{rd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{(I-22)}$$

b -Equation magnétique :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \mathbf{(I-23)}$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \mathbf{(I-24)}$$

Avec:

$L_s = l_s - M, L_r = l_r - M$; Inductance cyclique propre du stator et du rotor respectivement.

$$M = \frac{3}{2} M_0$$

c-Equation mécanique :

Le couple électromécanique représenté dans l'équation (I-9) devient :

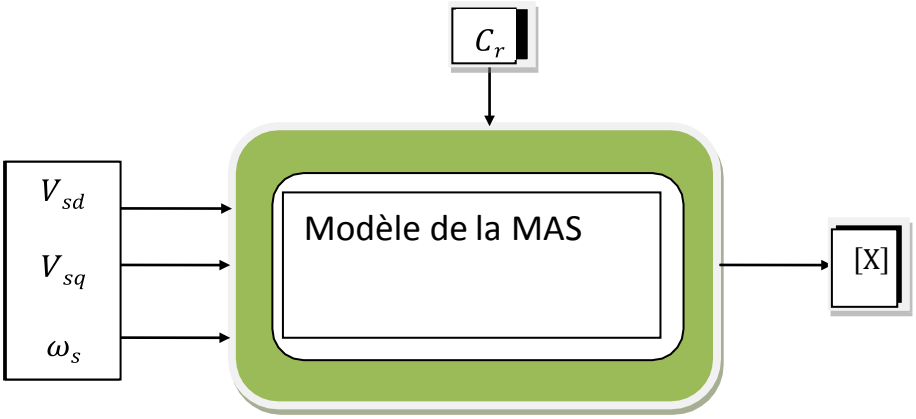
$$C_{em} = p \frac{M}{L_r} \left(\Phi_{rd} i_{sd} - \Phi_{rq} i_{sq} \right)$$

L'équation de la vitesse mécanique est représentée par l'équation (I-10)

$$J \frac{d}{dt} \Omega_r = C_{em} - C_r - f \Omega_r$$

I-7 la machine asynchrone alimentée en tension[18] :

Pour une machine asynchrone alimentée en tension, si on considère le courant statoriquei$_S$ et le flux rotoriqueΦ_R comme variables d'état, et la pulsation $\boldsymbol{\omega_s}$ et les tensions $\mathbf{V_{Sd}}$, $\mathbf{V_{Sq}}$, comme grandeur de commande et le couple $\mathbf{C_r}$comme une perturbation, on aura le schéma bloc suivant, « Fig. I-4 ».



FigI.4 Schéma bloc de la machine asynchrone alimentée en tension.

Le vecteur de sortie[X], peut avoir une des formes des différentes expressions :

$$[\boldsymbol{X}] = \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \mathbf{Ou} [\boldsymbol{X}] = \begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} \text{ ou } [\boldsymbol{X}] = \begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \text{ ou } [\boldsymbol{X}] = \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix}$$

I-8Représentation d'état du modèle de la MAS[18]:

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

$[\dot{X}] = [A][X] + [B][U](\mathbf{I-25})$

Avec :

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

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

[A] : Matrice évaluation d'état du système

[B] : Matrice du système de command

$$\begin{cases} \dfrac{di_{s\alpha}}{dt} = -\left(\dfrac{R_t}{L_s\sigma}\right) i_{s\alpha} + \dfrac{1-\sigma}{MT_s\sigma}\Phi_{r\alpha} + \dfrac{1-\sigma}{M\sigma}\omega\Phi_{r\beta} + \dfrac{1-\sigma}{L_s\sigma}V_{s\alpha} \\ \dfrac{di_{s\beta}}{dt} = -\left(\dfrac{R_t}{L_s\sigma}\right) i_{s\beta} + \dfrac{1-\sigma}{MT_s\sigma}\Phi_{s\alpha} + \dfrac{1-\sigma}{M\sigma}\omega\Phi_{r\beta} + \dfrac{1-\sigma}{L_s\sigma}V_{s\beta} \\ \dfrac{d\Phi_{r\alpha}}{dt} = \dfrac{M}{T_r} i_{s\alpha} - \dfrac{1}{T_r}\Phi_{r\alpha} - \omega\Phi_{r\beta} \\ \dfrac{d\Phi_{r\beta}}{dt} = -\dfrac{M}{T_r} i_{s\beta} + \omega\Phi_{r\alpha} - \dfrac{1}{T_r}\Phi_{r\beta} \end{cases}$$

Avec :

$T_s = \frac{L_s}{R_s}$ et $T_r = \frac{L_r}{R_r}$: constante de tempe statorique et rotorique

$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$: Coefficient de dispersion

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{R_t}{L_s\sigma} & 0 & \frac{1-\sigma}{MT_s\sigma} & -\frac{1-\sigma}{M\sigma}\omega \\ 0 & -\frac{R_t}{L_s\sigma} & -\frac{1-\sigma}{M\sigma}\omega & \frac{1-\sigma}{MT_s\sigma} \\ \frac{M}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & \omega \\ 0 & \frac{M}{T_r} & -\omega & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \quad \text{(I-27)}$$

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

Pour le référentielle lié au champ tournant (d,q), la matrice [A] devient

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{R_t}{L_s\sigma} & \omega_s & \frac{1-\sigma}{MT_s\sigma} & -\frac{1-\sigma}{M\sigma}\omega \\ -\omega_s & -\frac{R_t}{L_s\sigma} & -\frac{1-\sigma}{M\sigma}\omega & \frac{1-\sigma}{MT_s\sigma} \\ \frac{M}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r}(\omega_s - \omega) & \\ 0 & \frac{M}{T_r}(\omega_s - \omega) & & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \quad \text{(I-29)}$$

Le couple électromagnétique développé par la machine asynchrone donné par la relation suivante :

$$C_e = \frac{PM}{L_r}\left(\Phi_{r\alpha} i_{s\beta} - \Phi_{r\beta} i_{s\alpha}\right) \mathbf{(I-30)}$$

Magnétique.

I- 9 Simulation du modèle de la machine asynchrone :

La machine asynchrone est normalement alimentée directement à partir du réseauindustriel par un système de tensions triphasées équilibrées.

Dans certaines applications pour les quelles la variation de la vitesse est nécessaire, lemoteur sera alimenté par un système de tensions triphasées ou par un système de courantstriphasés (injectés) dans les enroulements du stator, par l'intermédiaire d'un convertisseurélectronique de puissance placé entre le moteur et le réseau industriel électrique[19].

La figure (I.5) représente le schéma bloc du modèle obtenu, ce dernier sera simulé àl'aide du logiciel SIMULINK sous MATLAB. Les paramètre de la MAS utilisée dans ce travail sont donnés enAnnexe.

La simulation sera faite dans les deux référentielles (d,q) et (α,β).pour un essai encharge nominale après un démarrage à vide.

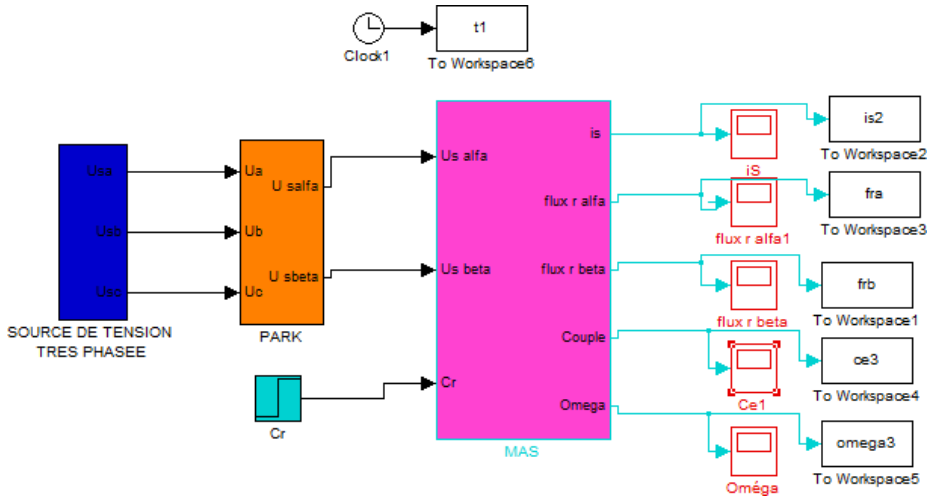
Les tensions d'alimentation ont supposées parfaitement sinusoïdales d'amplitudeségales et constantes, elles peuvent présentées comme suite :

$$\begin{cases} V_{sa} = \sqrt{2} V_S \sin(\omega_s t) \\ V_{sb} = \sqrt{2} V_S \sin\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{2}\right) \\ V_{sc} = \sqrt{2} V_S \sin\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{2}\right) \end{cases} \mathbf{(I-31)}$$

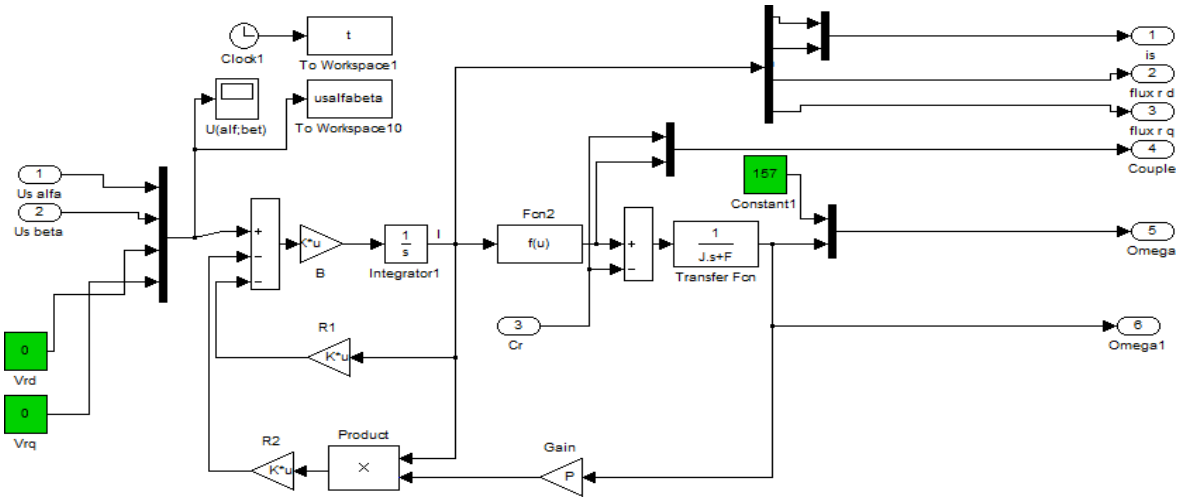
Avec :

V_S : Valeur efficace de tension

ω_s : Pulsation d'alimentation



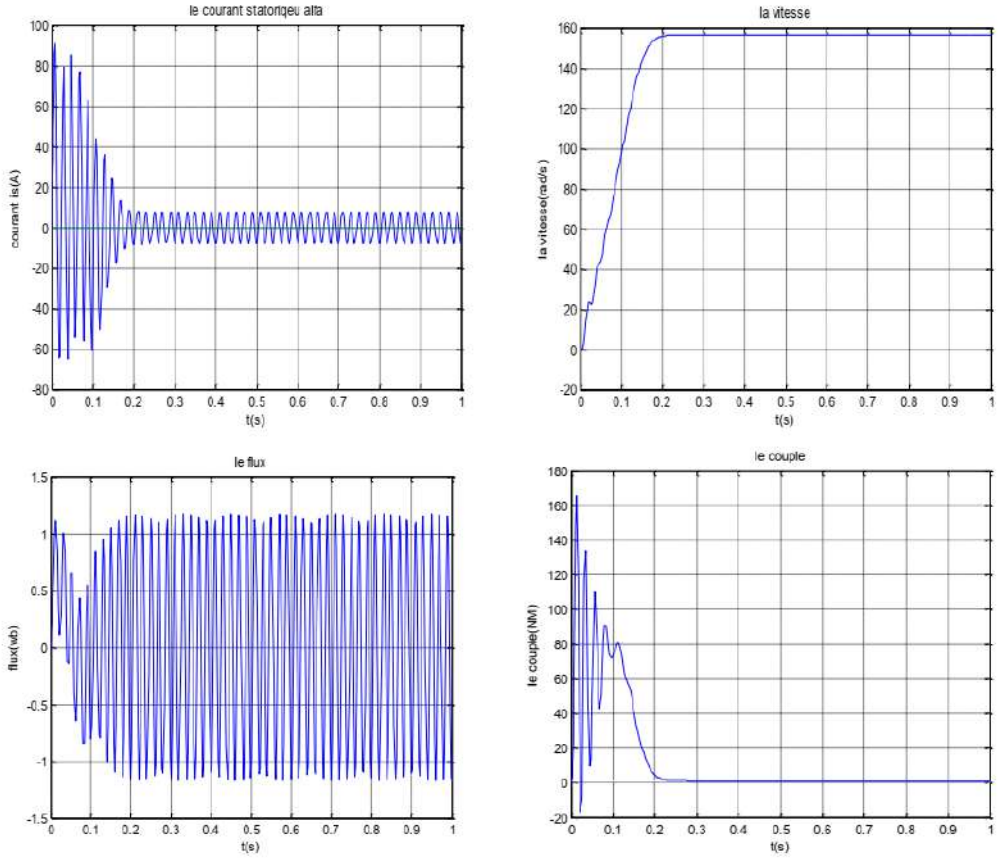
FigI.5 Schéma de simulation de la MAS.



FigI.6 schéma bloc du modèle de la machine asynchrone

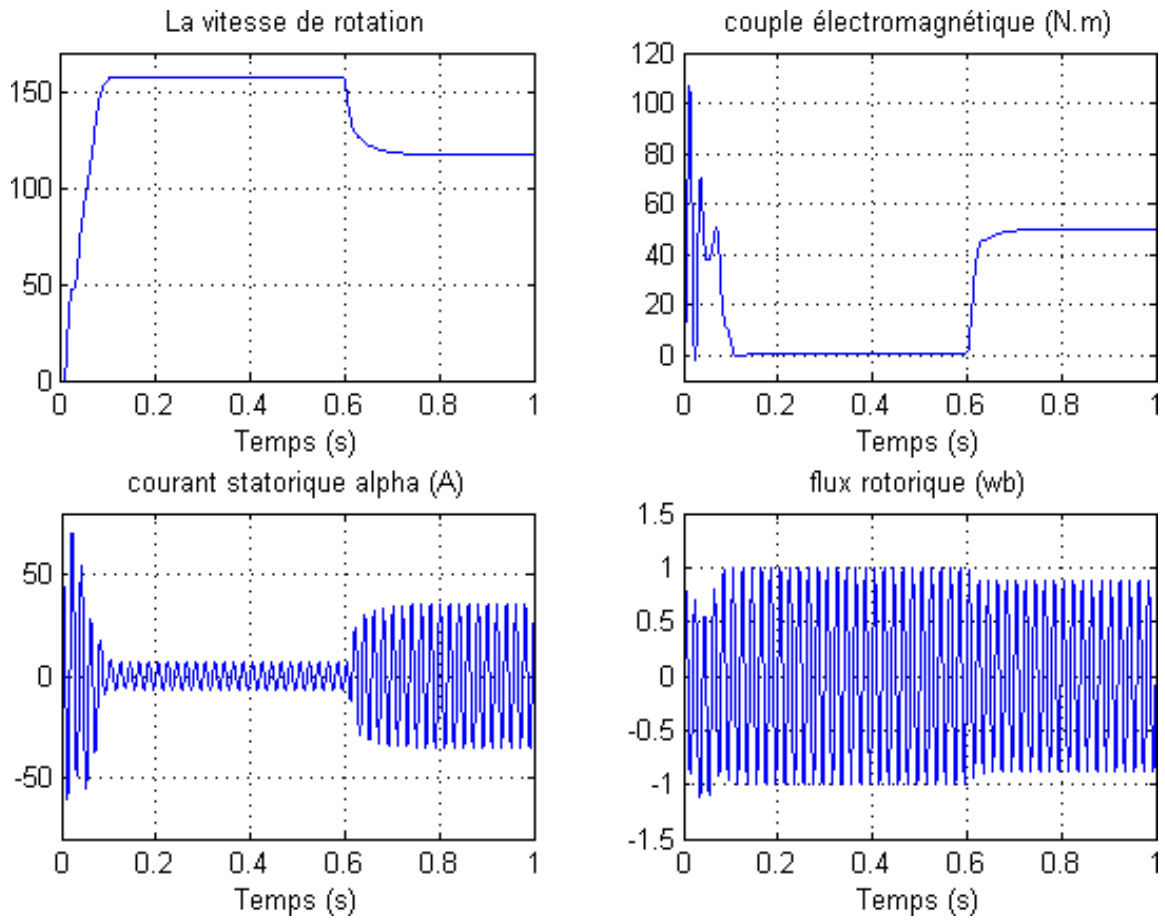
I.9.1 Résultats de la simulation :

- Démarrage à vide :



FigI.7 Résultats de simulation du modèle en tension de la MAS lorsde démarrage à vide

- En charge :(Cr=20 N.m)



FigI.8 Résultats de simulation du modèle en tension de laMAS en charge

I•9-2 Interprétation des résultats de simulation :

Notons que les paramètres de la machine sont donnés dans l'annexe (A).En première étape on va simuler numériquement le fonctionnement de la machine asynchrone alimenté directement par le réseau standard 220/380V, 50HZ et sans l'application de perturbation (C_r= 0).

L'examen des courbesde la figure (I.7) permet de constater que le démarrage à vide avec une tension nominale permet d'avoir:

Aux premiers instants, les courants statoriquesprésentes des oscillations successives autour de zéro, mais qui disparaissent rapidement au bout de quelques alternances , le régime

permanent est atteint, ces oscillations peut être à l'originede la destruction de la machine par échauffement en cas de répétitions excessives.

Pendant le régime transitoire, le couple est fortement pulsatoire, présentes aux premier instants de démarragedes battements importants suivi d'un nombre d'oscillations avant de se stabiliser à zéro.

Endeuxième étape, une perturbation du couple (Cr=20N.m) est appliquée à l'arbre du moteur à l'instants (t=0.6s) et les résultats de simulation sont regroupés dans la figure (I.8):

Lors de l'application de la charge, le couple électromagnétique rejoit sa valeur de référence pour compenser cette sollicitation avec une réponse quasiment instantanée.

Avant de se stabiliser à la valeur de couple résistant, on constate une décroissance de vitesse rotorique qui se traduit par le glissement très fort. Les courants statoriques évoluant selon la charge appliquée à l'arbre du moteur

Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons fait la modélisation de la machine asynchrone cette modélisation basée sur la théorie de Park, l'intérêt primordial de cette


Chapitre III

Introduction

On pourrait dire que la logique floue, Constitue Une approche qui, tout compte fait, n'est pas nouvelle. Son développement se Fait à travers les méthodes par lesquelles l'homme essaye de copier la nature et de reproduire des modes de raisonnement et de comportement qui lui sont propres. Bien que cette approche paraisse "naturelle", et si elle s'est imposée dans des domaines allant du traitement de l'image à la gestion financière, elles commencent à peine à être utilisées dans les domaines de l'électrotechnique et de l'industrie afin de résoudre les problèmes d'identification, de régulation de processus, d'optimisation, de classification, de détection de défauts ou de prise de décision.

Considérant que la machine asynchrone à cage et le convertisseur statique associé posent des problèmes difficiles à étudier pour sa commande, nous nous proposons d'analyser ce que la méthode décrite peut apporter comme solution à cette commande. Il est évidemment impossible de cerner toutes les possibilités et les combinaisons où elles peuvent intervenir dans un tel processus. Nous examinerons plus précisément la régulation ainsi que son optimisation.

Il nous apparaît nécessaire de commencer par présenter cette méthode puis d'expliciter les manières les plus simples de la mettre en œuvre. Plutôt que développer des méthodes trop générales, nous cadrerons notre travail de façon à répondre à l'objectif fixé ici, la détection et la localisation des défauts de la machine asynchrone, et d'analyser les avantages et les inconvénients liés à cette méthode.

2 1. Principe et définitions

La logique floue repose sur la théorie des ensembles flous développée par Zadeh. A côté d'un formalisme mathématique fort développé, nous préférons aborder la présentation de manière intuitive. Les notions de température moyenne ou de courant faible sont relativement difficiles à spécifier de manière précise. On peut fixer des seuils et considérer que l'on attribue tel ou tel qualificatif en fonction de la valeur de la variable par rapport à ces seuils. Ceci ne peut exprimer qu'un avis très tranché du qualificatif "température moyenne" par exemple. L'aspect "vague" de ce qualificatif n'est pas représenté (figure 1.1).

On peut définir le degré d'appartenance de la variable température à l'ensemble "faible" comme le "degré de vérité" de la proposition "la température est faible".

En logique booléenne, le degré d'appartenance (μ) ne peut prendre que deux valeurs (0 ou 1). La température peut être :

- faible : μ_{faible} 1)(T = ,0)(,$\mu_{moyenne}$ T = $\mu_{élevée}$ 0)(T =
- moyenne : μ_{faible} 0)(T = ,1)(,$\mu_{moyenne}$ T = $\mu_{élevée}$ 0)(T =
- élevée : μ_{faible} 0)(T = ,0)(,$\mu_{moyenne}$ T = $\mu_{élevée}$ 1)(T = Elle ne peut pas prendre deux qualificatifs à la fois.

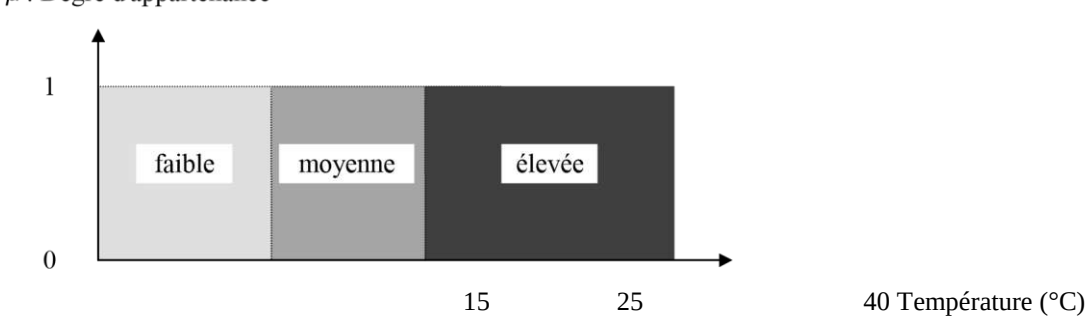


Figure 1.1 Exemple d'ensembles considérés en logique booléenne

En logique floue, le degré d'appartenance devient une fonction qui peut prendre une valeur réelle comprise entre 0 et 1 inclus.

$\mu_{moyenne}(T)$, par exemple, permet de quantifier le fait que la température puisse être considérée comme moyenne.

Dans ce cas, la température peut être considérée, à la fois, comme faible avec un degré d'appartenance de 0,2 et comme moyenne avec un degré d'appartenance de 0,8 (figure 1.2). $\mu_{faible}(T) = 0{,}2$, $\mu_{moyenne}(T) = 0{,}8$, $\mu_{élevée}(T) = 0$

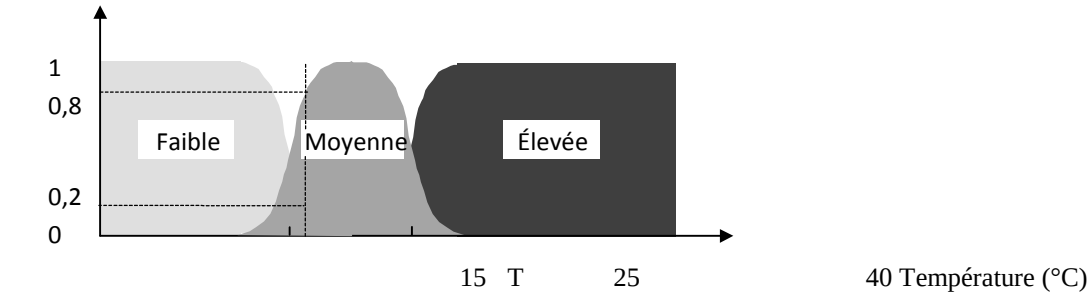


Figure 1.2 Exemple d'ensembles considérés en logique floue

Pour la variable floue *x*, on définit un ensemble flou *A* sur un univers de discours *X* par une fonction degré d'appartenance :

$$\mu_A : X \rightarrow [0,1]$$

$$x \mapsto \mu_A(x) \qquad (1.1)$$

L'univers de discours est l'ensemble des valeurs réelles que peut prendre la variable floue *x* et $\mu_A(x)$est le degré d'appartenance de l'élément *x* à l'ensemble flou *A* (figure 1.3).

Plus généralement, le domaine de définition de $\mu_A(x)$ peut être réduit à un sous-ensemble de *X* [ZAD 65]. On peut ainsi avoir plusieurs fonctions d'appartenance, chacune caractérisant un sous-ensemble flou. C'est par l'association de tous les sous-ensembles flous de l'univers de discours, que l'on obtient l'ensemble flou de la variable floue *x* [MAM 75]. Par abus de langage, les sous-ensembles flous sont fort souvent confondus avec l'ensemble flou.

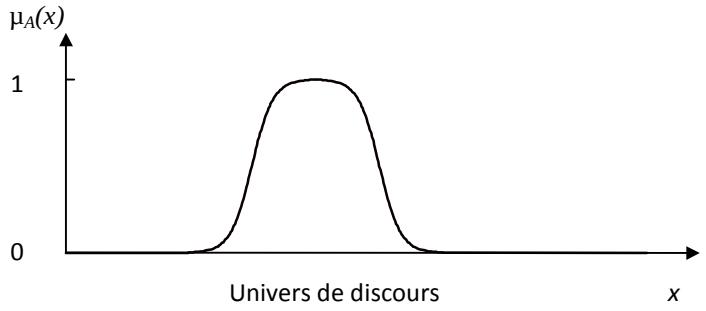


Figure 1.3 Représentation d'un ensemble flou par sa fonction d'appartenance

Dans notre exemple, la variable floue est la température, l'univers de discours est l'ensemble des réels de l'intervalle [0, 40]. On attribue à ces variables trois sous-ensembles flous : faible, moyenne et élevée. Chacun est caractérisé par sa fonction degré d'appartenance :

$\mu_{faible}(T)$, $\mu_{moyenne}(T)$ et $\mu_{élevée}(T)$.

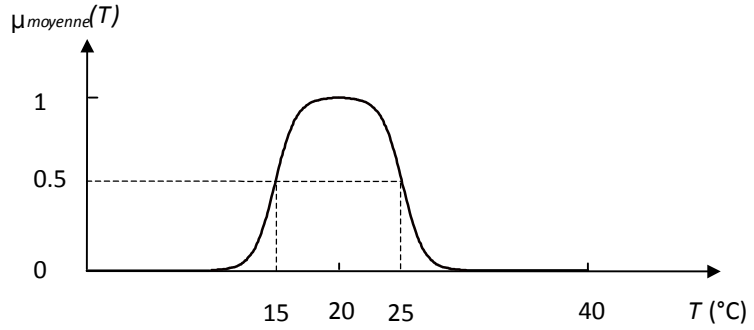


Figure 1.4 Cas de l'ensemble flou "moyenne" de la variable Température

On peut définir la fonction degré d'appartenance $\mu_{moyenne}$ sur tout l'univers de discours :

2
$$\mu(\boldsymbol{x}) = \begin{cases} \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{1}+e^{\mathbf{15}-\boldsymbol{x}}}; & \boldsymbol{x} \in [\mathbf{0}, \mathbf{20}] \\ \mathbf{1} - \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{1}+e^{\mathbf{25}-\boldsymbol{x}}}; & \boldsymbol{x} \geq [\mathbf{20}, \mathbf{40}] \end{cases}$$

2 2. Opérateurs et normes

Comme dans la théorie des ensembles classiques, on définit l'intersection, l'union des ensembles flous ainsi que le complémentaire d'un ensemble flou. Ces

relations sont traduites par les opérateurs "et", "ou" et "non". De nouvelles fonctions d'appartenance liées à ces opérateurs sont établies :

x appartient à *A* et *B*⇔ $x \in A \cap B \Leftrightarrow \mu_{A\cap B}(x)$ *x* appartient à *A* ou *B*⇔ $x \in A \cup B \Leftrightarrow \mu_{A\cup B}(x)$ *x* appartient au complément de *A*⇔ $x \in A \Leftrightarrow \mu_A(x)$ L'opérateur "et" se défini par une norme triangulaire (t-norme) :

$T : [0,1]\times[0,1] \rightarrow [0,1]$

(x, y) □ □$z = xTy$

T possède les propriétés suivantes :

- commutativité : $xTy = yTx$
- associativité : $xT(yTz) = (xTy)Tz$
- monotonie : $xTz \leq yTz \; si \; x \leq y$
- admet 0 comme élément absorbant et 1 comme élément neutre : $0Tx = 0$, $1Tx = x$

De même, l'opérateur "ou" se défini par une co-norme triangulaire (T^*) qu'on appelle aussi s-norme (*S*) :

$S : [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$

$(x, y)\; z = xSy$

S possède également les propriétés de commutativité, d'associativité et de monotonie. Elle admet 1 comme élément absorbant et 0 comme élément neutre.

A l'aide de la loi de Morgan, on peut associer à chaque t-norme, la s-norme définie par : $xSy = 1 - (1 - x)T(1 - y)$.

Les opérateurs les plus utilisés en logique floue sont :

- L'opérateur "et" pour la t-norme, qui correspond à l'intersection de deux ensembles *A* et *B*. Il peut être réalisé par :
- La fonction "Min" : $\mu_{A\cap B}()(x = \min \mu_A))(),(x \; \mu_B x$
- La fonction arithmétique "Produit" : $\mu_{A\cap B})()()(x = \mu_A x \cdot \mu_B x$

- L'opérateur "ou" pour la s-norme, qui correspond à l'union de deux ensembles *A* et *B*. Il peut être réalisé par :
- La fonction "Max" : $\mu_{A\cup B}()(x = \max \mu_A))(),(x \; \mu_B x$
- La fonction arithmétique "Somme" : $\mu_{A\cup B)\,(})\;()\;(x = \mu_A x + \mu_B x$

- L'opérateur "non" est réalisé par : $\mu_A(x) = 1 - \mu_A(x)$.

2 3. Inférence

En logique classique, la règle de raisonnement du *modus ponens* permet, à partir des deux assertions,

- *x* est *A*

et

- si *x* est *A* alors *y* est *B*, de conclure que *y* est *B*.

En logique floue, la règle s'appelle *modus ponens généralisé* et permet à partir des assertions,

- *x* est *A′*

Et

- si *x* est *A* alors *y* est *B*, de conclure que *y* est *B′*.

L'inférence est l'opération d'agrégation des règles.

Sans entrer dans les détails de formalisation mathématique, qui se basent sur les notions de sous-ensembles flous, de graphes (Γ est le graphe définissant la relation (*R*) de *A* vers *B*) et de projection (*B′* est la projection sur *B* de *A′* par le graphe Γ), il est possible de définir l'ensemble *B′* par :

$\forall y \in B, \quad \mu_{B'}(y) = \sup_{x \in A} \mu_{A' \times B \cap \Gamma}(x, y)$.

C'est à dire que le degré d'appartenance de chaque élément *y* de *B* à l'ensemble flou *B′* est égal au plus grand degré d'appartenance des couples (*x*, *y*) à l'intersection de l'ensemble *A′* avec le graphe Γ de la relation *R*.

Ce dernier est calculé en utilisant la fonction "Min" pour l'opérateur "et" de l'intersection : $\mu_{A' \times B \cap \Gamma}(x, y) = \min(\mu_{A'}(x), \mu_R(x, y))$.

En ce qui nous concerne, nous allons nous intéresser aux inférences avec plusieurs règles. En effet, dans le cas de la commande et de la régulation, les variables floues ont plusieurs ensembles d'appartenance. Ainsi plusieurs règles peuvent être activées en même temps.

Les règles d'inférences peuvent être décrites de plusieurs façons, a) Linguistiquement :

On écrit les règles de façon explicite comme dans l'exemple suivant,

SI (la température est élevée **ET** la vitesse est faible) **ALORS** la tension est grande positive

OU SI (la température est moyenne **ET** la vitesse est faible) **ALORS** la tension est positive b) Symboliquement :

Il s'agit en fait d'une description linguistique où l'on remplace la désignation des ensembles flous par des abréviations.

c) Par matrice d'inférence :

Elle rassemble toutes les règles d'inférences sous forme de tableau. Dans le cas d'un tableau à deux dimensions, les entrées du tableau représentent les ensembles flous des variables d'entrées (température : *T* et vitesse : *V*). L'intersection d'une colonne et d'une ligne donne l'ensemble flou de la variable de sortie définie par la règle. Il y a autant de cases que de règles.

Exemple :

U		*T*		
		F	M	E
V	F	Z	P	GP
	E	Z	Z	P

Tableau 1.1

Les règles que décrit ce tableau sont (sous forme symbolique) :

SI (*T* est F **ET** *V* est F) **ALORS** *U*=Z

OU
SI (*T* est M **ET** *V* est F) **ALORS** *U*=P

OU
SI (T est E **ET** *V* est F) **ALORS** *U*=GP

OU
SI (T est F **ET** *V* est E) **ALORS** *U*=Z

OU
SI (T est M **ET** *V* est E) **ALORS** *U*=Z

OU SI (T est E **ET** *V* est E) **ALORS** *U*=P

Dans l'exemple ci-dessus, on a représenté les règles qui sont activées à un instant donné par des cases sombres :

SI (T est M **ET** *V* est F) **ALORS** *U*=P

OU SI (T est E **ET** *V* est F) **ALORS** *U*=GP

Il arrive que toutes les cases du tableau ne soient pas remplies, on parle alors de règles d'inférences incomplètes. Cela ne signifie pas que la sortie n'existe pas, mais plutôt que le degré d'appartenance n'est nul pour la règle en question.

Il s'agit maintenant de définir les degrés d'appartenance de la variable de sortie à ses sous-ensembles flous. Nous allons présenter les méthodes d'inférence qui permettent d'y arriver. Ces méthodes se différencient essentiellement par la manière dont vont être réalisés les opérateurs (ici "ET" et "OU") utilisés dans les règles d'inférence.

Nous présentons les trois méthodes d'inférence les plus usuelles ; Max-Min, Max-Produit et Somme-Produit :

3.1. Méthode d'inférence Max-Min

Cette méthode réalise l'opérateur "ET" par la fonction "Min", la conclusion "ALORS" de chaque règle par la fonction "Min" et la liaison entre toutes les règles (opérateur "OU") par la fonction Max.

La dénomination de cette méthode, dite Max-Min ou "implication de Mamdani", est due à la façon de réaliser les opérateurs ALORS et OU de l'inférence.

Reprenons l'exemple précédent où seulement deux règles sont activées :

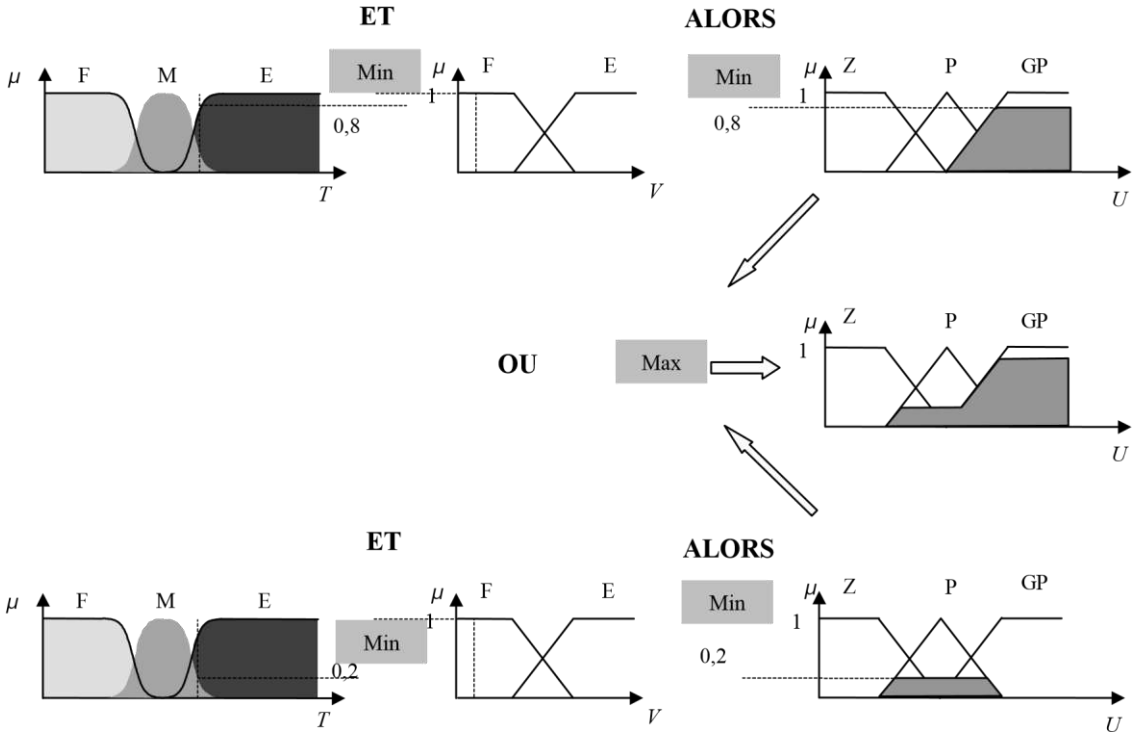


Figure 1.5 Exemple d'inférence Max-Min

La variable *T* est Elevée avec un degré d'appartenance de 0,8 et Moyenne avec un degré d'appartenance de 0,2. La vitesse *V* est faible avec un degré d'appartenance de 1.

L'application de la première règle d'inférence donne un degré d'appartenance à la condition de 0,8 (minimum dû à l'opérateur ET entre les deux degrés d'appartenance). On obtient ainsi une "fonction d'appartenance partielle" dessinée en gris qui est écrêtée à 0,8.

De manière similaire, la seconde règle donne lieu à une fonction d'appartenance écrêtée à 0,2.

La fonction d'appartenance résultante correspond au maximum des deux fonctions d'appartenance partielles puisque les règles sont liées par l'opérateur OU.

2.3.2. Méthode d'inférence Max-Produit

La différence par rapport à la méthode précédente réside dans la manière de réaliser la conclusion "ALORS". Dans ce cas, on utilise le produit comme illustré par la figure 1.6.

On remarque que les fonctions d'appartenances partielles ici ont la même forme que la fonction d'appartenance dont elles sont issues multipliées par un facteur d'échelle vertical qui correspond au degré d'appartenance obtenu à travers l'opérateur "ET".

On l'appelle également "implication de Larsen".

ET **ALORS**

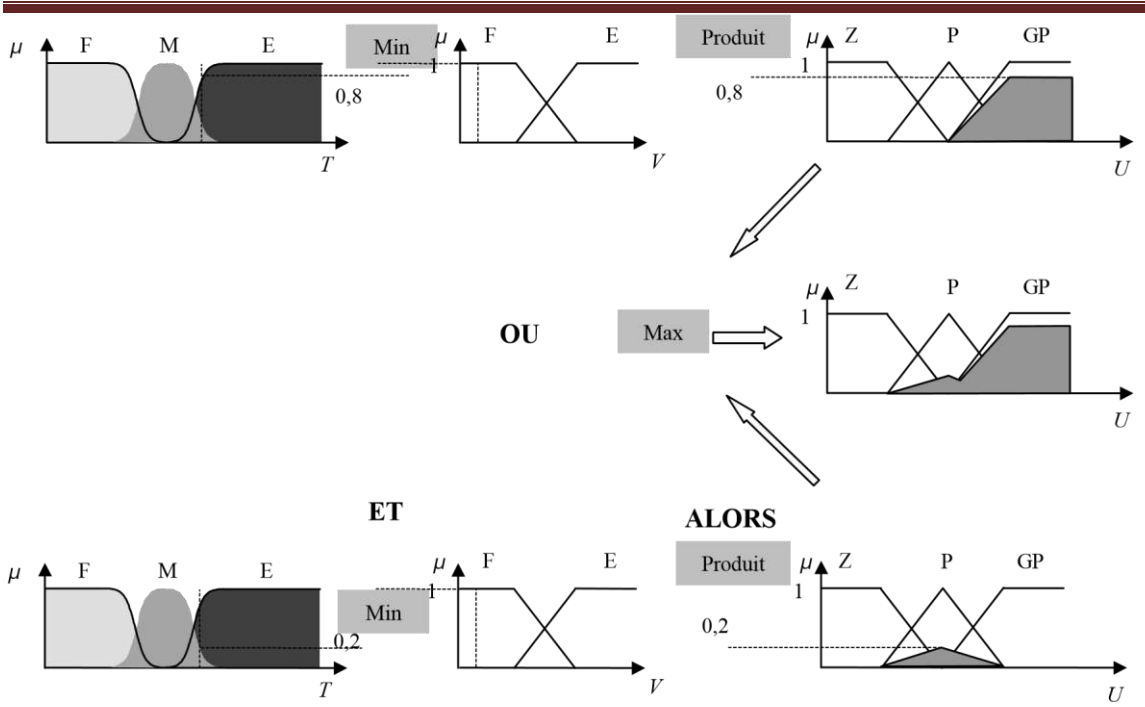


Figure 1.6 Exemple d'inférence Max-Produit

2.3.3. Méthode d'inférence Somme-Produit

Dans ce cas, l'opérateur "ET" est réalisé par le produit, de même que la conclusion "ALORS". Cependant, l'opérateur "OU" est réalisé par la valeur moyenne des degrés d'appartenance intervenant dans l'inférence.

D'autres méthodes ont été élaborées, ayant chacune une variante spécifique. Néanmoins, la méthode Max-Min est de loin la plus utilisée à cause de sa simplicité.

5- **Application du modèle Sur la machine asynchrone en défaut de court-circuit:**

Modélisation de la machine

A. **Modèle sain :**

Equation du stator

$$\frac{d\lambda_{qs}}{dt} = v_{qs} - r_s i_{qs} - \omega\lambda_{ds}$$

$$\frac{d\lambda_{ds}}{dt} = v_{ds} - r_s i_{ds} + \omega\lambda_{qs}$$

Equation du rotor

$$\frac{d\lambda_{qr}}{dt} = -r_r i_{qr} - (\omega - \omega_r)\lambda_{dr}$$

$$\frac{d\lambda_{dr}}{dt} = -r_r i_{dr} + (\omega - \omega_r)\lambda_{qr}$$

Equation de vitesse

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{T_e - B_m\omega_r - T_{load}}{J}$$

Equation des courants la référentiel dq.

$$i_{qs} = \lambda_{qs}a_1 - \lambda_{qr}a_2$$

$$i_{ds} = \lambda_{ds}a_1 - \lambda_{dr}a_2$$

$$i_{qr} = \lambda_{qr}a_4 - \lambda_{qs}a_2$$

$$i_{dr} = \lambda_{dr}a_4 - \lambda_{ds}a_2$$

Les coefficients sont donnés par :

$$a_0 = L_s L_r - L_m^{\,2} \qquad a_1 = \frac{L_r}{a_0} \qquad a_2 = \frac{L_m}{a_0}$$

$$a_3 = \frac{1}{L_{ls}} \qquad a_4 = \frac{L_s}{a_0} \qquad a_5 = \frac{L_m}{L_{lr}}$$

Donc l'équation du couple est donnée par :

$$T_e = \frac{3}{2}\frac{P}{2}\left(\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}\right)$$

B. Model en défaut

Pour simuler le défaut dans le moteur à induction, en supposant que certaines parties d'une phase de stator deviennent en court-circuit comme montré dans la Fig. 2, l'équation dynamique du moteur devient comme suit:

Pour les équations du stator :

$$\frac{d\lambda_{qs}}{dt} = v_{qs} - r_s i_{qs} - \omega\lambda_{ds} + \frac{2}{3}\mu r_s i_f \cos(\theta)$$

$$\frac{d\lambda_{qs}}{dt} = v_{ds} - r_s i_{ds} - \omega\lambda_{qs} + \frac{2}{3}\mu r_s i_f \sin(\theta)$$

Avec : $0 \prec \mu \prec 1$

μ : est le degré du court-circuit dans le bobinage ;

i_f : Est le courant du cc dans le bobinage ;

Les équations de rotor ne changent pas.

L'équation du flux de bobinage en court-circuit est donnée par :

$$\frac{d\lambda_{as2}}{dt} = r_f i_f - \mu r_s \left(i_{ds}\cos(\theta) + i_{qs}\sin(\theta) - i_f\right)$$

L'équation du couple devient :

$$T_e = \frac{3}{2}\frac{P}{2} L_m \left(i_{qs} i_{dr} - i_{qr} i_{ds}\right) + \frac{P}{2} L_m i_f \left(i_{qr}\sin(\theta) + i_{dr}\cos(\theta)\right)$$

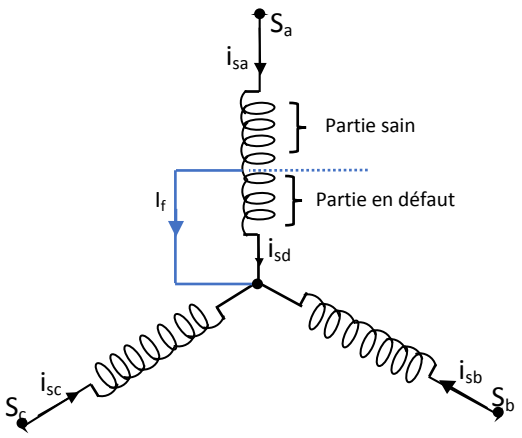


Fig. 1 Enroulement de stator avec défaut sur la phase ‘a’

Enfin les courants du stator, du rotor et du bobinage ayant les courts-circuits sont calculés comme suit

$$i_{qs} = \lambda_{qs} a_7 - \lambda_{qr} a_8 + (L_r a_{10} - L_m a_{11}) i_f \cos(\theta)$$

$$i_{ds} = \lambda_{ds} a_7 - \lambda_{dr} a_8 + (L_r a_{10} - L_m a_{11}) i_f \sin(\theta)$$

$$i_{qr} = \lambda_{qr} a_9 - \lambda_{qs} a_8 + +(L_s a_{11} - L_m a_{10}) i_f \cos(\theta)$$

$$i_{dr} = \lambda_{dr} a_4 - \lambda_{ds} a_2 + (L_s a_{11} - L_m a_{10}) i_f \sin(\theta)$$

$$i_{dr} = \left[-\lambda_{as2} + \left(i_{qs} a_{12} + i_{qr} a_{13} \right) \cos(\theta) + \left(i_{ds} a_{12} + i_{dr} a_{13} \right) \sin(\theta) \right] / a_{11}$$

$$a_6 = 1 - \frac{L_m^{\ 2}}{L_s L_r} \qquad a_7 = \frac{1}{a_6 L_s} \qquad a_8 = \frac{a_7 L_m}{L_r}$$

$$a_9 = \frac{1}{a_6 L_r} \qquad a_{10} = \frac{2\mu L_s}{3a_0} \qquad a_{11} = \frac{2\mu L_m}{3a_0}$$

$$a_{12} = \mu L_s \qquad a_{13} = \mu L_m$$

Détection du défaut par l’utilisation de la logique floue

Dans cette approche le système surveille les amplitudes des courants statoriques I_a, I_b et I_c, ces courants sont considérés comme des entrées pour le système flou. Ces variables donnent des informations sur l’état de l’entrée, par la suite en les convertis en valeurs linguistiques appropriées. Les données numériques sont représentées sous forme d'informations linguistiques. Ainsi, les amplitudes des courants (entrées) sont classées en utilisant quatre variables linguistiques. [6]Ces catégories sont très petites (VS), petit (S), moyen (M) et grand (L). La variable linguistique « stator condition » (SC) (sortie), interprétant l’état du stator qui pourrait être « bon » (G), « endommagé » (D) ou « Sérieusement endommagé » (SD). "G" se réfère à un stator sain " D " peut être un stator avec déséquilibre de courant court-circuit), et ‘SD’ d’un stator avec une phase ouverte ou une bobine court-circuitée [], []

Nombre	**Si partie**	**Alors partie**

de règle	I_a	I_b	I_c	SC
1	**VS**			SD
2		**VS**		SD
3			**VS**	SD
4	**B**			SD
5		**B**		SD
6			**B**	SD
7	**M**	**M**	**M**	G
8	**S**	**S**	**S**	G
9	**M**	**S**	**S**	D
10	**S**	**M**	**S**	D
11	**S**	**S**	**M**	D
12	**S**	**M**	**M**	D
13	**M**	**S**	**S**	D
14	**S**	**M**	**S**	D

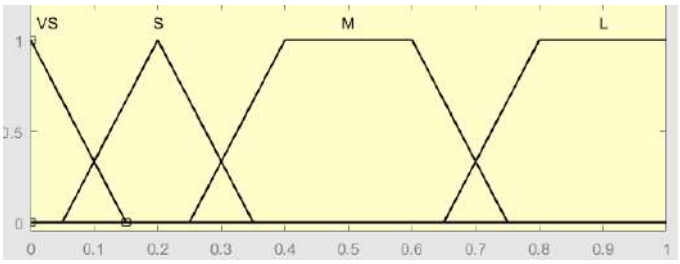


Fig.2.Fonctionsd'adhésionpoulescourantsI_a,I_b,I_c

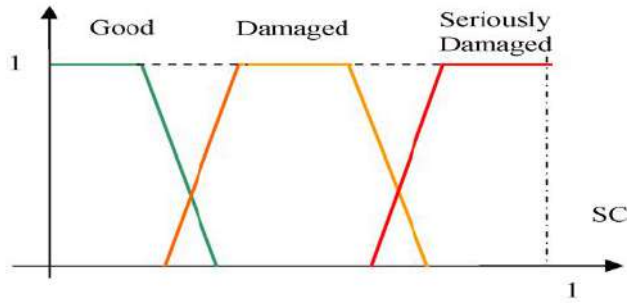


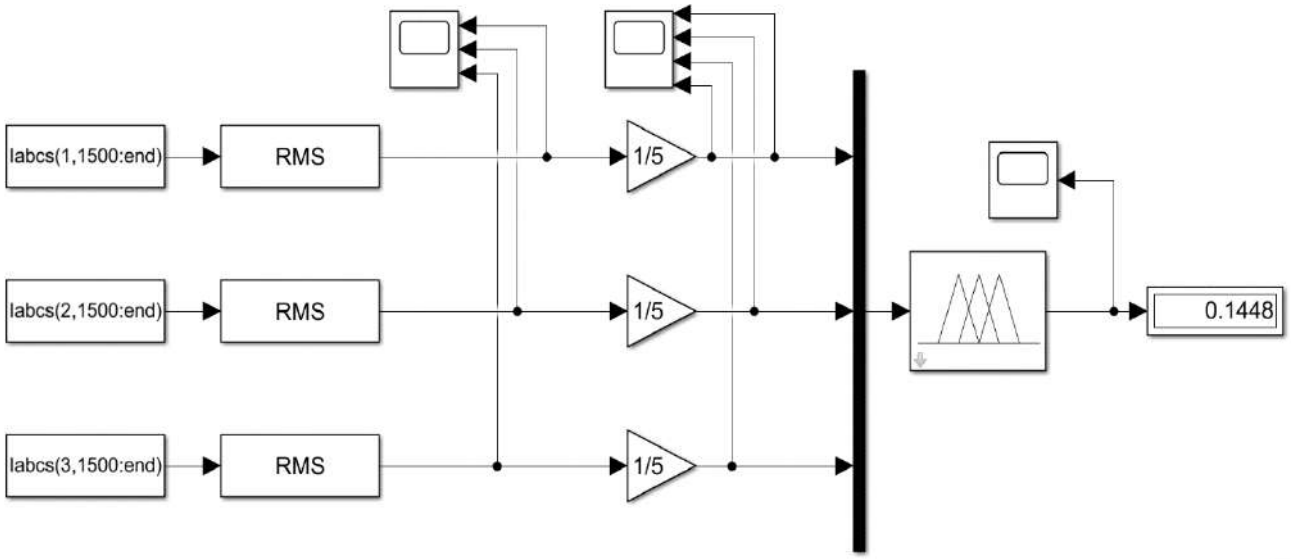
Fig. 3. Fonctions d'appartenance pour la condition du stator

TABLE I : Règles de base du système flou pour détection des défauts

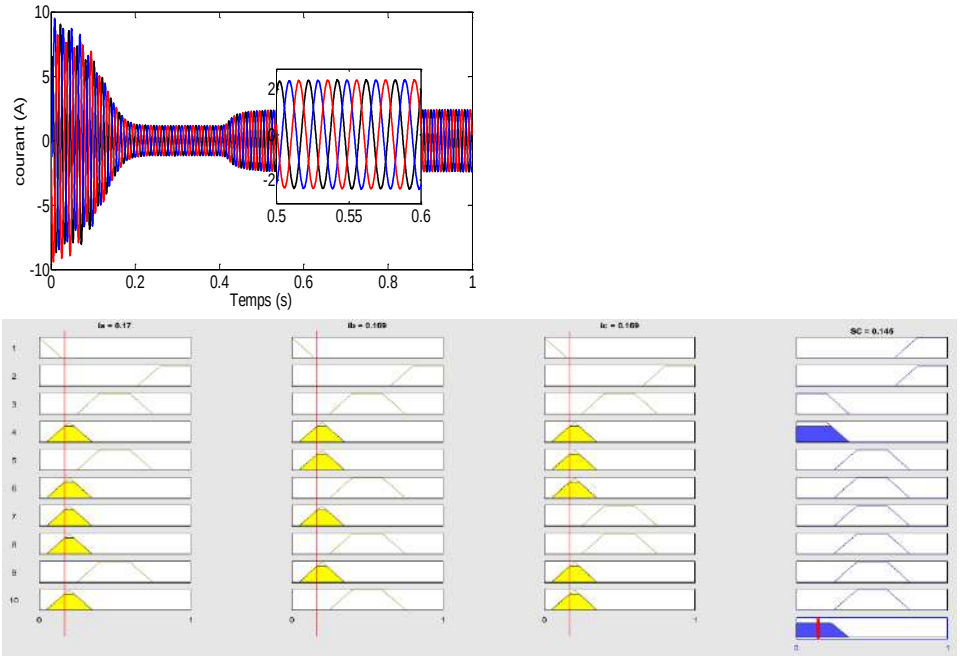
Dans ce qui suit, les résultats obtenus à partir de simulations effectuées dans le processus de détection de défaut peuvent être observés.

Interprétation des résultats de simulation

L'objectif principal de ce travail était d'établir un système capable de détecter l'état du stator en surveillant les courants du moteur. Tout au long de ce travail, la logique floue a été utilisée pour analyser les données et faire les décisions. La méthode était capable de détecter l'état du moteur avec une grande précision comme on peut le voir dans les figures. La logique floue est une bonne méthode de détection car il ne nécessite pas un modèle générale qui décrit le moteur en défaut. Le système de protection moteur proposé a été implémenté dans l'environnement MATLAB. Il a pu identifier le stator avec des données simulées et mesurées. Une simple comparaison des amplitudes des courant peut se fait l'affaire.

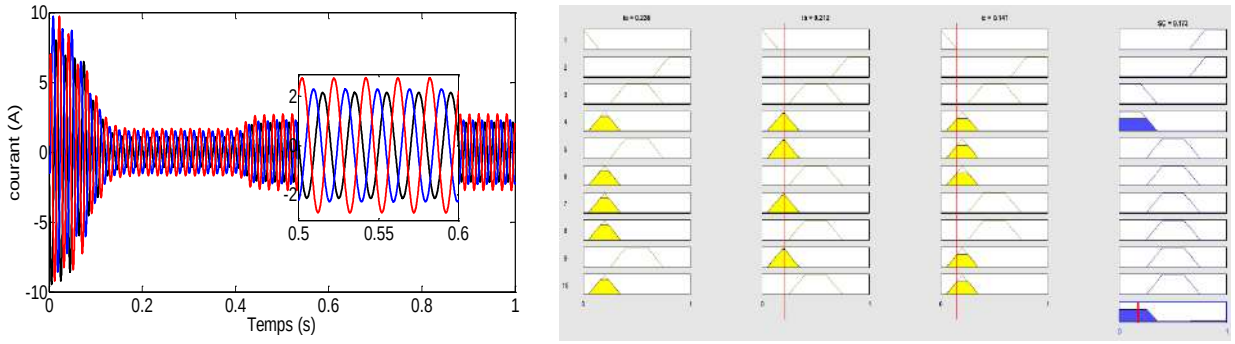


A- Fonctionnement saine



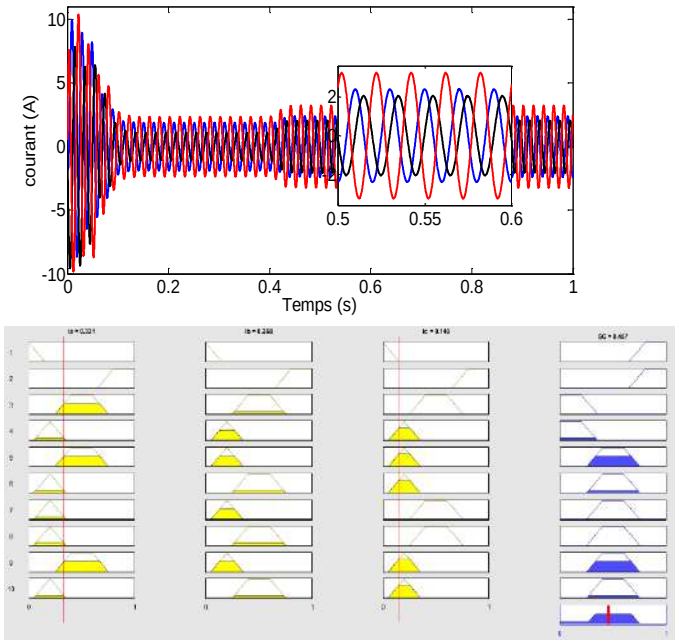
Résultat du test pour un moteur sain

B- Défaut de c-c 10 %



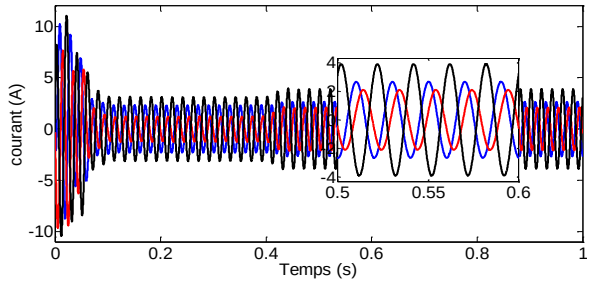
Résultat du test pour un moteur en c-c statorique phase ‘a’ de 10%

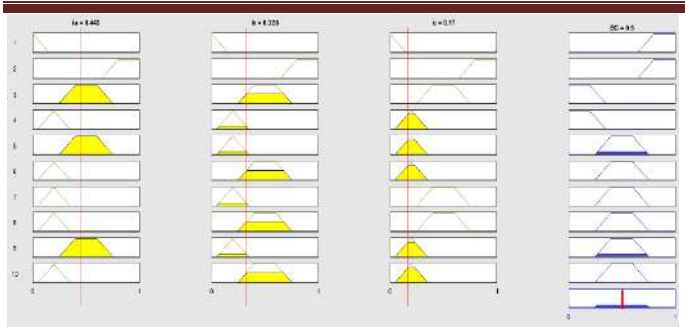
C- Défaut de c-c 20 %



Résultat du test pour un moteur en c-c statorique phase ‘a’ de 20%

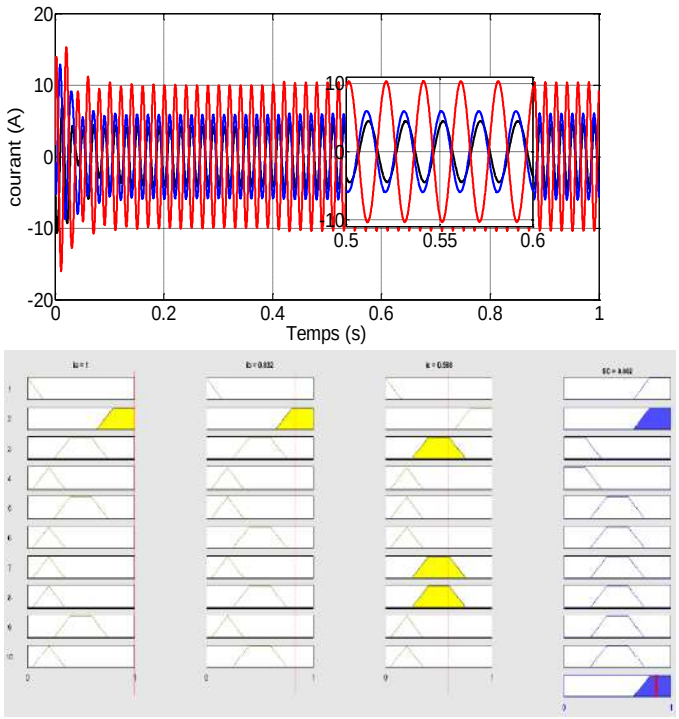
D- Défaut de c-c 30 %





Résultat du test pour un moteur en c-c statorique phase ‘a’ de 30%

E- Défaut de c-c 90 %



Résultat du test pour un moteur en c-c statorique phase ‘a’ de 90%

A- Résultat du test pour un moteur sain

La figure ‘A’ montre que la machine fonctionne normale et les amplitudes des courant ia , ib ,ic sont égaux et la sortie sc du stator indique la valeur 0.145 qui se trouve dans la partie ‘good’

B-Résultat du test pour un moteur en c-c statorique phase ‘a’ de 10% La figure ‘B’ montre que la machine fonctionne normale mais l’amplitude du courant de la phase a est plus grande que celles de la phase b et c et la sortie sc du stator indique la valeur 0.173 qui se trouve dans la partie ‘good’ et la partie ‘Damaged’ mais sans faire perturbé le fonctionnement de la machine

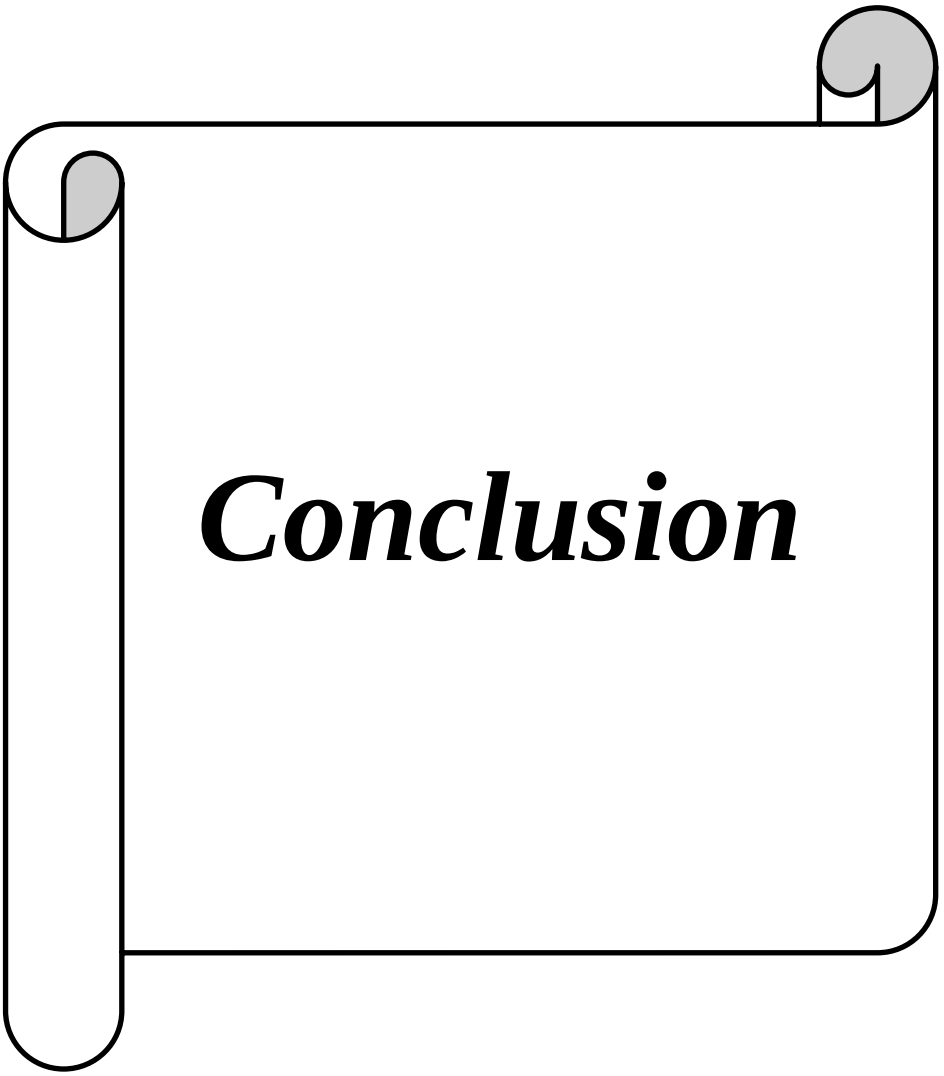
C-Résultat du test pour un moteur en c-c statorique phase ‘a’ de 20% La figure ‘C’ montre que l’amplitude du courant de la phase a est plus grande que celles de la phase b et c et la sortie sc du stator indique la valeur 0.45 qui se trouve dans la partie ‘Damaged’ qui indique que la machine est défectueuse

D-Résultat du test pour un moteur en c-c statorique phase 'a' de 30% La figure 'D' montre que l'amplitude du courant de la phase a est plus grande que celles de la phase b et c et la phase b est plus grande que la phase c en fin la sortie sc du stator indique la valeur 0.5 qui se trouve dans la partie 'Damaged' qui indique que la machine est défectueuse

E-Résultat du test pour un moteur en c-c statorique phase 'a' de 90% La figure 'E' montre que l'amplitude du courant de la phase a est plus grande que celles de la phase b et c et la phase b est plus grande que la phase c en fin la sortie sc du stator indique la valeur 0.869 qui se trouve dans la partie 'Seriously Damaged' qui indique que la machine est totalement défectueuse

Conclusion

Ce travail montre la faisabilité de repérer les défaillances du stator dans un moteur à induction en surveillant les amplitudes du courant du moteur en utilisant la logique floue. Son application avancée très rapide par l'utilisation des règles et fonctions d'inférences. Ce système pourrait être implémenté dans le logiciel de l'onduleur pour surveiller l'état du stator en ligne. Il est capable de travailler avec des moteurs connectés en étoile et en delta. Un inconvénient possible de la méthode est associé au fait d'un déséquilibre de courant provenant de la source d'alimentation peut être identifié comme un défaut du moteur. Mais même cela on peut remédier à cette lacune en surveillant la tension par l'introduction de nouvelles règles dans le système d'inférence.


Conclusion

Conclusion générale

Ce travail fait partie de la maintenance prédictive, le mémoire est une contribution dans le domaine de diagnostic des systèmes d'entrainement électrique et la détection des défauts, commençant premièrement par une étude sur le système d'entraînement électrique pour savoir sa constitution et le rôle de chaque composant, notre objective est de sélectionner une partie de système d'entrainement électrique qui est la machine asynchrone à cage d'écureuil. Ce choix est justifié dans la position du problème, pour but de la surveiller pendant son fonctionnement continue dans le système et aussi d'élaborer un système de détection et localisation de certains défauts qui peuvent passer fréquemment dans cette partie afin de réaliser les exigences de la continuité de fonctionnement des systèmes d'entrainement électrique.

Ce travail est constitué de 3 chapitres :

- Etat de l'art sur le diagnostic.
- Modélisation de la machine asynchrone Multi-enroulements.
- diagnostic par la « logique floue ».

Dans un premier temps, dans le premier chapitre nous avons commencé par une présentation de l'état de l'art d'un système d'entrainement électrique et sa composition en général basant sur la constitution, principe de fonctionnement de machines asynchrones à cage d'écureuil. Ensuite, nous avons évoqué les différents défauts qui peuvent apparaitre dans tous les parties du système d'entrainement et suivi par les approches usuelles et des principales techniques de chaque approche de diagnostic souvent utilisées. Finalement on a terminé par une position de problème où on a choisi, la machine asynchrone à cause de sa vaste disponibilité dans le domaine industriel. Les courts-circuits entre spires de même enroulement comme défauts statoriques le plus probablement passant dans la machine asynchrone. Ceci est à base des études statistiques des défaut de la MAS inclus dans le travail.

Dans le deuxième chapitre, une modélisation de la machine asynchrone multi- enroulement a été faite, contrairement au modèle classique ce modèle est triphasé dédié spécialement aux défauts statoriques, il se caractérise par ces trois phases ABC. Il nous a permis de modéliser les défauts de court-circuit entres spires. Le modèle est réalisé par Matlab/Simulink ensuite il est simulé à l'état sain ainsi en présence de défaut. Les résultats de cette procédure comparative nous aident à distinguer l'effet de défaut sur les caractéristiques de la MAS. On a constaté que les courts-circuits entre spires d'un enroulement statorique provoquent un déséquilibre des courants des phases statoriques et une augmentation dans les amplitudes notamment la phase défectueuse ainsi que le courant de défaut dont l'amplitude augmente en fonction de la gravité de défaut. Par la suite on a utilisé l'approche signal basé sur

traitement de signal comme technique classique de diagnostic en appliquant une analyse spectrale par FFT, cette analyse nous permet d'obtenir des fréquences lors d'une anomalie. Une apparition des amplitudes sur des fréquences spécifiques (150Hz, 250Hz) dans le spectre du courant d'enroulement défectueux, c'est des signatures de défaut de court-circuit entre spires.

A la fin, dans le troisième chapitre, nous avons élaboré et appliquer un diagnostic automatique pour la surveillance de la machine asynchrone au moment de fonctionnement à l'aide d'un

traitement de signal par le signal RMS, et la logique floue comme outil d'intelligence artificiel. Ce système de diagnostic est bi-décisionnel concernant l'état de la machine ainsi il aide à localiser la phase dont l'enroulement est en état défaillant. Le concept de système est facile à appliquer dans le domaine industriel par PLC et HMI.