

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF - M'SILA
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GENIE ÉLECTRIQUE



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité : Electromécanique

Détection et localisation des défauts d'un système d'entraînement électrique

Proposé et dirigé par :

Dr. Khodja Djalal Eddine

Présenté par :

Nebbad Sofiane

Laifaoui Djemai

N° d'ordre :

Année universitaire :

2019-2020

*A la mémoire de ma grand-mère,
A mes parents, pour leurs encouragements,
Que Dieu les protège et les bénisse dans leurs
vies et les bénisse avec santé et bien-être*

A mon frère et ma sœur.

A mes collègues et mes amis

A tous ceux qui me sont chers et près au cœur

.....

Sofiane N

Je dédie ce travail :

*A mes très chers parents, pour leur soutien et
leur confiance, que Dieu, leur procure santé et
longue vie.*

A mes frères.

A mes sœurs.

A toute ma famille.

A tous mes amis.

A tous ceux que j'aime.

Laiifaoui Djemai

Remerciements

Tout d'abord, Nos remerciement vont à Dieu (ALLAH) le tout puissant qui nous a donné la bonne santé, la volonté, le courage et la patience au cœur de nos études et dans cette pandémie (COVID-19) pour parvenir à finir ce modeste travail.

Nous adressons nos remerciements les plus sincères à Mr. **Khodja Djalel-Eddine**, pour avoir proposé ce thème d'une part, et pour ses conseils constants, ses suggestions et son savoir qui ont contribué et facilité la réalisation de ce présent mémoire, c'est un honneur pour nous d'être encadré par lui et aussi pour sa contribution dans notre formation, nous tenons à lui tous nos profonds respects.

Nous remercions également les membres du jury d'avoir examiné et d'évaluer cet humble travail.

Nos essentiels remerciements à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation dû à l'université, à ceux qui ont contribué notre formation d'électromécanique.

Nous n'oublions pas d'adresser nos remerciements les plus chaleureux à tous ceux qui nous ont soutenus de près ou de loin pour la réalisation de ce mémoire.

Nebbad et Laifaoui

Août 2020

ملخص

هذا العمل هو جزء من موضوع الكشف وتحديد الأعطال في أنظمة القيادة الكهربية وخاصة تلك القائمة على الآلات غير المتزامنة. اختيار المحرك مبرر من خلال النجاح المتزايد الذي أثاره، على وجه الخصوص في القيادة الكهربية متغيرة السرعة.

يتم استخدام أنظمة القيادة الكهربية القائمة على المحركات غير المتزامنة على نطاق واسع في التطبيقات الصناعية بسبب التكلفة المنخفضة والأداء والمتانة.

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

Résumé

Ce travail c'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.

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.

Notre travaille s'intéresse à la surveillance et au diagnostic des défauts dans la machine asynchrone tels que les défauts statoriques et rotoriques. 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, FFT, STFT, analyse spectrale.

Abstract

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.

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

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.

Table des matières

Table des matières.....	i
Liste des Figures.....	v
Liste des Tableaux.....	vii
Glossaire.....	ix
Nomenclature	x
Introduction générale	1
Chapitre I. Etat de l’art des systèmes d’entraînement électriques et leurs diagnostics 5	
I.1 Description d’un système d’entraînement électrique	6
I.1.1 Définition d’un système d’entraînement :	6
I.1.2 Constitution d’un système d’entraînement.....	6
I.1.2.1 La source d’alimentation :.....	7
I.1.2.2 Le convertisseur électronique :	8
I.1.2.3 Le moteur électrique :	8
I.1.2.3.1 Moteur à courant continu "MCC" :.....	8
I.1.2.3.2 Moteur à courant alternatif :	9
I.1.2.4 La charge mécanique :	10
I.1.2.4.1 Caractéristiques mécaniques des machines de production (machines entrainées ou charges entrainée) :	10
A. Charge à caractéristique constante :	10
B. Charge à caractéristique linéaire :	10
C. Charge à caractéristique parabolique :	10
D. Charge à caractéristique hyperbolique :	10
I.1.2.5 Unité de calcul et de commande :	11
I.2 Les défauts dans un système d’entraînement électrique tournant.....	12
I.2.1 La machine :.....	12
I.2.1.1 La constitution de la machine asynchrone :	12
I.2.1.1.1 Le stator :	13
I.2.1.1.2 Le rotor à cage	13
I.2.1.1.3 Les organes mécaniques	14
I.2.1.2 Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone	14
I.2.1.3 Les causes des défauts :	17
I.2.1.4 Les principaux défauts dans la machine.....	18
I.2.1.4.1 Les défauts liés aux organes mécaniques de la machine :	19
I.2.1.4.2 Les défauts liés au stator de la machine :	20
I.2.1.4.3 Les défauts liés au rotor de la machine :	23
I.2.2 Le convertisseur statique :	26

I.2.3	Transmission mécanique :.....	27
I.2.3.1	Origine des défauts :	27
I.2.3.2	Les défauts répartis sur toutes les dents	28
I.2.3.3	Les défauts localisés sur certaines dents	28
I.2.3.4	Autres défaillances mécaniques	28
I.2.4	Le capteur.....	29
I.2.4.1	Les erreurs :.....	29
I.2.4.2	Les pannes :	30
I.3	Etude critique des méthodes de diagnostic :.....	31
I.3.1	Définition et objectif du diagnostic :.....	31
I.3.1.1	Définition :	31
I.3.1.2	Objectif du diagnostic :	31
I.3.1.3	Terminologies et concepts :	31
I.3.2	Les différentes étapes de diagnostic :.....	32
I.3.2.1	La détection :.....	32
I.3.2.2	La localisation :.....	33
I.3.2.3	L'identification :	33
I.3.3	Etude critique des méthodes de diagnostic :.....	33
I.3.3.1	Introduction :.....	33
I.3.3.2	Les approches usuelles de diagnostic :.....	34
I.3.3.2.1	Méthodes sans modèle analytique (heuristiques ou traditionnel) :.....	34
I.3.3.2.2	Méthodes basées sur les modèles analytiques :	41
I.4	Position du problème	46
I.5	Conclusion	47
Chapitre II. Modélisation de la machine asynchrone Multi-enroulements		48
II.1	Introduction.....	49
II.2	Modélisation de la machine asynchrone en régime normal « Sain » (modèle triphasé)	50
II.2.1	Hypothèses de simplification :.....	50
II.2.2	Modèle triphasé équivalent d'une machine asynchrone :	51
II.2.3	Définition de la matrice de transformation :	53
II.2.4	Transformation « triphasé-triphasé » des équations du modèle :.....	53
II.2.4.1	Les équations électriques et magnétiques :	53
II.2.4.2	Les équations mécaniques :.....	56
II.2.5	Mise en équation d'état du modèle triphasé :.....	56
II.2.6	Simulation de la machine dans le régime normal	59
II.2.6.1	Résultats de simulation :	60
II.2.6.2	Interprétations des résultats :.....	62
II.3	Modélisation de la machine asynchrone en régime defectueux	63
II.3.1	Modélisation d'un défaut statorique « court-circuit entre spires statoriques » :	63
II.3.1.1	Simulation de la machine asynchrone en présence de défaut de court-circuit entre spires :	66
II.3.1.2	Résultats de la simulation :	67
II.3.1.3	Interprétations des résultats.....	68
II.4	Analyse des défauts statoriques par traitement de signal	69
II.4.1	Analyse spectrale par FFT :	69
II.4.2	La transformée de Fourier à court terme TFCT ou STFT :	70
II.4.3	Analyse spectrale des courants statoriques	72
II.5	Conclusion	73

Chapitre III.....Application d'un diagnostic automatique par intelligence artificielle à base de « logique floue ».....	74
III.1 Introduction.....	75
III.2 Traitement de signal par RMS	75
III.2.1 Application du RMS sur les signaux de la machine :	76
III.2.1.1 Interprétation :.....	76
III.3 Le diagnostic par la logique floue.....	77
III.3.1 La logique floue sous Matlab :.....	78
III.3.2 Elaboration d'un système à base de logique floue pour le diagnostic et la détection des défauts statoriques :.....	79
III.3.3 Application et simulation de système de diagnostic floue sur la machine :.....	80
III.3.3.1 Principe de fonctionnement de système de diagnostic floue :	80
III.3.3.2 Résultat de simulation :.....	81
III.3.3.3 Interprétation :.....	81
III.4 Application au domaine industriel	82
III.4.1 Programmation sous PLC	82
III.5 Conclusion	82
Conclusion générale	83
Références bibliographiques	86
Annexes.....	89
A. : schéma bloc d'un système de détection et localisation des défauts d'un entraînement électrique	D-1
B. : Machine asynchrone Multi-enroulements.....	2
C. Paramètres de la machine asynchrone multi-enroulements	2
D. Les coefficients de la modélisation de la machine asynchrone.....	2

Liste des Figures

Figure I.1– Schéma de principe du variateur de vitesse.	8
Figure I.2– Schéma des composants d'un moteur à courant continu.	9
Figure I.3 - Schéma des composants d'un moteur à courant alternatif (synchrone).....	9
Figure I.4– Les différents types de charge mécanique et leurs caractéristiques.....	11
Figure I.5 – Schéma des composant d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil.	12
Figure I.6– Différentes vues et coupes d'un stator du moteur asynchrone.....	13
Figure I.7– Le rotor à cage d'écureuil du moteur asynchrone.	14
Figure I.8 – Proportion de défauts d'un moteur asynchrone.	15
Figure I.9 – Répartition des pannes sur les machines asynchrones de faibles ou moyennes puissances.	16
Figure I.10– Répartition des pannes sur les machines asynchrones de grandes puissances....	16
Figure I.11 – Répartition des causes des défauts pour une machines asynchrones.	17
Figure I.12– Répartition des facteurs aggravant des défauts.	17
Figure I.13– Répartition des défauts suivant le composant.	18
Figure I.14– Répartition des défauts roulement.....	19
Figure I.15 – Répartition des défauts liés au stator.....	21
Figure I.16 - Répartition des défauts liés au rotor.	23
Figure I.17 - modélisation schématique de rupture de barres ou rupture d'anneaux.....	24
Figure I.18 - Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique et mixte.	25
Figure I.19– Schéma de principe de base d'un bras de convertisseur statique.....	26
Figure I.20 – Localisation des défauts dans les éléments à engrenage.....	27
Figure I.21 - un capteur infrarouge	29
Figure I.22– Différentes étapes de diagnostic.....	31
Figure I.23 – Les méthodes de diagnostic.	34
Figure I.24– Procédure et étape de diagnostic basé sur RDF.	35
Figure I.25– Procédure et étape de diagnostic basé sur RNA.....	37
Figure I.26– Structure générale d'un système flou.....	38
Figure I.27– Structure générale d'un système expert de diagnostic.	39
Figure I.28–Diagnostic par analyse vibratoire par capteur-détecteur.....	41
Figure I.29–Principe de fonctionnement des méthodes à base du modèle (analytiques).	42
Figure I.30–Principe de fonctionnement de diagnostic à base d'observateurs (générateurs de résidu).	43
Figure I.31 - Génération de résidu par estimation paramétrique.	44
Figure I.32 -Principe de fonctionnement de diagnostic par estimation paramétrique.	45
Figure II.1 – Représentation spatiale des enroulements de la machine asynchrone.....	51
Figure II.2 - le schéma block de la simulation d'un MAS multi-enroulements	59
Figure II.3 - Résultats de simulation d'un démarrage direct d'un MAS à vide	60

Figure II.4 - Résultat de simulation d'un démarrage direct d'un MAS en charge, $C_r=4$ N.m à l'instant $t=1$ s	61
Figure II.5 - court-circuit entre spires de la même phase	63
Figure II.6 - schéma caractérisant un court-circuit dans une phase (a) et dans le circuit statorique dans les trois phases (b).....	64
Figure II.7 - Résultat de simulation d'un démarrage direct d'un MAS à vide puis en charge, $C_r=4$ N.m à l'instant $t=1$ s, et en défaut à $t=2$ s, « MAS en défaut à gauche, MAS Sain à droite ».....	68
Figure II.8 - les étapes d'un traitement de signal par la transformé STFT	71
Figure II.9 - Spectre logarithmique du courant statorique I_{sa} dans le cas de 20% et 40% de spires en court-circuit.....	72
Figure II.10 - Spectre logarithmique du courant statorique I_{sa} dans le cas sain.	72
Figure III.1 - Résultat d'application de transformée RMS sur les courants statoriques abc	76
Figure III.2 - schéma représente les étapes d'un diagnostic automatique	77
Figure III.3 - Schéma général d'évaluation par logique floue (supervision par floue)	77
Figure III.4 - la fenetre de l'outil de logique floue sur Matlab 2020a.....	78
Figure III.5 - structure de système de détection à base de FL	80
Figure III.6 - L'état des enroulements statoriques de la MAS surveillé.....	81
Figure III.7 - Résultat de surveillance de la MAS en fonction d'état	81

Liste des Tableaux

Tableau I.1 - Origine des défauts dans les éléments à engrenage.....	27
Tableau I.2 - Définition de quelques termes du domaine de diagnostic.....	32
Tableau I.3 - Variation des paramètres en fonction des défauts.....	45

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

P_e	Puissance électrique	[W]
P_m	Puissance mécanique	[W]
I	Courant	[A]
I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}	Courants statoriques correspondent aux trois phases (a,b,c)	[A]
I_{ra}, I_{rb}, I_{rc}	Courants rotoriques correspondent aux trois phases (a,b,c)	[A]
U ou V	Tension	[V]
V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}	Tensions statoriques correspondent aux trois phases (a,b,c)	[V]
V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}	Tensions rotoriques correspondent aux trois phases (a,b,c)	[V]
T_{em} ou C_{em}	Couple développer ou électromagnétique	[N.m]
T_r ou C_r	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]
R_s	Résistance propre d'une phase statorique	[Ω]
R_r	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]
M_s	Inductance mutuelle entre deux phases statoriques	[H]
M_r	Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques	[H]
M_{sr}	Inductance mutuelle entre une phase de stator et une autre de rotor	[H]
M_{ss}	Inductance mutuelle entre deux phases statoriques	[H]
L_s	Inductances statoriques	[H]
L_r	Inductances rotoriques	[H]
L_{sf}	Inductance de fuite statorique	[H]
L_{rf}	Inductance de fuite rotorique	[H]
J	Moment d'inertie	[Kg.m ²]
f	Coefficient de frottement	-
f_{sa}, f_{sb}, f_{sc}	Coefficient de court-circuit	-

N_s	Nombre de spires dans un enroulement statorique	-
P	Nombre de paires de pôles	-
F	Fréquence	[Hz]
t	Temps	[s]

Introduction générale

Introduction générale

Le système d'entraînement électrique est l'un des fondations pour une industrie moderne, son rôle est d'exécuter quelque entraînement afin d'accomplir une tâche ou procédé.

Actuellement, la maintenance préventive est devenue une tendance à cause de la complexité des systèmes industriels, où un arrêt inutile d'une installation ou une anomalie non détectée ou mesure incorrecte d'une mesure contrôlée par les systèmes, affectent directement sur la productivité.

Par conséquent une obligation de mettre un système de détection et localisation de défauts DLD en permanence pour surveiller les systèmes d'entraînements pour diminuer les facteurs cités précédemment.

La surveillance et le diagnostic ainsi la détection de tous les incidents est a pour but d'augmenter la disponibilité du système industriel « système d'entraînement » et maintenir une bonne qualité de service ceci réduit le coût direct et indirect de la maintenance des équipements industriels.

Avant de parler sur le diagnostic d'un système d'entraînement électrique, il faut savoir en premier c'est quoi un système d'entraînement électrique ?

Un système d'entraînement électrique est un système électromécanique de conversion d'énergie depuis une énergie électrique en une énergie mécanique et l'exploiter en plusieurs manières pour entraîner tous les types de machines de production (convoyage, ventilation ...). Dans sa forme simple, il contient une source d'alimentation qui fournit l'énergie électrique au système, un moteur électrique, une charge mécanique à entraîner, un convertisseur statique relie la source et le moteur afin de le commander pour fournir une tension et un courant même avec une fréquence réglable, des capteurs et un contrôleur supervise l'ensemble pour améliorer sa performance comme sa stabilité et sa robustesse.

Par conséquent, il est très intéressant de développer des techniques et méthodes de diagnostic permettant de détecter de manière anticipée les défaillances et améliore la fiabilité et la disponibilité des systèmes d'entraînements électriques.

A cet effet, de nombreuses méthodes de diagnostic ont été développé dans ces dernières décennies. Le choix d'une telle ou telle méthode est lié à des critères, comme la connaissance que l'on souhaite obtenir sur le système, et aussi à la complexité de ce système.

Cependant, on a deux grandes catégories des méthodes sont utilisées dans le domaine du diagnostic : les méthodes de diagnostic à base de modèles analytiques et les méthodes sans modèles. La première catégorie est la plus familière aux automaticiens. Elle suppose la connaissance approfondie du système sous forme de modèle et repose sur le suivi des

paramètres et des grandeurs de la machine où la modélisation de système est une base pour construire ce type de diagnostic, au moyen d'algorithmes d'observation et de traitement des résidus. Le principal avantage de ces méthodes réside dans l'intégration d'une connaissance a priori du système et donc un filtrage de l'information. Quant aux méthodes sans modèle analytique, elles sont basées sur l'extraction d'informations par le traitement des signaux mesurés et qui peuvent fournir des informations significatives sur les défauts. Les performances de ces méthodes sont étroitement liées à la base de données de diagnostic par les indicateurs de défauts retenus à la précision d'analyse des mesures ainsi la justesse des appareils de mesure et d'extraction des signaux.

Notre travail s'intéresse à la surveillance et au diagnostic des défauts des systèmes d'entraînements électriques, il s'articule autour de quatre chapitres.

Dans le premier chapitre nous présenterons un rappel sur la constitution du système d'entraînement électrique et les différentes défaillances pouvant l'affecter. Nous avons cité les différentes techniques et méthodes employées dans le domaine de surveillance et de diagnostic. Une classification a été proposée et présentée en deux grandes parties : méthodes à base de modèle analytique (espace de parité, observateur, redondance analytique...) et méthode dites sans modèle (traitement de signal, reconnaissance de forme, experts...). Dans la fin de ce chapitre une position de problème a été mise où la suite des chapitres sera une tentative pour résoudre ce problème.

Dans le deuxième chapitre nous avons réalisé des modèles mathématiques réellement représentatifs du comportement du système afin de mieux comprendre les phénomènes à prendre en compte. Ce chapitre sera consacré à la modélisation de la **MAS** fonctionnant en régime sain et en régime défaillant suivi de la validation de ces modèles par simulation sur Matlab. L'approche signal a été validée dans ce chapitre aussi. Une technique de diagnostic a été développée, elle se base sur le traitement et l'analyse du signal temporel ou fréquentiel du courant statorique. Pour cela un modèle avec une analyse spectrale est utilisé pour la simulation. Les scénarios de simulation sont faits avec des valeurs numériques précises.

Dans le chapitre trois, nous avons établi un système automatique de diagnostic pour la détection et la localisation des défauts statoriques de la **MAS** à base de logique floue **FL**. Ce chapitre sera consacré à établir une méthode de diagnostic automatique pour la **MAS** sans modèle analytique en temps réel qui travaille simultanément avec la machine afin de surveiller et détecter lors d'un défaut statorique, suivi de la validation de ce système par simulation sur Matlab.

Nous terminons ce mémoire par une conclusion portant sur les travaux effectués et par une présentation des perspectives et des résultats de recherche pouvant être envisagés.

**Chapitre I. Etat de l'art des systèmes
d'entraînement électriques et leurs diagnostics**

Chapitre I. Etat de l'art des systèmes d'entraînement électrique et leurs diagnostic

I.1 Description d'un système d'entraînement électrique

I.1.1 Définition d'un système d'entraînement :

Un système d'entraînement c'est l'un des composants essentiels des processus industriels ils sont indissociables de la production industrielle, ils jouent un rôle fondamental dans les machines et les installations lors des processus de fabrication et les processus logistiques et aussi un moyen pour faciliter notre vie quotidienne comme les ascenseurs, les machines à laver, les escalators, les portes motorisées et les malaxeurs.

Dans les industries ces systèmes d'entraînement électrique absorbent aujourd'hui une grande partie d'énergie électrique totale (60% de la consommation de l'énergie électrique) la conséquence de cette consommation électrique importante c'est l'augmentation des coûts d'exploitation (coûts d'exploitation trop élevés).

Les systèmes d'entraînement électriques convertissent l'énergie électrique d'un réseau ou d'une batterie en énergie mécanique et utilisent la force qui en découle pour exécuter des mouvements.

Un système d'entraînement électrique ou système électromécanique convertit l'énergie électrique en puissance mécanique (un moteur électrique entraînant une charge

$$P_e = U \times I \rightarrow P_m = T_{em} \times \omega \text{ et vice-versa (une turbine entraînant un alternateur)}$$
$$P_m = T_{em} \times \omega \rightarrow P_e = U \times I.$$

Cette transformation d'énergie est contrôlée généralement par un convertisseur électronique (Redresseur, gradateur, onduleur ou hacheur selon l'entraînement ou l'application).[1]

I.1.2 Constitution d'un système d'entraînement

Les moteurs électriques ont garanti la puissance d'entraînement dès les premiers pas dans le domaine des systèmes d'entraînement. D'autres composants se sont ajoutés au fur et à mesure tout au long du parcours qui a conduit aux systèmes d'automatisation et aux technologies d'installations modernes d'aujourd'hui. Un réducteur monté en aval assure la fonction d'un convertisseur mécanique : En fonction des besoins de la machine à entraîner ou de l'installation, le réducteur adapte la vitesse constante fournie par le moteur électrique et son couple. Le moteur électrique est la plupart du temps un moteur triphasé. Dans les motoréducteurs, le moteur électrique et le réducteur forment une unité compacte [2].

Du fait de la complexité des installations, les exigences en matière de systèmes d'entraînement augmentent. La plupart des processus nécessitent en plus d'une vitesse convertie une vitesse réglable. Un convertisseur de fréquence monté en amont du moteur électrique est utilisé. Il convertit la fréquence et l'amplitude fournies par le réseau de sorte que la vitesse et le sens de rotation puissent être modifiés. La fréquence et l'amplitude deviennent des variables réglables qui peuvent être utilisées pour piloter des processus spécifiques dans les machines entraînées et les convoyeurs [2].

Cependant, l'éventail des systèmes d'entraînement de dernière génération est loin d'être complet. Actuellement, la limite entre systèmes d'entraînement et automatisation est floue. Les freins garantissent une sécurité accrue en empêchant tout mouvement dans l'installation lorsque l'entraînement est désactivé. Les codeurs montés sur le moteur déterminent à tout moment les caractéristiques principales du mouvement généré (vitesse, couple ou position actuelle). En fonction de la complexité de l'installation et de ses exigences, une électronique performante, des systèmes de pilotage et un logiciel permettent de piloter les processus [2].

Un système d'entraînement électrique généralement contient les composants suivants :

- a- Une source d'alimentation
- b- Un convertisseur électronique
- c- Un moteur électrique
- d- Une charge mécanique
- e- Des capteurs et un contrôleur (unité de calcul et de commande)

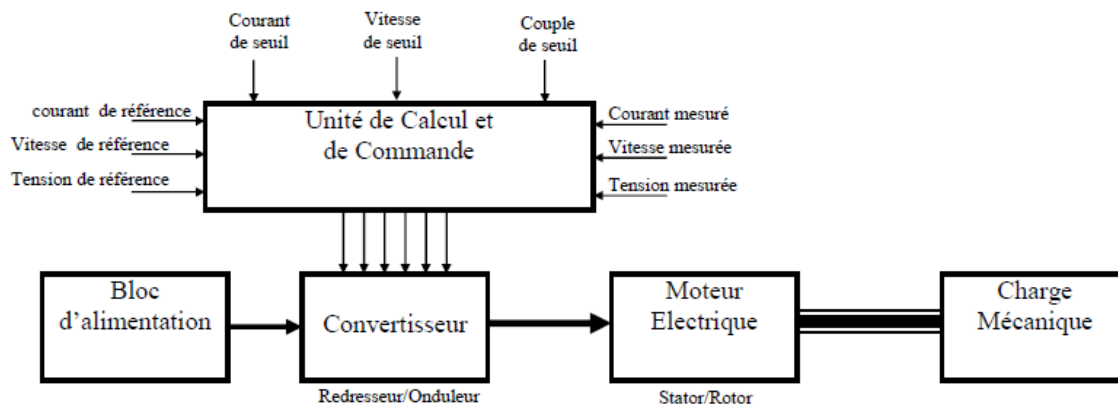


Figure I.1 - Schéma global d'un entraînement et ses constitutions.

I.1.2.1 La source d'alimentation :

C'est la source d'énergie fournie (électricité) pour alimenter tout le système d'entraînement et ses composants. Généralement dans le domaine industriel, cette énergie

électrique peut provenir de deux sources différentes, depuis le réseau de distribution d'un fournisseur ou bien d'un groupe électrogène.

I.1.2.2 Le convertisseur électronique :

C'est un dispositif qui convertit l'énergie électrique en énergie électrique sous plusieurs formes pour l'alimentation du moteur électrique. Ce convertisseur peut être un redresseur, un gradateur, un onduleur ou un hacheur.[1]

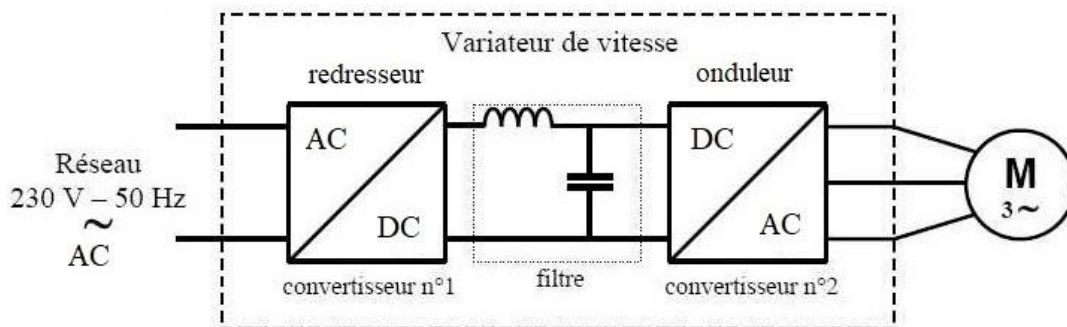


Figure I.1– Schéma de principe du variateur de vitesse.

I.1.2.3 Le moteur électrique :

C'est la partie essentielle pour la conversion de l'énergie (machine entraînée). Cette partie qui peut être un moteur à courant continu ou un moteur à courant alternatif, développe un couple qui doit être supérieur au couple résistant au démarrage afin de pouvoir vaincre la charge. Une fois le moteur tourne, la vitesse prend de la valeur (Accélération), ainsi que la force électromotrice ou la tension induite, ce qui provoque la diminution du courant absorbé et le couple développé par le moteur jusqu'à où le couple devient égal au couple résistant ; par conséquent, la vitesse se stabilise et elle devient constante. Enfin, l'accélération, la décélération et le réglage de la vitesse de rotation sont commandés par l'ensemble convertisseur et commande.[1]

Selon le courant d'alimentation du moteur, on peut distinguer deux catégories de moteurs :

I.1.2.3.1 Moteur à courant continu "MCC" :

Lorsqu'on utilise les moteurs à courant continu dans les faibles puissances, le champ magnétique de la machine est produit par des aimants permanents.

Dans les grandes puissances, le champ magnétique est produit par un enroulement d'excitation séparé.

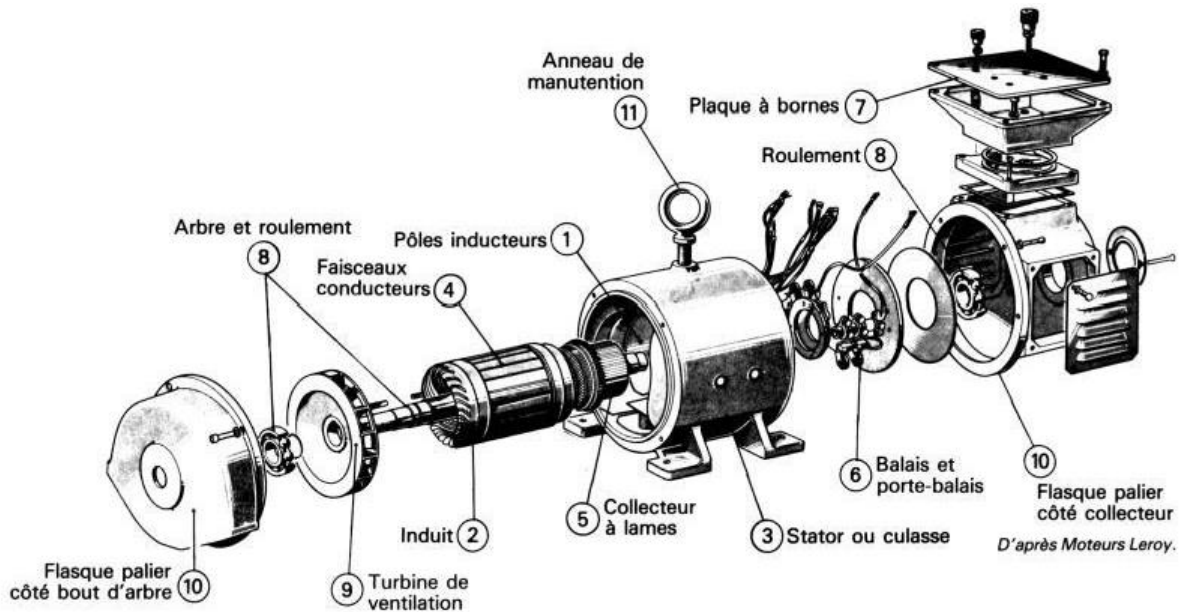


Figure I.2- Schéma des composants d'un moteur à courant continu.

I.1.2.3.2 Moteur à courant alternatif :

Dans ce type de moteurs on alimente leur enroulement par un courant monophasé ou polyphasé, la fréquence du signal courant a une influence sur la vitesse de rotation du moteur.

Il existe deux types dans les moteurs AC, **le moteur synchrone** suit la fréquence du courant d'alimentation par contre dans **les moteurs asynchrones "MAS"** il y a une différence entre la fréquence d'alimentation et la fréquence de rotation du moteur (glissement), ce genre de moteur est très utilisé d'une manière massive et disponible dans tous les usines et les industries.

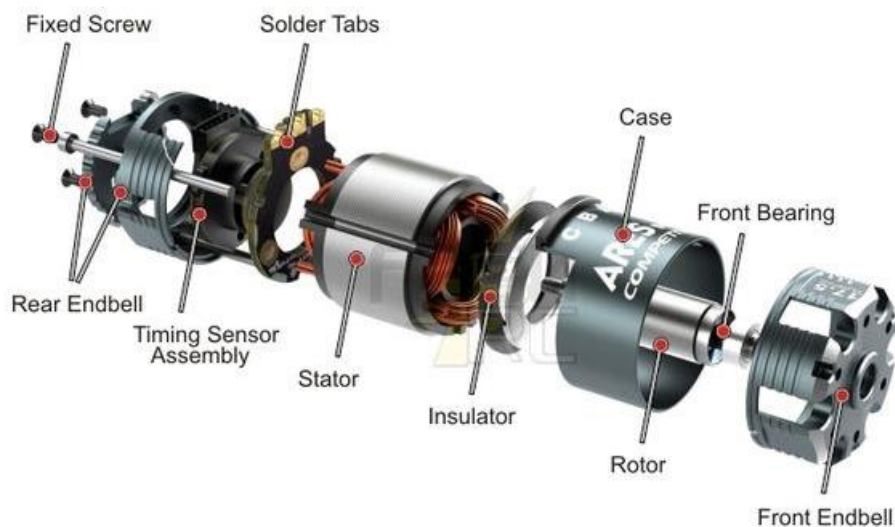


Figure I.3 - Schéma des composants d'un moteur à courant alternatif (synchrone).

I.1.2.4 La charge mécanique :

Appelée aussi les machines de production (machine entraînée), on peut citer les pompes, ventilateurs, monte-charges, grues, scies, les pompes centrifuges, mélangeurs, Broyeurs, Séparateurs, concasseurs...etc., Ces machines de productions sont entraînées par des moteurs électriques et qui exercent sur ces moteurs un couple résistant qui peut être constant ou variable en fonction de la variation de la vitesse. Cette dernière fonction appelée caractéristique mécanique des machines de productions ($T_r=f(\omega)$).[1]

Les charges mécaniques présentent de grande variété des caractéristiques de couple-vitesse. Les couples de charge dépendent généralement de la vitesse.

En générale on peut regrouper ces charges mécanique ou machines de production en plusieurs groupe selon la vitesse et le couple venant par la suite.

I.1.2.4.1 Caractéristiques mécaniques des machines de production (machines entraînées ou charges entraînée) :

Les caractéristiques d'un moteur sont généralement représentées par les diagrammes vitesse - couple ou vitesse – puissance.

A. Charge à caractéristique constante :

Où le couple est indépendant de la vitesse de rotation, mais la puissance mécanique dépend de la vitesse.

Il existe plusieurs exemples pour ce type de charge tels que : grues, tapis roulant, transporteur, élévateur, treuils ... (appareils de manutentions).

B. Charge à caractéristique linéaire :

Où le couple est linéairement proportionnel à la vitesse de rotation, et la puissance mécanique est proportionnel au carré de la vitesse.

Exemple : Mixeurs, Génératrices, Malaxeurs, Essoreuses, ... (Machines de type rouleau ou laminoir).

C. Charge à caractéristique parabolique :

La caractéristique couple-vitesse est parabolique ou le couple est proportionnel au carré de la vitesse de rotation. La puissance mécanique est proportionnelle au cube de la vitesse et peut être excessive à des vitesses élevées.

Exemples : Ventilateurs, Soufflantes, Pompes, Ventilateurs de tirage, Centrifugeuses (Machines de type ventilateur) ...

D. Charge à caractéristique hyperbolique :

La caractéristique couple-vitesse est hyperbolique où le couple est inversement proportionnel à la vitesse de rotation. Cette charge nécessite généralement un couple important lors de démarrage et lors de son fonctionnement à faible vitesse.

Exemples : les fraiseuses, Enrouleuses, Broyeurs, Moulins, Concasseurs... (Machines de traction).

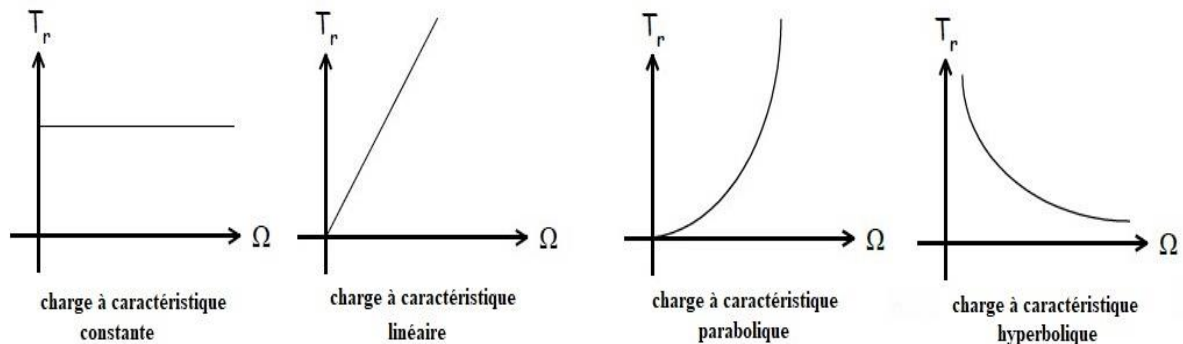


Figure I.4– Les différents types de charge mécanique et leurs caractéristiques.

Certaines charges peuvent être composée d'une combinaison des caractéristiques de charge précédente.

I.1.2.5 Unité de calcul et de commande :

C'est une partie informatique qui est à la base de l'électronique numérique et aussi contient les capteurs des signaux et le contrôleur ou le processeur qui est la base de cette unité. Elle sert à comparer les signaux de sorties qui proviennent de la partie mécanique et électrique avec les signaux d'entrées (signaux de références) afin de commander le convertisseur électronique pour l'alimentation du moteur électrique. En outre, cette partie s'occupe de la surveillance, de la régulation, de la protection et de la mesure...etc. [1]

Les entraînements électriques font partie intégrante des machines modernes et de la construction d'installation et se trouvent dans les domaines suivants :

- Convoyage (convoyeurs à bande, convoyeurs à rouleaux, etc.)
- Levage (transstockeurs, grues, tables de levage, convoyeurs verticaux, etc.)
- Systèmes de manipulation et robots
- Lignes d'embouteillage
- etc.

I.2 Les défauts dans un système d'entraînement électrique tournant

Dans un système d'entraînement électrique, Nous avons la probabilité d'une défaillance au niveau de ces composants.

Selon des statistiques de maintenance et pour des systèmes utilisant des machines asynchrones à cause de leurs disponibilités dans les usines et les industries, on peut distinguer quatre parties où on a l'apparition des défauts :

- ❖ La machine (moteur)
- ❖ Le convertisseur statique
- ❖ La transmission mécanique
- ❖ Le capteur

I.2.1 La machine :

I.2.1.1 La constitution de la machine asynchrone :

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe : on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieure ou sont fermés sur eux-mêmes en permanence, on définit deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil. Toutefois, nous admettrons que sa structure est électriquement équivalente à celle d'un rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit. Dans ce travail, nous nous intéressons à la machine asynchrone à cage d'écureuil.[4]

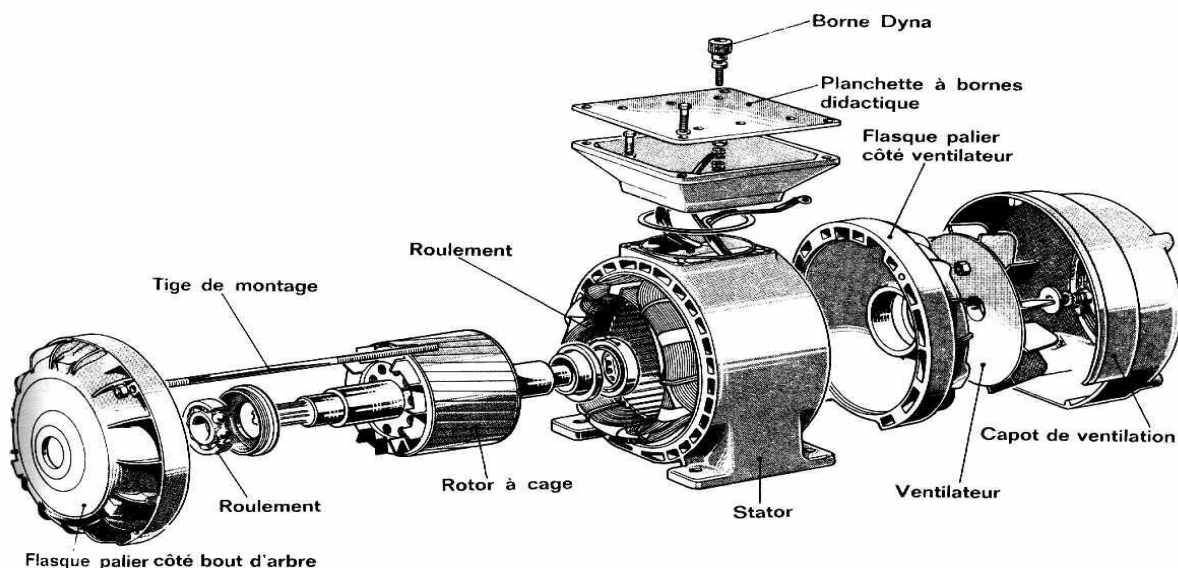


Figure I.5 – Schéma des composant d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil.

I.2.1.1.1 Le stator :

Il est constitué des enroulements bobinés réparties dans les encoches du circuit magnétique qui constituent trois bobines indépendantes qui créent un champ magnétique tournant lorsqu'on les alimente par un système de tensions ou courants triphasé (**figure I.7**). Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine. Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines.

Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre. L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique.[4]

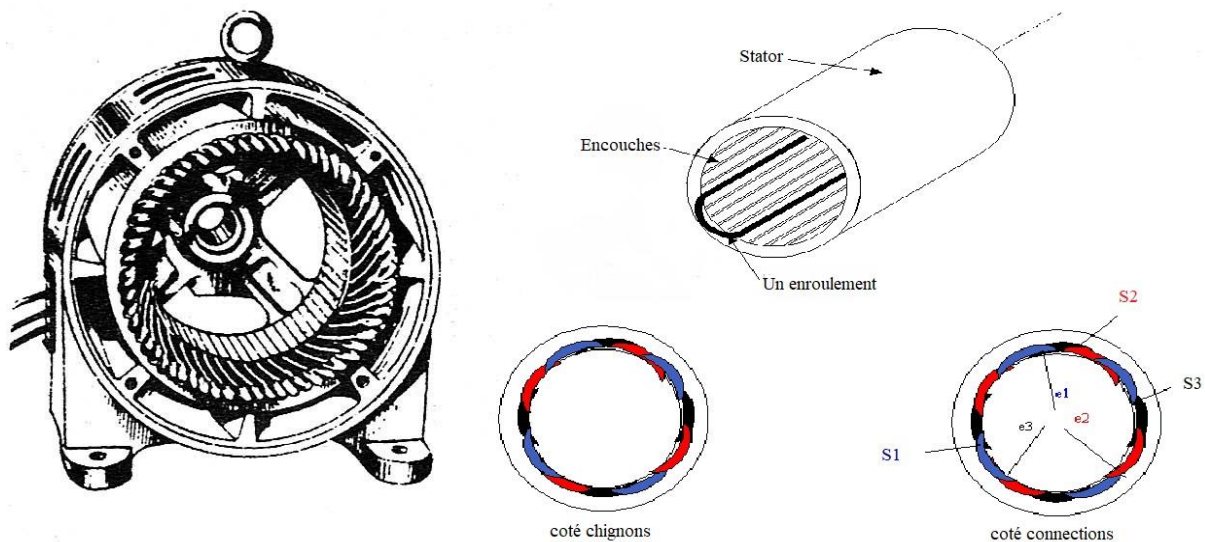


Figure I.6– Différentes vues et coupes d'un stator du moteur asynchrone.

I.2.1.1.2 Le rotor à cage

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barre rotoriques) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor (**figure I.8**). Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné.

Dans le cas de rotor à cage d'écureuil, les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettées dans les tôles du rotor. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre. Le moteur à cage d'écureuil est beaucoup plus simple à construire que le moteur à rotor bobiné et, de ce fait, son

prix de revient est inférieur. De plus, il dispose d'une plus grande robustesse. Il constitue la plus grande partie du parc de moteurs asynchrones actuellement en service.

Son inconvénient majeur est qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et faible couple). C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développés deux autres types de cages (rotor à double cage et rotor à encoches profondes).[4]

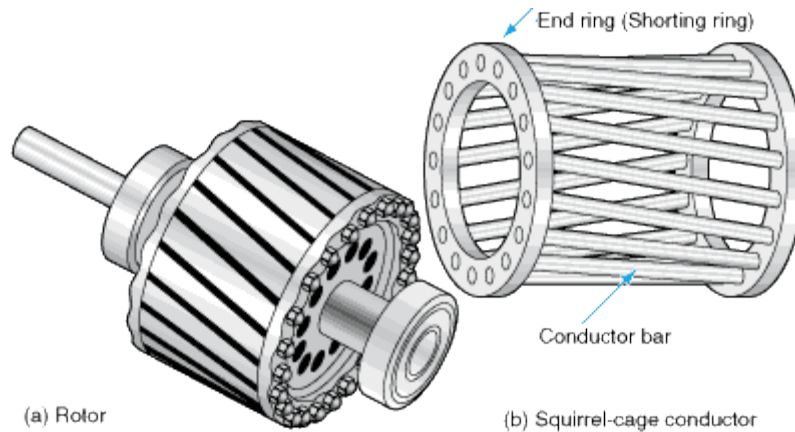


Figure I.7– Le rotor à cage d'écureuil du moteur asynchrone.

I.2.1.1.3 Les organes mécaniques

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi accouplement. Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement est fonction des efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale, etc....), des efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges, des efforts de torsion (couple électromagnétique transmis en régime permanent, transitoire). Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dû aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Ils sont généralement à roulements pour les machines de petite et moyenne puissance.[4]

I.2.1.2 Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone

Les défaillances peuvent être d'origines diverses, électriques, mécaniques ou bien encore magnétiques. Leurs causes sont multiples et peuvent se classer en trois groupes [4] :

- ❖ Les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts : surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), survoltage d'alimentation, problème d'isolation électrique, usure des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations, etc.

- ❖ Les amplificateurs de défauts : surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement, etc.
- ❖ Les vices de fabrication et les erreurs humaines : défauts de fabrication, composants défectueux, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine, etc.

Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50 kW à 200kW) a donné les résultats suivants (**figure I.9**) [4] :

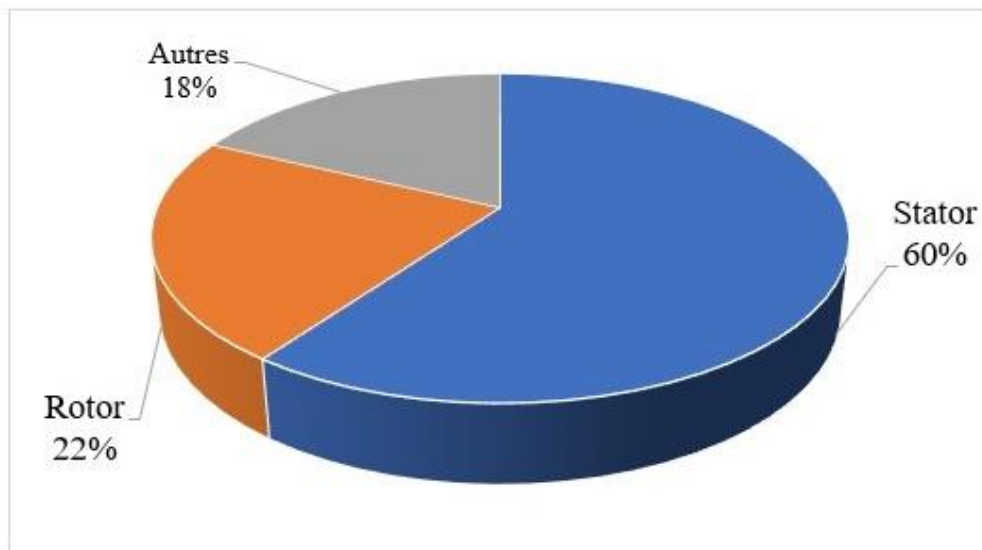


Figure I.8 – Proportion de défauts d'un moteur asynchrone.

La répartition des pannes dans les différentes parties du moteur est présentée sur la figure I.10 [4] :

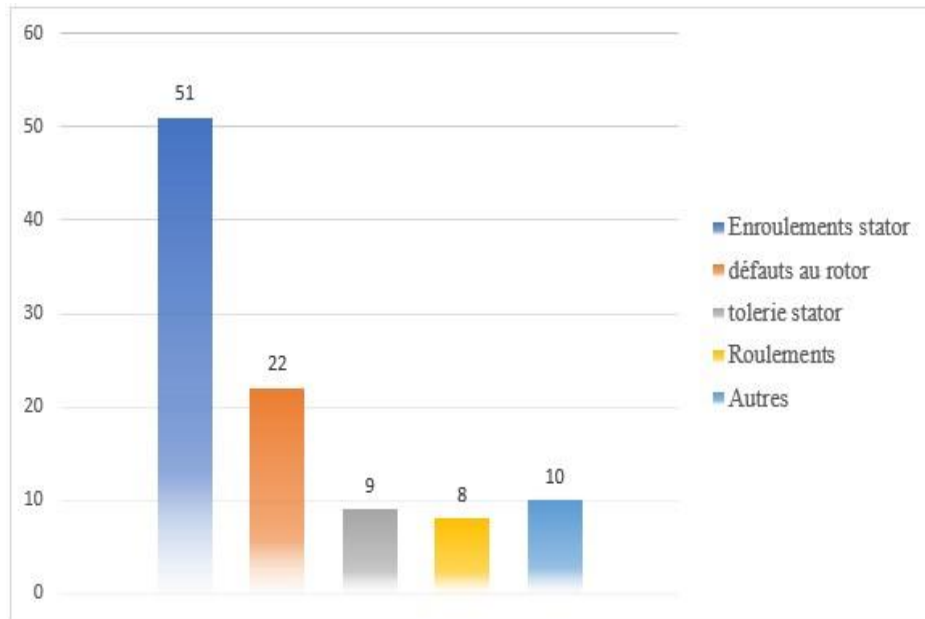


Figure I.9 – Répartition des pannes sur les machines asynchrones de faibles ou moyennes puissances.

Une autre étude statistique faite pour IEEE en 1985 sur des machines de grande puissance (de 100 kW à 1 MW) donne des résultats qui sont présentés sur la figure I.11.[4]

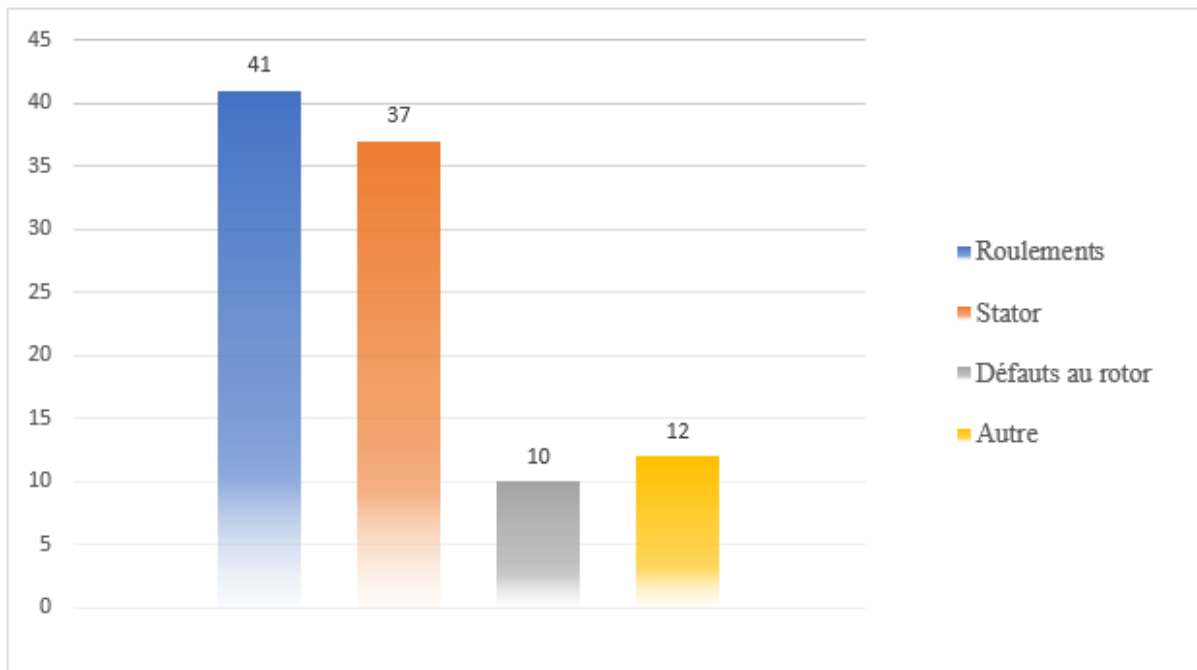


Figure I.10– Répartition des pannes sur les machines asynchrones de grandes puissances.

Les contraintes mécaniques sont plus grandes pour ces types de machines ce qui explique le taux élevé des pannes dues aux roulements. Celles-ci exigent une maintenance mécanique accrue.[4]

I.2.1.3 Les causes des défauts :

La figure I.12 présente les phénomènes à l'origine des défauts dans la machine. La principale source de défauts provient de la mécanique. La deuxième cause de défauts est la surchauffe du moteur qui accentue le vieillissement des composants. La troisième cause de défauts référencée est le claquage d'isolants conduisant à des courts-circuits. Notons que de nombreuses sources de défauts ne sont pas bien connues.[5]

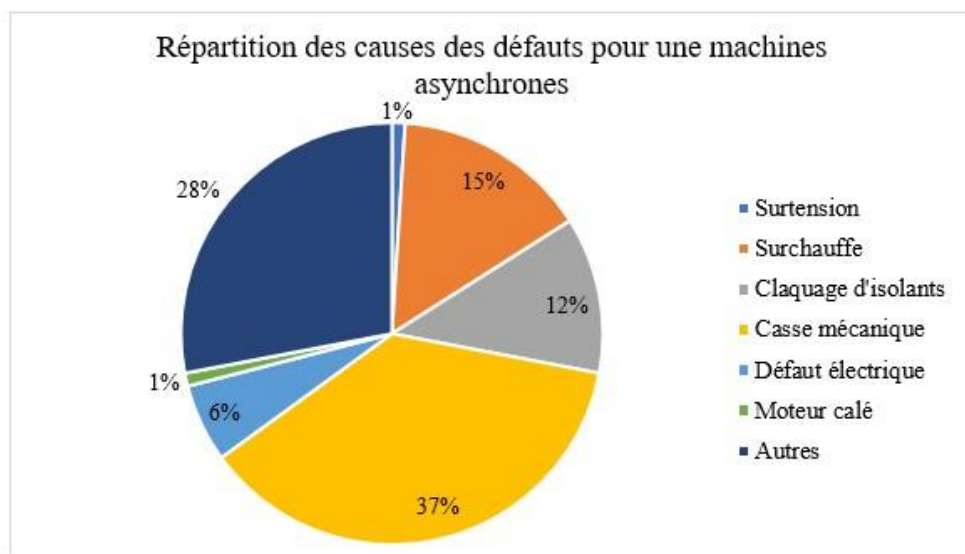


Figure I.11 – Répartition des causes des défauts pour une machines asynchrones.

La figure I.13 précise les conditions qui aggravent le défaut. La première source d'aggravation provient de l'usure des éléments avec l'âge et la durée de service. Cette usure est renforcée par les différentes conditions de fonctionnement (surchauffe, humidité, exposition, ...).[5]

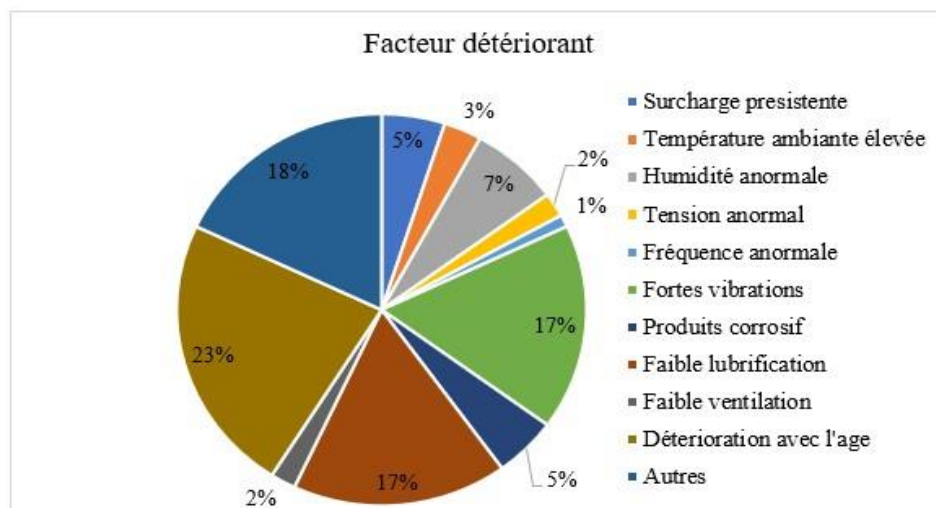


Figure I.12– Répartition des facteurs aggravant des défauts.

En règle générale, toute différence par rapport au point de fonctionnement nominal contribue à aggraver le défaut naissant voire à le faciliter.[5]

I.2.1.4 Les principaux défauts dans la machine

Les principaux défauts pouvant se produire dans une machine à cage peuvent être classés comme suit :

- ❖ Défauts au stator résultant d'une ouverture ou d'un court-circuit sur au moins une phase du stator.
- ❖ Connexion anormale des enroulements stator.
- ❖ Barre ou anneau de court-circuit au rotor cassé.
- ❖ Excentricité dynamique ou statique.
- ❖ Axe plié (proche de l'excentricité dynamique).
- ❖ Roulements.

Une étude conduite pour **IEEE** a établi une statistique des différents défauts pouvant se produire sur une machine électrique (**figure I.14**).[5]

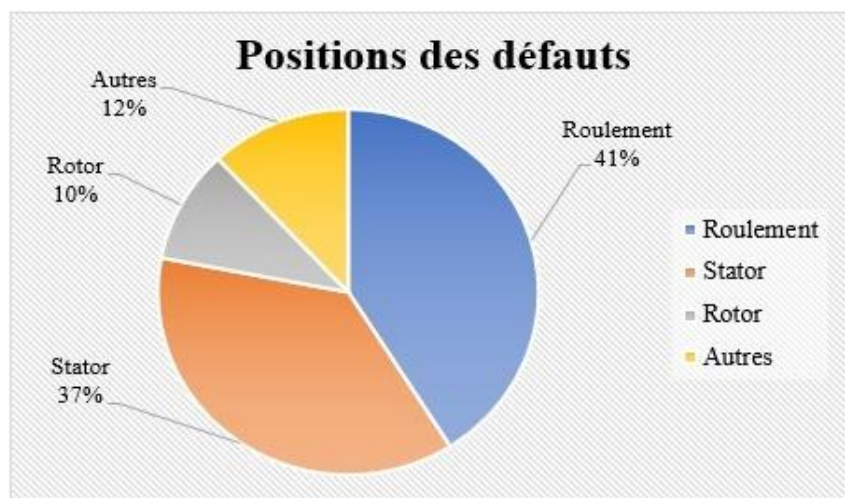


Figure I.13– Répartition des défauts suivant le composant.

Cette répartition tend à montrer que les défauts se situent principalement dans la chaîne mécanique et dans le stator. Du fait des conditions de fabrication des moteurs, les défauts dans le rotor sont de moins en moins fréquents. Nous allons détailler les principales caractéristiques des défauts cités.[5]

I.2.1.4.1 Les défauts liés aux organes mécaniques de la machine :

A. Défauts de roulements

Les roulements à billes jouent le rôle d'interface électromécanique entre le stator et le rotor. Ces éléments assurant le positionnement correct de l'axe de la machine, constituent des éléments critiques. La figure I.15 présente la répartition des défauts roulement.

Il ressort de la figure I.15 que la principale source de défaillances est constituée par les roulements qui assurent la bonne rotation et le maintien de l'axe du rotor. Dans les causes de défaillance des roulements, nous pouvons noter l'usure due au fonctionnement normal et les phénomènes de courant d'arbre qui renforcent cette usure. Un défaut dans les roulements affecte certes la vitesse de l'axe du rotor mais aussi la répartition du flux dans l'entrefer qui n'est plus alors constant (phénomène d'excentricité). Ceci se traduit donc par une évolution des grandeurs électromagnétiques et donc des courants dans la machine.[5]

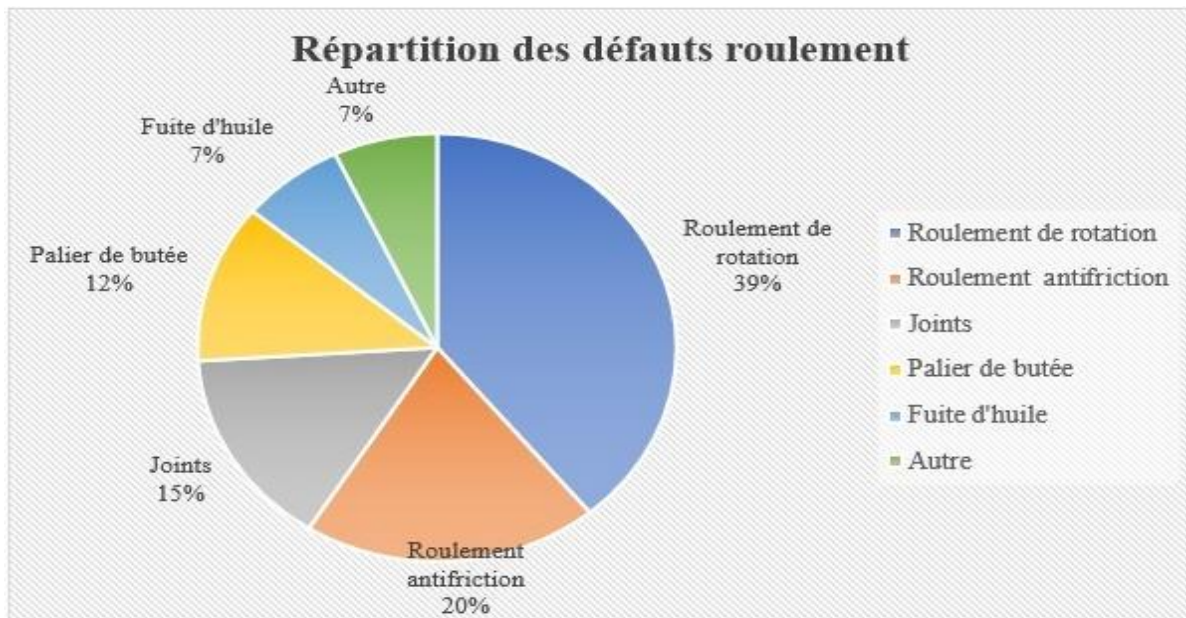


Figure I.14– Répartition des défauts roulement.

Ce type de défaut est le plus fréquent sur les machines de fortes puissances. Il est généralement lié à l'usure du roulement et plus précisément une dégradation des billes, ou de la bande de roulement. Ses causes possibles :

- L'usure due au vieillissement.
- La température de fonctionnement élevée.
- La perte de lubrification.
- L'huile contaminée (par des paillettes métalliques issues de la dégradation des billes ou de la bande de roulement).
- Le défaut de montage.
- Les courants d'arbres (Shaft Current).

Les conséquences directes de cette défaillance sur les roulements sont :

- Des trous dans les gorges de roulement intérieures et extérieures.
- L'ondulation de leur surface de roulement.
- L'attaque des billes.
- La corrosion due à l'eau.
- Défaut de graissage, problème dû à la température.
- Décollement, effritement de surface provoqué par une surcharge.

Sur le système, ce type de défaut se traduit par des oscillations du couple de charge, une apparition de pertes supplémentaires et un jeu entre la bague interne et la bague externe du roulement entraînant des vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinale de la machine. Dans le cas le plus défavorable, la présence d'un roulement défectueux peut amener au blocage du moteur. [4,5]

B. Défaillances du flasque :

Les défauts créés par les flasques de la machine asynchrone sont le plus généralement causés à l'étape de fabrication. En effet, un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement des roulements à billes, ce qui induit une excentricité au niveau de l'arbre de la machine. Il est possible de détecter ce type de défaillance par une analyse vibratoire ou une analyse harmonique des courants absorbés par la machine.[22]

C. Défaillances de l'arbre :

L'arbre de la machine peut laisser paraître une fissure due à l'utilisation d'un mauvais matériau lors de sa construction. A court ou long terme, cette fissure peut mener à une fracture nette de l'arbre provoquant ainsi un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone. Les milieux corrosifs peuvent aussi affaiblir la robustesse de l'arbre de la machine. Par exemple, l'humidité peut provoquer des microfissures et conduire à une destruction complète de la machine. Une excentricité statique, dynamique ou mixte peut induire des efforts considérables sur l'arbre moteur, amenant ainsi une fatigue supplémentaire. Une analyse vibratoire, une analyse par ultrason, une analyse fréquentielle des courants absorbés ou simplement une analyse visuelle de l'arbre de la machine permet de détecter ce type de défaillance.[22]

I.2.1.4.2 Les défauts liés au stator de la machine :

La figure **I.16** présente la répartition des défauts stator. La très grande majorité des défauts au stator des machines est due à des défauts d'isolement.

L'existence de courants de court-circuit, que ce soit entre phase ou par rapport à la terre, constitue donc un phénomène important. A terme, ces défauts, destructifs pour les couches de vernis protecteur des enroulements, conduisent à une machine non équilibrée et à son changement de classe d'isolation.[5]

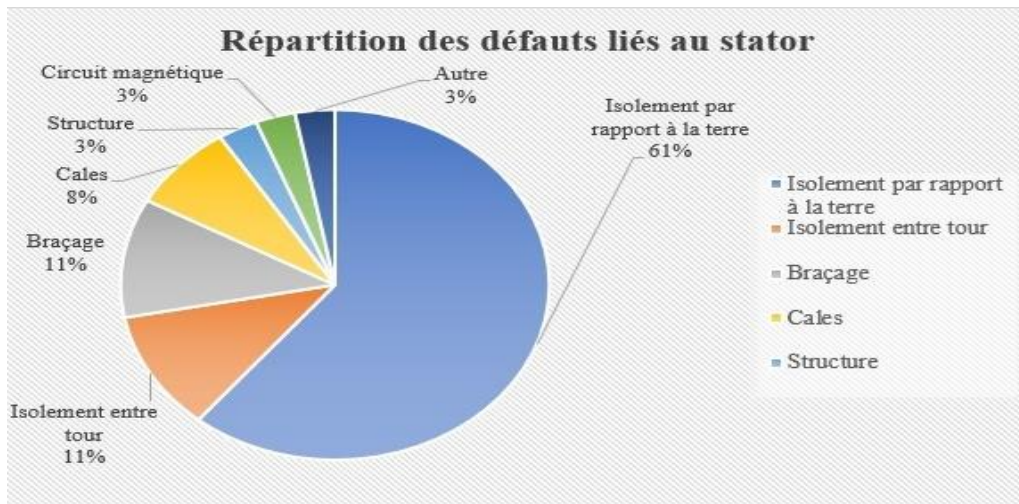


Figure I.15 – Répartition des défauts liés au stator.

Pour le stator, les défaillances sont principalement dues à un problème :

- ❖ Thermique (surcharge, ...)
- ❖ Électrique (diélectrique, ...)
- ❖ Mécanique (bobinage, ...)
- ❖ Environnemental (agression, ...)

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit :

A. Défauts d'isolant dans un enroulement :

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits.

En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique, ...) engendrent des phénomènes thermiques se traduisant par une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et mécanique.[4]

De ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ces limites, ce matériau se dégrade de manière prématurée ou accélérée, puis finit par ne plus assurer sa fonction. Les différentes causes pour ce type de défaut sont [4] :

- Dégradation de l'isolant à la fabrication.
- Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- Vibrations mécaniques.
- Courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation.
- Vieillesse naturelle des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation 'normale', l'isolant finit naturellement par se dégrader.

- Fonctionnement dans un environnement sévère.

B. Court-circuit entre spires :

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne (apparition d'un 2^{ème} court-circuit).

Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut.[4]

C. Court-circuit entre phases :

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système.

L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs.

Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparaît. Les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases.[4]

D. Court-circuit phase/bâti :

Le bâti a généralement un potentiel flottant, mais pour des raisons de liaisons mécaniques, il est souvent relié à la masse. Si le potentiel est flottant, un court-circuit entre l'enroulement et le bâti n'a pas d'importance du point de vue matériel, excepté les effets capacitifs, le bâti prend alors le potentiel de l'enroulement à l'endroit du court-circuit.

Par contre, au niveau de la sécurité des personnes, ce type de défaut peut être très dangereux et il est alors nécessaire de mettre en place des dispositifs de protection (disjoncteurs différentiels). En présence de ce type de défaillance, la tension de la phase concernée ne change pas.

Cependant le courant circulant dans cette phase augmente avec la réduction de la résistance et de l'inductance. Cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la température pouvant entraîner des défauts d'isolant dans l'enroulement. De plus, cette défaillance va générer une composante homopolaire entraînant l'apparition d'un couple pulsatoire. Une mesure du courant de fuite pourrait permettre de détecter ce type de défaut.[4]

E. Défauts de circuit magnétique :

Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer le problème par des phénomènes de surchauffe, de surtension, d'élévation importante du courant, etc. [4]

I.2.1.4.3 Les défauts liés au rotor de la machine :

La figure I.17 permet de se rendre compte que la majorité des défauts rotor ont trait à la cage.

La seconde source de défauts provient d'une déformation de l'axe du rotor. Ces deux défauts ont pour origine des contraintes de fonctionnement top fortes sur la cage qui provoquent sa déformation. Ces défauts s'expliquent par les méthodes employées auparavant pour la construction de la cage (soudure des différents constituants). Avec les techniques de coulage de la cage, la part de celle-ci dans les défauts rotor et les défauts au rotor eux-mêmes ont diminué.[5]

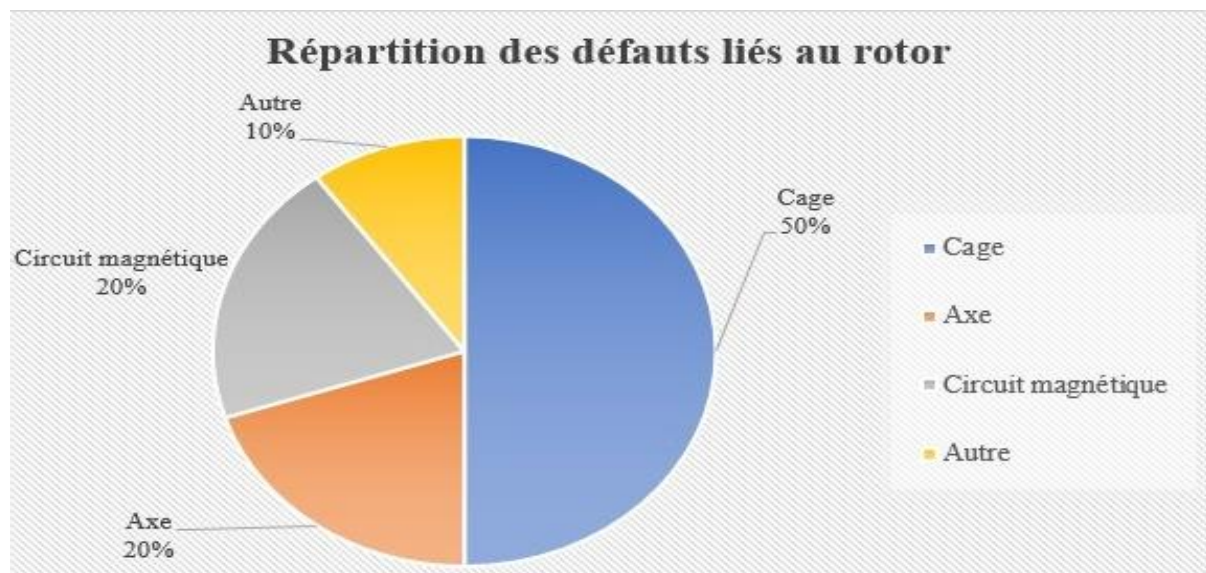


Figure I.16 - Répartition des défauts liés au rotor.

Pour le rotor, les défaillances sont essentiellement dues à un problème :

- ❖ Thermique (surcharge, ...)
- ❖ Électromagnétique (force en $B^2(t)$, ...)
- ❖ Résiduel (déformation, ...)
- ❖ Dynamique (arbre de transmission, ...)
- ❖ Mécanique (roulement, ...)
- ❖ Environnemental (agression, ...)

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du rotor, peuvent être définis comme suit :

A. Ruptures de barres :

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine.

Ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées.[4]

B. Ruptures d'anneaux

La rupture de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité, ...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure.

La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres.[4]

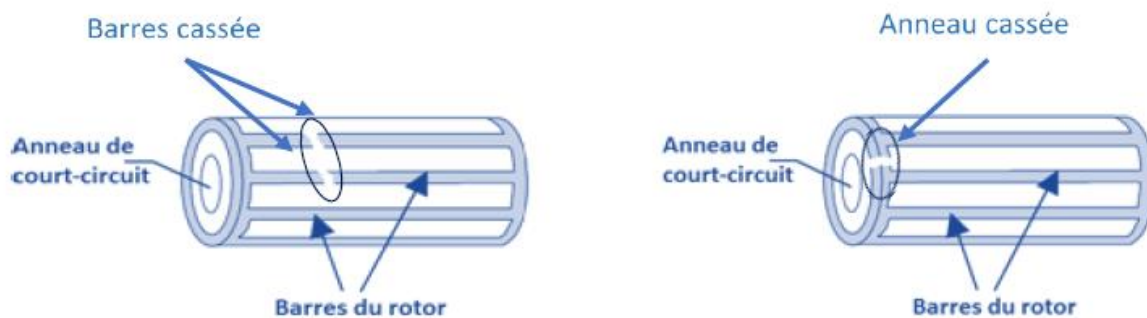


Figure I.17 - modélisation schématique de rupture de barres ou rupture d'anneaux

C. Excentricité statique et dynamique :

Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor (**figure I.19**)).

Ce phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique) dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage).

Trois cas d'excentricité sont généralement distingués :

- L'excentricité statique, le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe.
- L'excentricité dynamique, le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe.
- L'excentricité qu'on pourrait qualifier de 'mixte', associant les deux cas précédemment cités.

Ce défaut modifie le comportement magnétique ainsi que mécanique de la machine.

En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur le noyau statorique ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation. D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements.[4]

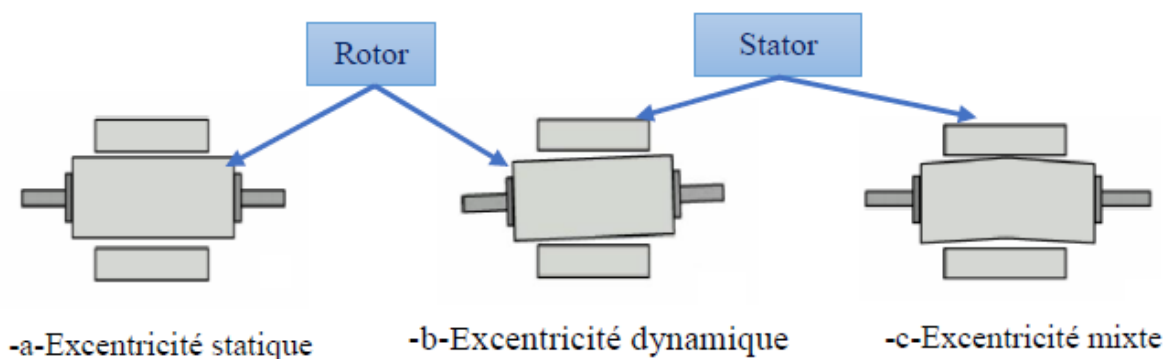


Figure I.18 - Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique et mixte.

I.2.2 Le convertisseur statique :

Afin d'assurer la variation de vitesse des moteurs électriques mais aussi la conversion de l'énergie, de nombreuses machines se voient associer un convertisseur. Ainsi, de nos jours, on trouve dans un grand nombre de procédés industriels, des associations entre des convertisseurs statiques et des machines électriques (pompage, levage...). Cela permet de fournir aux moteurs des tensions et des courants de fréquence variable servant à commander la machine en couple ou en vitesse.[4]

Ces convertisseurs statiques sont composés de plusieurs éléments d'électronique de puissance comme les IGBT, diodes et les condensateurs...etc. Ces éléments électroniques sont très sensibles et peuvent être défectueux à cause de plusieurs facteurs comme l'augmentation de la température et les surcharges ...etc.

Nous devons aussi prendre en compte les défauts intervenant au niveau du convertisseur statique. Les statistiques de défaillances montrent que 30% des défauts sont imputables aux convertisseurs. Dans ces défauts, il faut encore distinguer les défauts inhérents aux composants et ceux liés à la commande.

D'après la structure de base des convertisseurs, ils sont composés de bras, constitués de deux interrupteurs avec leur diode montée en anti-parallèle (**figure I.20**).[5]

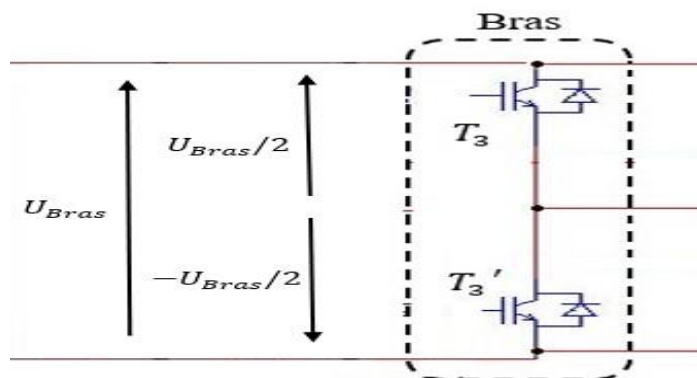


Figure I.19– Schéma de principe de base d'un bras de convertisseur statique.

Deux types de défaut < composant > sont possibles [5] :

- Composant toujours fermé : Ce défaut est destructif pour la source continue car il provoque un court-circuit de la source. Par ailleurs, il entraîne la destruction du composant voire au fonctionnement des protections de la source. On aboutit alors à l'autre type de défaut.
- Composant toujours ouvert : Ce défaut peut entraîner des contraintes sur le moteur car il provoque des déséquilibres que la commande ne peut que partiellement compenser.

Quant aux défauts dans la transmission de la commande aux interrupteurs, ils proviennent :

- De la rupture de la connexion entre le pilote et l'interrupteur qui est alors maintenu dans l'état précédant la rupture.
- De l'inhibition du pilote suite à la détection d'un court-circuit ou une tension d'alimentation insuffisante.

I.2.3 Transmission mécanique :

I.2.3.1 Origine des défauts :

Vu l'importance des réducteurs et la complexité de ces systèmes mécaniques, une analyse des défaillances de ces éléments a été réalisée. Le tableau (I.1) présente des statistiques sur les causes de défaillances et la figure (I.21) la localisation des défauts dans ces éléments à engrenages. Cette enquête a été réalisée par une société d'assurances.

Les défaillances sont principalement localisées dans les dents : ce sont les parties les plus sollicitées.

Origine des défauts	Pourcentage
Fabrication (calcul, assemblage, matériaux)	40
Exploitations (maintenance, ...)	43
Autres (machine adjacentes)	17

Tableau I.1 - Origine des défauts dans les éléments à engrenage.

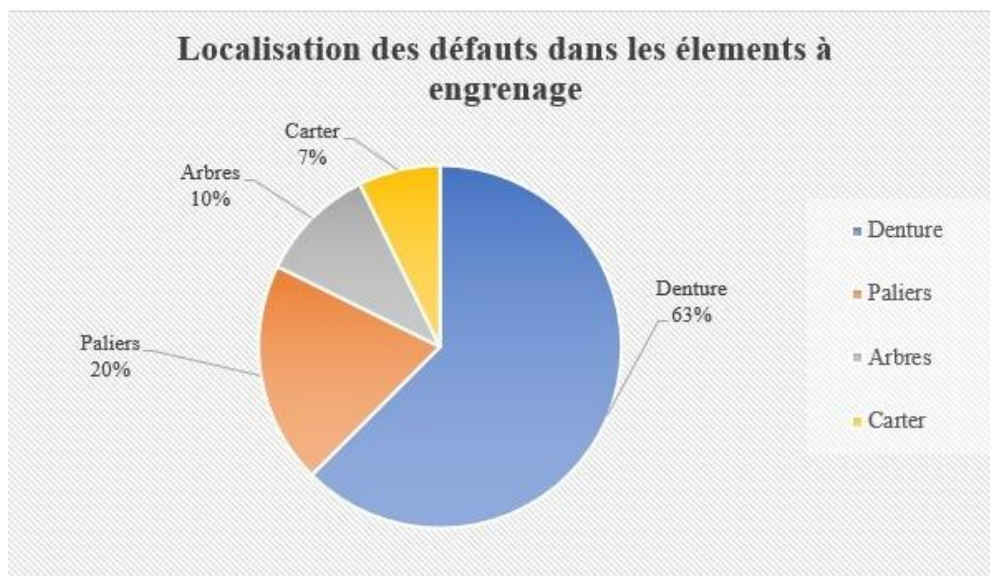


Figure I.20 – Localisation des défauts dans les éléments à engrenage.

On distingue principalement deux catégories de défauts :

- Les défauts affectant toutes les dents : usure, piqûres et ceux localisés sur des dents particulières : fissuration, écaillage.
- Les défauts localisés sur des dents particulières conduisent rapidement à la rupture de celles-ci, contrairement aux défauts telle que l'usure normale.[5]

I.2.3.2 Les défauts répartis sur toutes les dents

L'usure : L'usure est un phénomène local caractérisé par un enlèvement de matière provoqué par glissement des deux surfaces en contact l'une sur l'autre. Son développement est lié à charge, à la vitesse de glissement des surfaces et à la présence d'éléments abrasifs.

Les piqûres (pitting) : Ce sont des trous peu profonds qui affectent toutes les dents. Ils se produisent sur des engrenages en acier de construction relativement peu dure. Ces processus évoluent généralement lentement en comparaison avec la durée de vie des réducteurs.[5]

I.2.3.3 Les défauts localisés sur certaines dents

L'écaillage : Il se caractérise par la présence de trous plus profonds et plus étendus que pour le pitting.

L'écaillage se manifeste dans les engrenages cémentés, qui sont les plus répandus à l'heure actuelle car ils permettent de passer des couples importants avec des dimensions réduites pour un coût de fabrication moindre. Ce défaut évolue alors rapidement vers la rupture car la pression superficielle est trop grande.

Le grippage : Ce défaut provient de la destruction brutale du film d'huile sous l'effet de la température. Le grippage est favorisé par des vitesses élevées, de gros modules, de faibles nombres de dents en contact. Il dépend aussi de la qualité du lubrifiant utilisé et des conditions de mise en service.

La fissuration : Elle apparaît surtout pour des aciers fin durcie par traitement thermique. Elle résulte des contraintes au pied de la dent qui dépassent la limite de fatigue du matériau ; elle est généralement située du côté de la dent sollicitée en traction.[5]

I.2.3.4 Autres défaillances mécaniques

Au stator, il n'y a pas de pièces mobiles donc a priori pas de défaillances mécaniques.

Cependant, il peut apparaître des phénomènes d'oxydation liés à l'environnement de la machine et plus précisément au taux de salinité qui influe sur l'étanchéité et les contacteurs.[4]

I.2.4 Le capteur

Les mesures issues des capteurs contiennent l'information la plus importante pour la loi de commande du système. Le comportement du système en boucle fermée dépend de l'information délivrée par les capteurs sur l'état du système et son environnement. [22]

Un comportement non désiré, voire dangereux du système, peut avoir lieu à la suite d'un défaut de capteur. Les capteurs sont affectés par du bruit, des biais, des dérives ou une perte totale du capteur, etc... [22]

L'origine des défauts de capteurs est variée et peut provenir d'erreurs humaines comme de défauts de fabrications. Le vieillissement des soudures et des contacts ainsi que les perturbations électromagnétiques peuvent également mener à un problème de capteurs.[22]

On peut classer les défauts de capteurs selon leur origine en deux types [23] :

I.2.4.1 Les erreurs :

L'erreur peut être définie comme la différence entre la valeur délivrée par le capteur et la valeur physique que l'on cherche à mesurer.

Trois sortes d'erreurs en instrumentation métrologique ont été définies :

1- Les erreurs de justesse :

Les erreurs de justesse sont la somme algébrique des erreurs systématiques entachant l'indication d'un instrument de mesure dans des conditions déterminées d'emploi. Les principales causes d'erreurs systématiques sont :

- *les erreurs sur les caractéristiques du capteur* : erreur sur la sensibilité ou sur la courbe d'étalonnage. Le vieillissement et la dégradation peuvent modifier cette courbe.

- *les erreurs sur la valeur d'une grandeur de référence* : prenons comme exemples le décalage de zéro et la valeur inexacte de la température de référence d'un thermocouple.

- *les erreurs dues au mode et aux conditions d'emploi* : les erreurs de finesse (qualité exprimant l'aptitude d'un capteur à donner la valeur de la grandeur à mesurer sans modifier celle-ci par sa présence) et les erreurs de rapidité (qualité d'un capteur qui exprime sa façon de suivre temporellement les variations de la grandeur à mesurer).

- *les erreurs dans l'exploitation de données brutes de mesure* : l'écart à la linéarité d'un capteur supposé linéaire.



Figure I.21 - un capteur infrarouge

2- Les erreurs de fidélité :

Les erreurs de fidélité sont caractérisées par l'indice de dispersion obtenu pour une série de mesures consécutives. Cet indice est en général représenté par un écart quadratique moyen. Les erreurs de fidélité sont accidentelles ou aléatoires. Elles sont de faible amplitude (bruits de mesure) ou de grande amplitude (mesures aberrantes passagères). Les principales causes de ces erreurs sont :

- **les erreurs dues à des grandeurs d'influence** : les grandeurs d'influence agissant sur le capteur sont la cause de variations des caractéristiques métrologiques introduisant ainsi une incertitude de mesure. Les caractéristiques les plus affectées sont la sensibilité, le décalage initial et parfois la linéarité. Citons les bruits de fond, les inductions parasites (vibrations), les fluctuations de tension de sources d'alimentation, les variations de température, etc.
- **les erreurs de mobilité** : en dessous d'une certaine valeur, les variations de l'excitation n'entraînent pas des variations décelables du signal de sortie.
- **les erreurs de résolution (quantification)** : ce sont les plus petites variations perceptibles de l'information de sortie délivrée par un capteur, dans les conditions de référence.
- **les erreurs de réversibilité (hystérésis)** : elles sont définies par la différence des indications d'un capteur lorsqu'on atteint la même valeur de la grandeur mesurée soit en croissant, soit en décroissant.
- **les erreurs de répétabilité** : elles sont caractérisées par un indice de dispersion des indications d'un capteur pour une série de mesures consécutives effectuées dans les mêmes conditions, par un même opérateur, avec les mêmes méthodes et à des intervalles de temps assez courts.

3- Les erreurs de précision :

Les erreurs de précision sont des erreurs globales qui regroupent les erreurs de justesse et les erreurs de fidélité.

I.2.4.2 Les pannes :

Un défaut est appelé panne s'il entraîne un dysfonctionnement du processus ou un arrêt de celui-ci. Plusieurs types de pannes peuvent être dénombrés :

- les pannes naissantes qu'on ne peut distinguer parfois des erreurs à variations aléatoires,
- les pannes passagères ou pannes intermittentes dont la modification s'apparente aux erreurs accidentelles.
- les pannes permanentes qui entraînent l'arrêt du fonctionnement du capteur.
- les pannes catastrophiques qui peuvent mettre en danger le produit fabriqué, le processus, le personnel, etc.

I.3 Etude critique des méthodes de diagnostic :

I.3.1 Définition et objectif du diagnostic :

I.3.1.1 Définition :

La définition du diagnostic selon la norme **AFNOR** et **CEI** stipule que :

« Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test ».[10]

Cette définition résume les deux tâches essentielles du diagnostic :

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

I.3.1.2 Objectif du diagnostic :

L'objectif d'un système de diagnostic est de prévoir l'apparition d'un défaut le plus rapidement possible et le plus précisément possible (détection), afin de localiser le défaut ainsi l'identifier pour intervenir et applique le type de maintenance qui convient. En effet, pour pouvoir expliquer ce principe avec plus de précision, nous rappellerons les fonctions du diagnostic telle que la détection, la localisation, l'identification des défauts.[10]



Figure I.22– Différentes étapes de diagnostic.

I.3.1.3 Terminologies et concepts :

Le tableau (I.2) suivant donne la définition de quelques termes utilisés dans le domaine de diagnostic.[10]

Terme	Définitions
Une anomalie	Est une particularité non conforme à la loi naturelle ou logique
La panne	Est l'inaptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise. Une panne résulte toujours d'une défaillance.
Un défaut	Est tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique de référence lorsque celui-ci est en dehors des spécifications. Les défauts sont classifiés d'une façon similaire aux défaillances.
Une défaillance	Est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques.
Une perturbation	Consiste en tout phénomène conçu comme normal influençant un processus, non ou mal, représenté par un modèle de référence.
Un résidu	Est un signal conçu pour être un indicateur d'anomalies fonctionnelles ou comportementales, nul en absence de défauts et non nul en leur présence.
Un symptôme	Est un caractère distinctif d'un état fonctionnel ou comportemental anormal.
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.
La sensibilité	Représente la capacité d'un système de diagnostic à générer des résidus sensibles aux défauts à détecter.
La supervision	Est la surveillance d'un système physique et la prise de décision appropriée en vue de maintenir son opération lors de l'apparition de défauts.

Tableau I.2 - Définition de quelques termes du domaine de diagnostic.

I.3.2 Les différentes étapes de diagnostic :

Le terme diagnostic correspond à la caractérisation du défaut, pour effectuer ce dernier il faut passer par un certain nombre d'étapes qui s'enchaînent.

I.3.2.1 La détection :

Cette opération permet de décider si le système est en fonctionnement normal ou non.[10]

- Probabilité de fausse détection : conduit à des arrêts ou des reconfigurations inutiles,
- Probabilité de non détection : peut conduire à une panne intolérable dans les systèmes à haut niveau de sécurité (aéronautique, nucléaire, ...etc).

I.3.2.2 La localisation :

C'est l'identification de l'élément qui a causé le défaut. Parfois il est impossible de localiser les interactions entre les composants du système et l'instrumentation. La solution est d'isoler un sous-système comportant des composants susceptibles de contenir le ou les défauts.[10]

I.3.2.3 L'identification :

L'objectif de l'identification est de caractériser plus finement le défaut et déterminer les causes qui ont engendré la défaillance constatée.[10]

I.3.3 Etude critique des méthodes de diagnostic :

I.3.3.1 Introduction :

D'une manière générale la détection et localisation de défauts pour la surveillance des systèmes d'entraînement électrique nécessite d'obtenir des symptômes caractéristiques du fonctionnement du procédé surveillé et de les analyser pour en déduire l'état du système.

Les méthodes traditionnelles de détection de défauts reposent sur des prélèvements statistiques ou des essais destructifs effectués sur des échantillons à tester : diagnostic de l'isolation, mesures vibratoires, tests chimiques,

Toutes ces techniques exigent un arrêt total des machines nécessitant une main d'œuvre qualifiée et induisant une perte de production donc un préjudice économique, ce qui justifie l'intérêt des recherches menées aujourd'hui en vue d'aboutir à une surveillance non destructive (en ligne) qui permet de détecter à 1^{er} défaut, donc éviter les dysfonctionnements ainsi que les opérations de maintenance lourdes et coûteuses associées

Ces méthodes de C.N.D (contrôle non destructif) se sont concrétisées grâce surtout aux outils de modélisation, des techniques de traitement de signal...

Les méthodes de DLD mises en œuvre s'orientent donc naturellement sur l'analyse de signal (sans ajout de capteur) et sur la redondance analytique.

Les grandes familles de méthodes de diagnostic de défauts sont présentées dans la figure ci-dessous. [5,6,7]

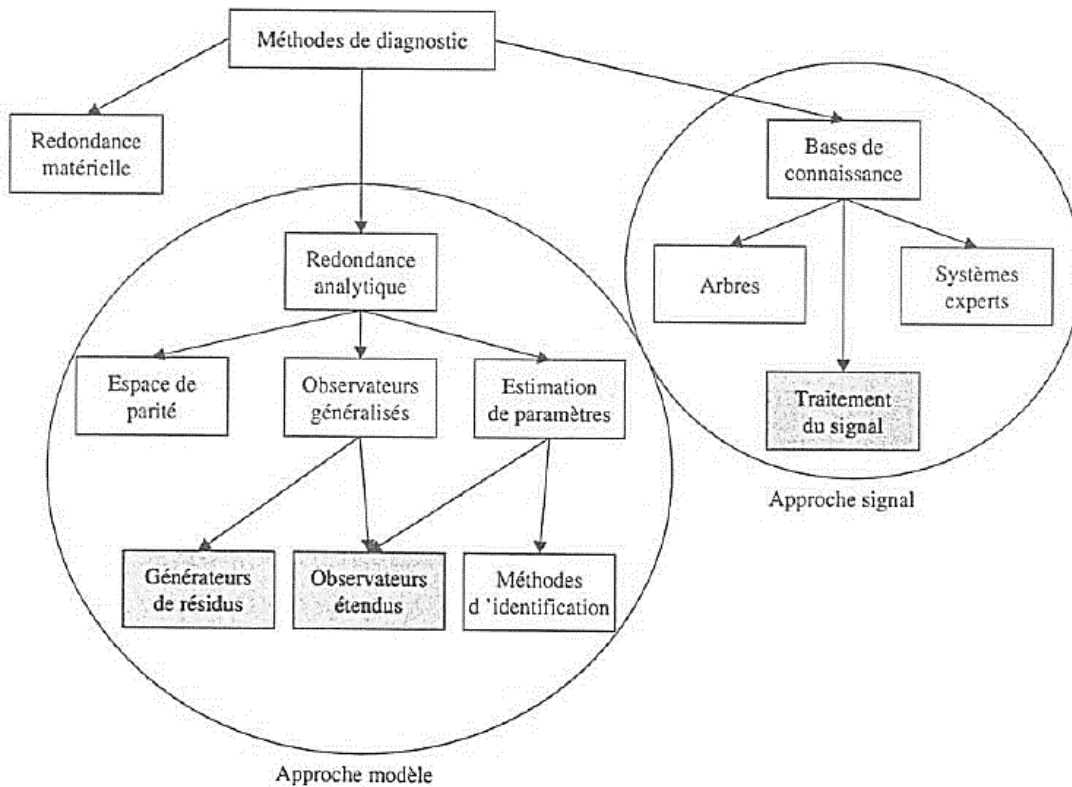


Figure I.23 – Les méthodes de diagnostic.

I.3.3.2 Les approches usuelles de diagnostic :

Il existe plusieurs approches pour la classification des méthodes de diagnostic on cite : (les méthodes externe et interne, les méthodes qualitatives et quantitatives, l'approche signal et modèle).

On va présenter deux groupes utilisés en diagnostic de systèmes physiques selon l'approche suivante :

- *Méthodes de diagnostic sans modèle analytique.
- *Méthodes de diagnostic basées sur les modèles analytiques

I.3.3.2.1 Méthodes sans modèle analytique (heuristiques ou traditionnel) :

Ces méthodes de surveillance nécessitent une bonne connaissance des systèmes et leurs composants, elles sont fruits de l'expérience et de l'expertise c.à.d. l'expérience de l'opérateur humain. Ces méthodes appelées aussi des méthodes qualitatives reposent sur les qualités et l'expérience de l'opérateur humain.

Ces méthodes utilisent des techniques comme les mesures pour la génération et la formalisation des symptômes, ces techniques ont permis de fournir des signaux (vibratoire, acoustique ou thermique).

Les méthodes sans modèles analytique reposent sur l'approche signal : rechercher dans les signaux mesurés les symptômes de défaut.

L'avantage de ces méthodes : la possibilité de n'utiliser que le modèle qualitatif donc aucun besoin des grandeurs numériques des paramètres ni des connaissances profondes sur la structure de système.

L'inconvénient de ces méthodes : 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. [7,5]

1. Reconnaissance de forme RDF :

Cette approche peut utiliser lorsque les observateurs sont de type numérique, utiliser dans des problèmes complexes comme le nucléaire, l'industrie automobile, le comportement humain, les réseaux téléphoniques ou la modélisation du procédé est très difficile à mettre en œuvre.

La reconnaissance de forme **RDF** repose sur le classement des objets ou formes en le comparant à des formes-types.

La procédure de diagnostic basé sur les techniques de reconnaissance de forme a quatre étapes principales détaillées dans la figure I.25 ci-dessous. [8,9]

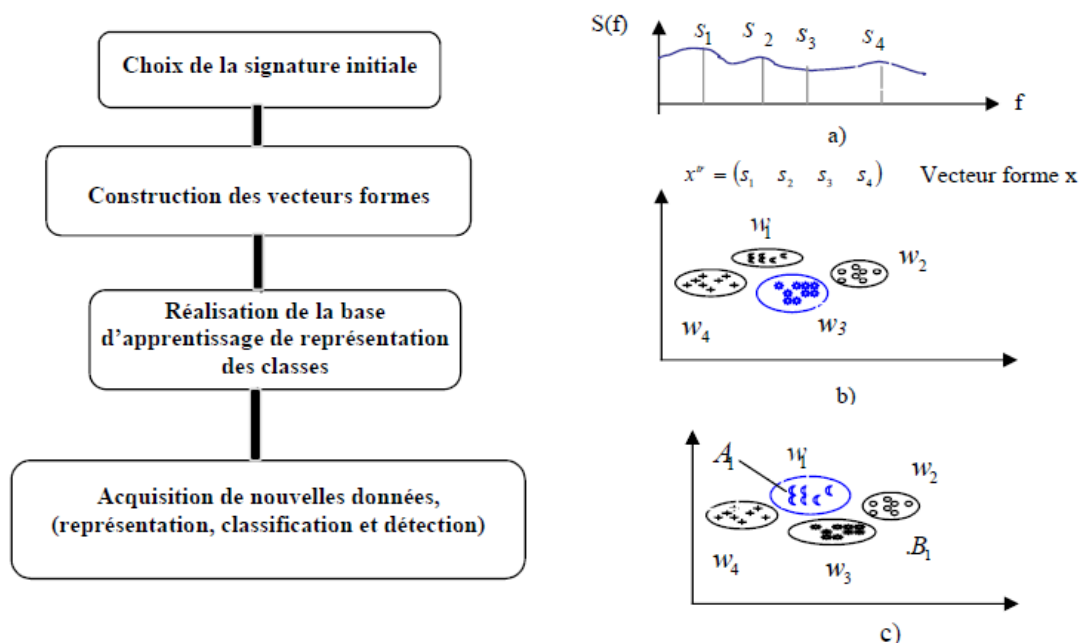


Figure I.24– Procédure et étape de diagnostic basé sur RDF.

2. Redondance matérielle :

Ou redondance physique Cette méthode consiste à multiplier physiquement les capteurs critiques d'une installation pour mesurer et/ou contrôler une variable particulière.

Un traitement des signaux issus des éléments redondants effectue des comparaisons et distingue l'élément défectueux en cas d'incohérence. Cette méthode est pénalisante en termes de poids, puissance consommée, volume et coût (d'achat et de maintenance). Elle est donc essentiellement réservée aux cas où la continuité de service est obligatoire (e.g. l'aérospatiale, le nucléaire). En effet, elle apporte l'avantage, une fois la défaillance détectée et localisée, de pouvoir utiliser la partie de l'équipement encore saine mais cette technique ne s'applique généralement que sur des capteurs.

Elle entraîne un cout important en instrumentation mais fiable, sûr et simple à implanter.
[10]

3. Réseaux de neurones artificiels :

Quand la connaissance sur le procédé à surveiller n'est pas suffisante et que le développement d'un modèle de connaissance du procédé est impossible, on utilise le modèle « boîte noir ».

Un réseau de neurone est un modèle de calcul inspirée du fonctionnement de vrais neurones humains en termes de schématisation de conception, Cette technique est placée dans la famille des méthodes de l'intelligence artificielle qu'ils enrichissent en permettant de prendre des décisions s'appuyant davantage sur la perception que sur le raisonnement logique formel.

Un RNA est en fait un système informatique constitué d'un nombre de processeurs élémentaires (ou nœuds) interconnectés entre eux qui traite -de façon dynamique- l'information qui lui arrive à partir des signaux extérieurs.

Un réseau de neurones comprend un certain nombre de couches de neurones interconnectés. Couches d'entrées, couches cachées et couches de sortie. L'entrée représentée par les nœuds de sources fournit des poids d'accès physiques pour l'application des signaux d'entrées. Les neurones dans la couche cachée, se comportent en détecteurs de caractéristique, tandis que, les neurones dans la couche de sortie présentent à l'utilisateur les conclusions obtenues par le réseau, ou la réponse aux signaux d'entrées. Une loi d'apprentissage permet d'ajuster les poids des connexions afin d'avoir les performances désirées.

Les avantages des réseaux de neurones :

- La rapidité, très utile lorsque le diagnostic doit être conduit en ligne.
- Un réseau de neurones est robuste surtout vis-à-vis du bruit.

Toutefois un réseau de neurone présente des inconvénients :

- L'apprentissage peut être lent et difficile.
- L'apprentissage est gourmand en temps de calcul. Par ailleurs, il doit être réalisé sur toutes les données à la fois, avec le risque que le réseau oublie les résultats précédents.
- Il est nécessaire de posséder des jeux de données sur toutes les conditions de fonctionnement et en particulier pour les fonctionnements défectueux.

- Un réseau de neurones ne fonctionnera pas forcément correctement hors de sa plage d'apprentissage.
- Une fois entraîné, un réseau de neurones n'est pas flexible. Si de nouvelles données interviennent, il faudra recourir à un nouvel apprentissage. Cependant celui-ci peut être effectué en ligne.

L'intérêt des réseaux de neurones dans le domaine de diagnostic se résume en deux points :

- Le premier point est la faculté de réseau de neurones d'être utilisé en tant que règle de décision dans un processus d'automatisation de l'opération du diagnostic.
- Le second point est la faculté d'apprentissage et de mémorisation d'un grand volume d'information. [6,9,8]

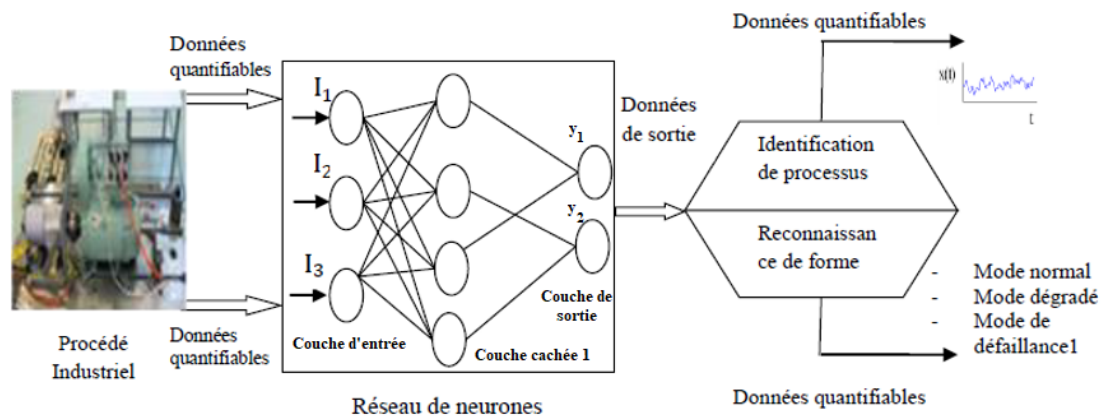


Figure I.25– Procédure et étape de diagnostic basé sur RNA.

4. Logique floue :

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

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

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

- La fuzzification ► L'inférence ► La défuzzification.

Le bloc fuzzification contient en général un traitement de données préliminaires, ces données sont alors traitées par des règles linguistiques, ce qui nécessite leur définition par des

fonctions d'appartenance. La fuzzification fournit une série de variables floues, réunies par un vecteur, qui va être introduit au bloc d'inférence.

Dans le bloc inférence, les valeurs des variables linguistiques sont liées par plusieurs règles qui doivent tenir compte du comportement statique et dynamique du système (des effets du système à diagnostiquer).

Dans la dernière étape, il faut transformer la valeur floue (linguistique) en une valeur déterminée pour déduire l'état du système, ceci se faisant dans le bloc défuzzification.[9]

Les systèmes d'inférence floue (**SIF**) sont une des applications les plus courantes de la logique floue. Ils implémentent des concepts, sous la forme de variables linguistiques, ainsi qu'un raisonnement déductif, à l'aide de règles floues. La structure de base d'un **SIF** est constituée de [10] :

- Un univers de discours qui contient les fonctions d'appartenance des variables d'entrée et de sortie à des classes. Ces fonctions peuvent avoir différentes formes, les plus usuelles étant les formes triangulaires, trapézoïdales et gaussiennes.
- Une base de connaissances qui regroupe les règles liant les variables d'entrée et de sortie sous la forme « SI...ALORS ».
- Un mécanisme de raisonnement qui base son fonctionnement sur la logique du modus Ponens généralisée.

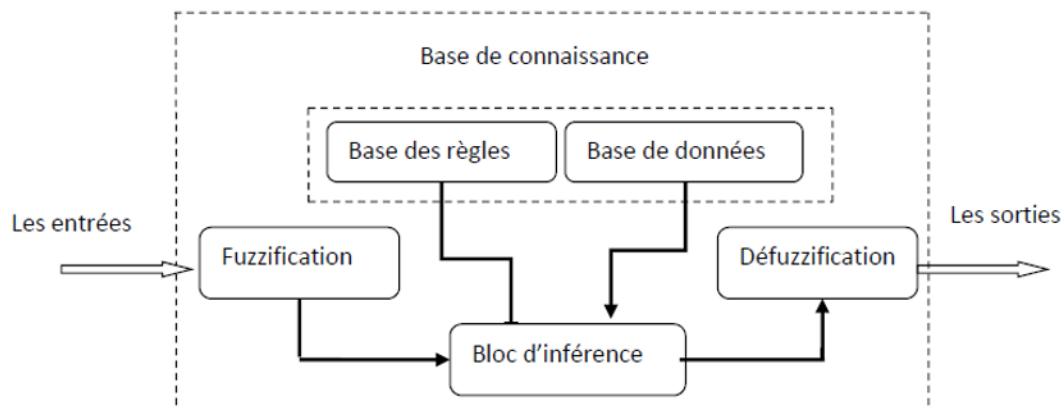


Figure I.26– Structure générale d'un système flou.

5. Systèmes experts :

Les systèmes experts sont des outils conçus pour pouvoir modéliser l'approche des experts dans un domaine spécifique, ils permettent de formaliser leurs connaissances et de fournissent un mécanisme pour les exploiter, aussi, ils fournissent des résolutions dépend à la situation donnée.

L'architecture générale d'un système expert se compose de plusieurs éléments (**figure I.28**), dont on peut citer les éléments principaux suivants :

Une base de connaissance : elle regroupe l'ensemble des connaissances des expertises nécessaire pour la résolution des problèmes du domaine.

Une base de faits : qui contient les informations initiales relatives au domaine, s'enrichit progressivement des conclusions ou des nouveaux faits déduits par le moteur d'inférence.

Un moteur d'inférence : représente l'organe de la résolution, son fonctionnement basé sur une exploitation indépendante des informations de la base de connaissance et la base de faits (méthode de résolution) pour la résolution de problème donné. Par ailleurs, le moteur d'inférence produit dans son mécanisme de résolution des nouveaux faits qui sont ajouté à la base de faits.

La méthode de résolution par système expert inclus les étapes suivantes :

1-la sélection de règles dans la base de connaissance en fonction des faits établis.

2-la résolution des conflits entre les règles sélectionnées.

3-l'exécution en indiquant les conditions de déclenchement et les conséquences jusqu'à ce que le but recherché soit atteint, par exemple le diagnostic.

En diagnostic, ce type d'approche est adapté aux problèmes nécessitant la manipulation d'une quantité importante de données non homogènes. [8,9]

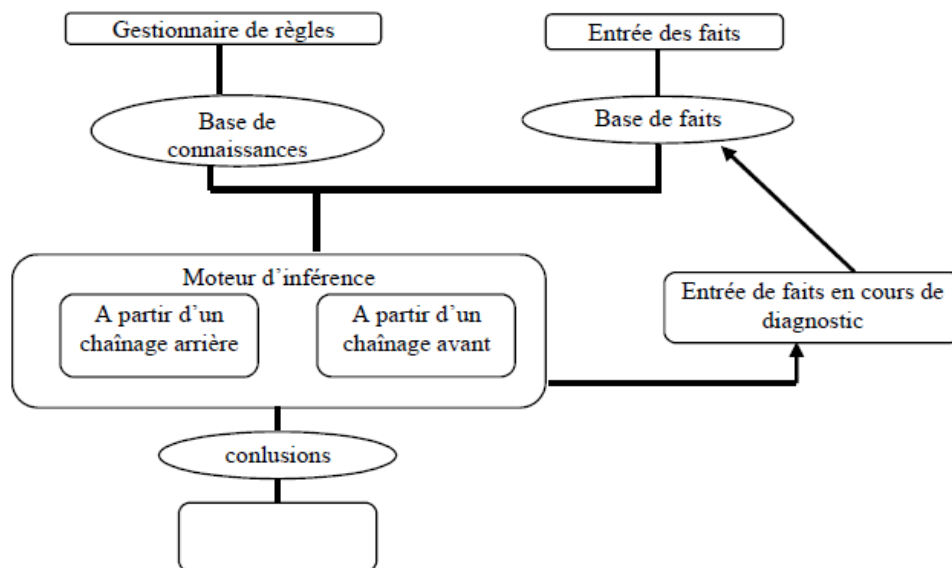


Figure I.27– Structure générale d'un système expert de diagnostic.

6. Arbre de défaillance :

Il s'agit d'une méthode déductive qui vise à identifier pour chaque événement indésirable, l'ensemble des événements élémentaires qui peuvent contribuer à son apparition. Cette méthode est très employée dans les domaines de l'automobile, du nucléaire, de la chimie, de l'aéronautique, etc... pour évaluer la fiabilité d'un système.

Elle consiste en une recherche exhaustive des combinaisons possibles d'événements qui conduisent à un défaut de fonctionnement ou une panne. La représentation la plus utilisée est

celle qui associe à chaque événement indésirable la liste de tous les enchaînements logiques des événements jusqu'à arriver à des événements de base qui ne nécessitent pas de développements plus poussés.

Quand l'arbre est établi et les probabilités des événements élémentaires connues, la probabilité de l'événement indésirable et les combinaisons les plus probables conduisant à son apparition peuvent être déterminées.

Dans le domaine des entraînements, des arbres de défaillances ont été utilisés pour analyser les pannes de cartes analogiques de commande. L'idée était d'analyser les causes de quelques combinaisons de signaux logiques issus de protections pour donner à l'utilisateur une indication sur la carte à changer après un défaut. L'expérience a montré que ces arbres étaient lourds à mettre en œuvre et difficiles à modifier. De plus, comme ils étaient basés sur un nombre restreint de signaux logiques, les indications données étaient très succinctes.[8]

Cette méthode présente différents avantages :

- Elle permet d'analyser toutes les causes possibles d'un défaut et donc d'améliorer la conception du système.
- La décomposition arborescente permet un diagnostic relativement rapide des défauts.

Cependant, cette méthode présente plusieurs inconvénients :

- Le principal vient de l'exhaustivité nécessaire pour établir le diagnostic : uniquement les causes prévues peuvent être déduites. La difficulté réside en la lourdeur de la mise en œuvre de la méthode pour un système complexe.
- Connaître jusqu'à quel niveau de décomposition l'analyse peut être menée.
- La méthode est difficile à utiliser pour des systèmes complexes fortement interconnectés. Une étude exhaustive de tous les défauts et de leurs combinaisons s'avère rédhibitoire pour un entraînement.[8]

Autres méthodes de diagnostic :

Diagnostic basé sur traitement de signal « capteurs (détecteurs) spécifiques » :

Des capteurs spécifiques peuvent également être utilisés pour générer directement des signaux de détection ou connaître l'état d'un composant. Par exemple, les capteurs de fin de course, d'état de fonctionnement d'un moteur ou de dépassement de seuils sont largement employés dans les installations industrielles.[6]

Quelques exemples de diagnostic par capteurs spécifiques :

- Diagnostic par mesure des vibrations mécaniques
- Diagnostic par mesure de flux magnétique
- Diagnostic par mesure du couple électromagnétique
- Diagnostic par mesure de la puissance instantanée
- Diagnostic par mesure du courant statorique
- Diagnostic par l'analyse de température (la thermographie)

- Diagnostic par les analyses chimiques

Les outils de traitement du signal font appel à des méthodes statistiques (changement de moyenne, rupture de modèle, analyse spectrale, analyse temps-fréquence, ondelettes). Parmi ces signaux, il semblerait que l'analyse du spectre du courant statorique soit la plus révélatrice et la plus fiable pour le diagnostic. La surveillance par l'analyse du flux dans l'entrefer n'est pas attractive car elle nécessite une intervention sur le moteur lui-même pour être fiable. Cela ne peut se faire aisément dans le milieu industriel. En effet, il faudrait doter ces actionneurs de capteurs. Une autre possibilité instrumentée. Un autre moyen consiste à traiter des signaux issus de flux de fuites. Ils contiennent les informations relatives au fonctionnement. Hélas, il a été montré que ceux-ci sont fortement dépendants de la charge. Donc, un diagnostic fiable sera très difficile à faire, surtout dans un milieu industriel.[11]

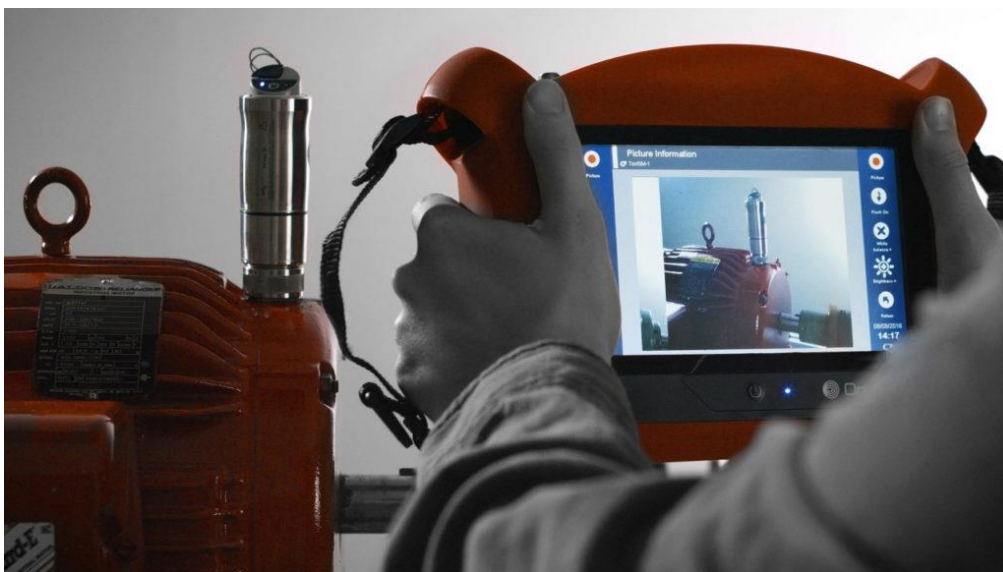


Figure I.28–Diagnostic par analyse vibratoire par capteur-détecteur.

I.3.3.2.2 Méthodes basées sur les modèles analytiques :

Ce sont des méthodes quantitatives, l'approche à base de modèles mathématiques pour la détection de la localisation de défauts.

L'objectif de ces méthodes est de fournir quelques outils de **DLD** basé sur un modèle analytique pour la mise en œuvre d'un système de surveillance.

Ce type d'approche est connu sur le nom de redondance analytique consiste à estimer, à l'aide d'un modèle mathématiques du système, les grandeurs mesurées de celui-ci.

Le modèle analytique est l'image du system surveiller, tous les écarts entre les grandeurs estimées et les grandeurs mesurées, vont traduire l'apparition d'un ou de plusieurs défauts du système.

Donc les symptômes (défauts) détectés sont des grandeurs de comparaison entre le procédé et un modèle de celui-ci puis par comparaison des résidus à des seuils convenablement choisis.

L'inconvénient est que les modèles analytiques ne représentent pas la totalité des phénomènes physique mis en jeu par rapport aux méthodes heuristique moins précises. [7,5]

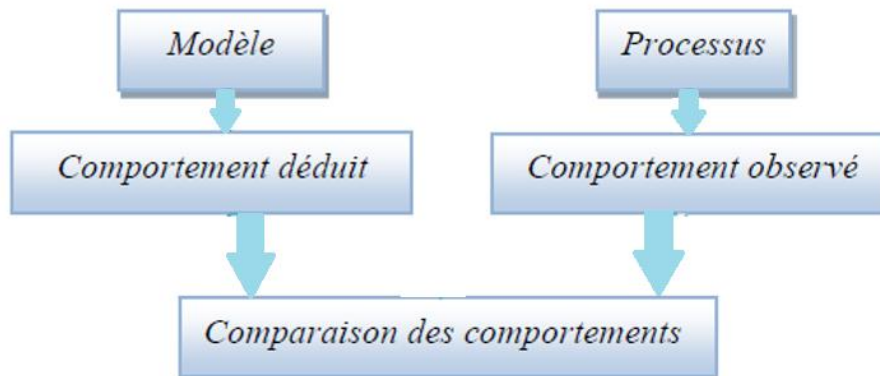


Figure I.29–Principe de fonctionnement des méthodes à base du modèle (analytiques).

1-diagnostic par espace de parité :

Le terme « parité » a été emprunté au vocabulaire employé pour les systèmes logiques où la génération de bits de parité à partir d'une relation de redondance analytique, permet la détection d'erreur, donc le contrôle de parité se faisait dans les circuits logiques.

Le principe de la méthode est la vérification de la consistance existante entre les entrées et les sorties du système surveillé d'où l'idée de base de cette méthode est de vérifier la cohérence entre les relations mathématiques du système et les mesures (relation de redondance analytique).

La relation de redondance analytique utilisé est une équation dont toutes les variables sont connues, doit être sensible aux défauts et insensible aux perturbations.

La différence entre la mesure et sa valeur calculée à l'aide du modèle est appelée résidu.

Alors si le résidu est nul, les mesures sont cohérentes par rapport au modèle, donc le système est déclaré sans défaut. Et dans le cas où le résidu est non nul, indique l'apparition d'un écart, qui veut dire un défaut. Donc la méthode par espace de parité suppose la connaissance d'un modèle mathématique du système.

D'une manière très profonde, Le principe de l'espace de parité repose sur la représentation numérique du vecteur de parité $r(t)$ projection du vecteur des mesures $y(t)$. Qui est présenté dans le cas général par l'équation de mesure. [7,10]

2- Diagnostic à base des observateurs (estimation d'état) :

L'idée de ces méthodes qui utilisant les observateurs ou filtres sont basées sur le principe de génération de résidus. La génération de résidus à l'aide d'une estimation d'état consiste à

comparer des fonctions (grandeurs) de sorties estimées (issues de l'observateur) avec les mêmes fonctions de sorties mesurées (du système réel).

La génération de résidus à l'aide d'une estimation d'état consiste à reconstruire l'état ou, plus généralement, la sortie du processus à l'aide d'observateur et à utiliser l'erreur d'estimation comme résidu.

Une manière brute d'observer les états d'un système consiste à dériver numériquement l'information mesurée grâce aux capteurs. L'expérience a montré que cette méthode à l'inconvénient de donner des résultats erronés à cause de l'amplification du bruit due aux imperfections des mesures.

Pour remédier à ce problème, **KALMAN-BUCY** ont introduit une solution pour les systèmes linéaires stochastiques. Leur résultat est connu actuellement par le Filtre de **KALMAN**. Ce Filtre donne aussi de bons résultats pour les systèmes déterministes. Ensuite, **LUENBERGER** a fondé la théorie d'un observateur qui porte son nom " Observateurs de **LUENBERGER**". Son idée est d'ajouter au modèle mis sous la forme canonique compagnon (**BRUNOVSKY**) une correction à l'aide de la mesure fournie par les capteurs.

La flexibilité de ces approches réside dans le choix du gain des observateurs. [7,10,11]

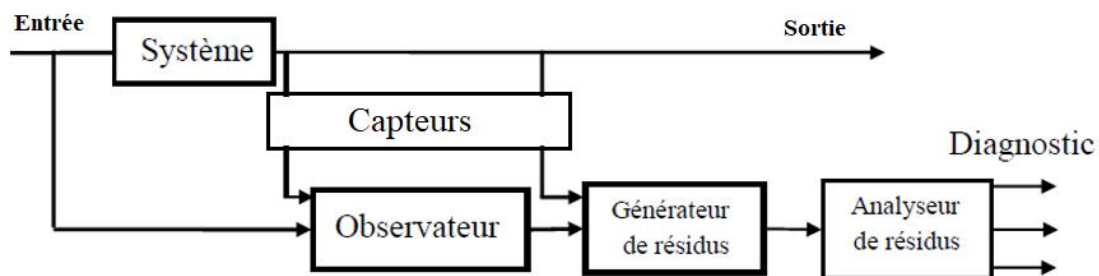


Figure I.30–Principe de fonctionnement de diagnostic à base d'observateurs (générateurs de résidu).

3- Diagnostic par estimation paramétrique :

La détection et localisation des défauts peuvent être effectuées par l'utilisation 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 à leurs analogues en état normal.

L'approche d'estimation paramétrique mesure l'influence des défauts sur les paramètres et non plus, comme précédemment, sur les variables du système physique.

Le principe consiste à estimer en continu des paramètres du procédé en utilisant les mesures d'entrée/sortie et en l'évaluation de la distance qui les sépare des valeurs de référence de l'état normal du procédé.

On distingue deux approches :

- Méthodes de l'erreur d'équation.

- Méthodes de l'erreur de sortie.

Pour détection de défauts par la méthode d'estimation paramétrique, on procède par les étapes suivantes :

- 1- Modélisation mathématique du procédé.
- 2- Description des relations entre les constantes physiques supposées connues et les paramètres du modèle.
- 3- Estimation des paramètres du modèle à partir des entrées et sorties du système en absence de défauts.
- 4- Estimation des paramètres du système en présence de défauts.
- 5- Le vecteur de résidus est obtenu en faisant la différence entre les grandeurs estimées et les valeurs nominales.
- 6- L'apparition d'un défaut au sein du système entraîne une modification de ses caractéristiques physiques d'où résulte une évolution significative des paramètres par rapport à leur valeur nominale autrement dit tout écart notable des paramètres par rapport aux valeurs nominales est révélateur d'un défaut. Le schéma suivant (**figure I.32**) représente le principe de la généralisation de résidu à partir d'une estimation paramétrique en temps réel des paramètres du système. Ou $\hat{\theta}$ représente le vecteur des paramètres issu de l'identification en temps réel et θ_n les valeurs nominale correspondantes.

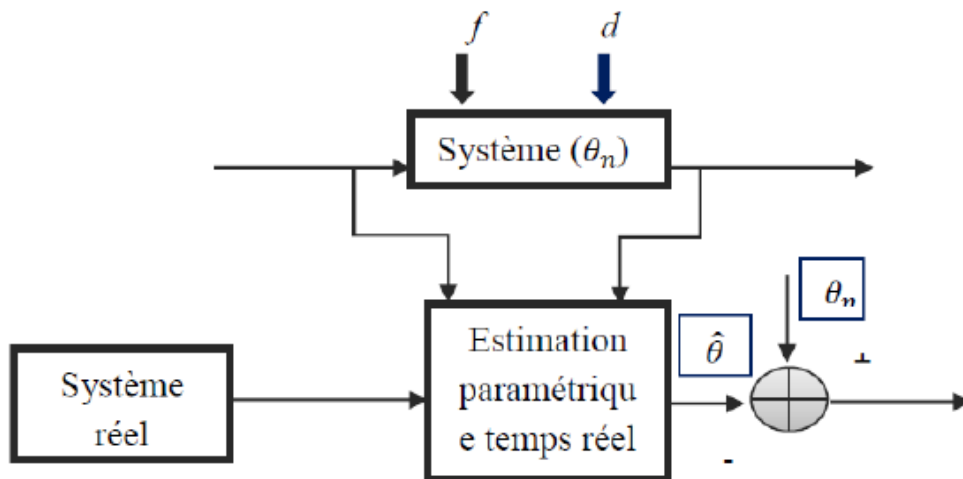


Figure I.31 - Génération de résidu par estimation paramétrique.

L'estimation paramétrique possède l'avantage d'apporter de l'information sur la taille des déviations. Toutefois, un des inconvénients majeurs de la méthode réside dans la nécessité d'avoir un système physique excité en permanence. Ceci pose des problèmes pratiques dans le cas de procédés dangereux ou fonctionnant en mode stationnaire. De plus, les relations entre les paramètres mathématiques et physiques ne sont pas toujours inversibles de façon unitaire, ce qui complique la tâche du diagnostic basé sur les résidus.[10]

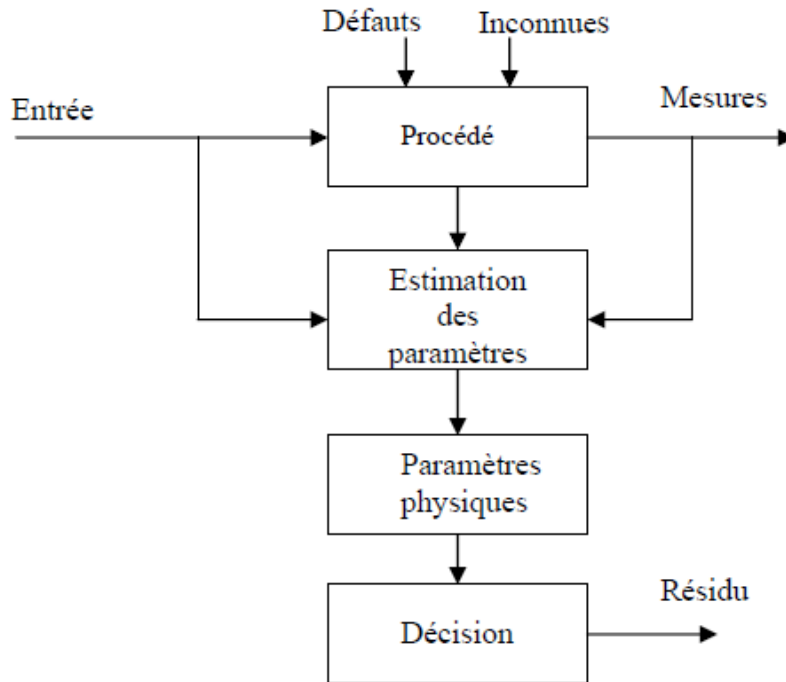


Figure I.32 -Principe de fonctionnement de diagnostic par estimation paramétrique.

Le tableau ci- dessous présente les variations des paramètres du modèle de la machine asynchrone suivant les défauts. Tous les paramètres changent dans le cas d'un défaut. [11]

Types de défauts	Paramètres du modèle du Park (d,q)				Paramètres du modèle triphasé (a,b,c)	
	Rr	Rs	Lr	Ls	Rsa, Rsb, Rsc, Lsa, Lsb, Lsc, Rr, Lr	
Cassure de barres et des portions d'anneau de court-circuit	↗	↘	↘	↘		
Court-circuit entre spires d'une phase statorique	↘	↗	↘	↘	Rsa, Lsa	↘
					Rsb, Rsc, Lsb, Lsc	↗

Tableau I.3 - Variation des paramètres en fonction des défauts.

I.4 Position du problème

A la lumière de l'état de l'art d'un système d'entraînement électrique, il apparaît que la machine asynchrone est très importante dans ce système à cause de son rôle de conversion électromécanique ainsi pour sa disponibilité dans les usines. Selon les études statistiques précédentes les défauts statoriques dans les enroulements sont les plus probables à arriver dans toutes les gammes de puissance notamment dans les grandes puissances, et les courts-circuits entre spire de la même phase statorique (enroulement) est l'un de ces défauts statoriques.

Pour étudier cette problématique, il est nécessaire d'établir un modèle mathématique modélisant la machine asynchrone et aussi le défaut de court circuit entre spires, la simulation de ce modèle peut donner une vision sur le comportement de la machine en présence de défaut et aussi relever les signatures spécifiques de défaut.

Les exigences de la continuité de fonctionnement obligent la présence de la maintenance prédictive sans l'arrêt de service, et l'utilisation d'un diagnostic automatique.

Le système signale le défaut lors de sa présence pour avertir l'opérateur et pour obliger les responsables de maintenance à intervenir.

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé la constitution et le principe de fonctionnement d'un système d'entraînement électrique, en citant les éléments principaux du système après la composition de chacun.

Ensuite, nous avons présenté les principales défaillances au niveau des différentes parties d'un système d'entraînement électrique. Ces défaillances peuvent être d'origine électrique ou mécanique, et dans différents emplacements de l'élément ou la partie du système, pour cela nous avons spécifié tous les défauts qui peuvent apparaître sur chacun des composants qui font composer chaque élément d'un système d'entraînement.

En effet, pour chaque type de défaut, nous avons cité les causes principales et les symptômes produits. Puis, la synthèse bibliographique établie nous a permis d'évoquer une liste non exhaustive des méthodes de diagnostic couramment utilisées. Il existe deux grandes familles de méthodes ont été passées en revue : celles basées sur l'analyse des données et celles basées sur un modèle analytique de la machine étudiée avec une attention particulière donnée aux techniques de diagnostic à base de modèle.

Ensuite, avant de développer en détail la méthode de diagnostic adoptée et d'aborder sa mise en place pour la détection des défauts, il est important de disposer des modèles mathématiques réellement représentatifs du comportement du système afin de mieux comprendre les phénomènes à prendre en compte.

Une position de problème a été mise en place pour la prenant comme une fondation pour le développement de la thèse, contient l'élément défaillant et le type de défauts ainsi la méthode de diagnostic appliquée au système d'entraînement.

Le prochain chapitre sera consacré à la modélisation de la MAS fonctionnant en régime sain et en régime défaillant suivi de la validation de ces modèles par simulation sur Matlab.

**Chapitre II. Modélisation de la machine
asynchrone Multi-enroulements**

Chapitre II. Modélisation de la machine asynchrone Multi-enroulements

II.1 Introduction

La modélisation est une activité scientifique qui a des buts très particuliers. Lorsqu'on modélise un système d'entraînement électrique on s'intéresse de suivre leurs comportements et leurs différents paramètres, mais en vue de son diagnostic on cherche leur comportement anormal (défectueux) par rapport aux comportements normaux qui peuvent être permanent.

Le diagnostic des défaillances par le suivi paramétrique peut reposer sur l'estimation des évolutions de certains paramètres électriques de la machine. Les variations des paramètres sélectionnés doivent être représentatives des défauts considérés. Cette évolution paramétrique va être suivie et donner par notre modèle de simulation.

Dans notre simulation, le moteur est constitué de deux parties : le circuit électrique et le circuit magnétique. Le circuit électrique est constitué de trois bobinages répartis au stator, alimentés en triphasé alternatif en courant ou en tension. Pour notre étude le choix est porté sur une alimentation en tension, généralement utilisée pour les moteurs asynchrones. Le rotor du moteur est constitué de barres court-circuitées et disposées en cage d'écureuil ou d'un bobinage rotorique (dans le cas d'une machine à rotor bobiné). Il est représenté dans le modèle triphasé-triphasé par trois phases court-circuitées entre elles et ramenées au stator.

Ce chapitre présente une différente méthode de modélisation de la machine asynchrone, elle est basée sur la théorie d'accouplement électromagnétique des circuits électriques, cette méthode prend en considération les défauts statoriques et rotoriques de la machine. Un système d'équations différentielles décrivant la machine asynchrone (système triphasé).

Cette modélisation nécessite une étude précise et rigoureuse des signatures des défauts de la machine asynchrone, ainsi qu'elle ne peut pas faite qu'après l'effectuation de quelque hypothèse de simplification qu'ils sont détaillés par la suite

Dans ce chapitre on va modéliser le moteur asynchrone dans son état sain après en état défectueuse en présence de défaut.

II.2 Modélisation de la machine asynchrone en régime normal « Sain » (modèle triphasé)

II.2.1 Hypothèses de simplification :

L'étude de la modélisation de la machine asynchrone sera faite dans le contexte habituel d'hypothèses simplificatrices suivantes [12,13] :

- L'entrefer constant.
- L'effet des encoches négligé.
- La distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
- Le circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- Les pertes ferromagnétiques négligeables.
- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement sur les caractéristiques, ne sont pas pris en compte.
- L'additivité des flux.
- La constante des inductances propres.

La structure principale de la machine asynchrone est représentée par la figure **II.1**, elle est composée de six enroulements dans l'espace électrique, les axes statoriques sont décalés entre eux d'un angle ($2\pi/3$), ainsi que les axes rotoriques. L'angle θ représente l'angle entre l'axe de la phase rotorique de référence (Ra) et l'axe fixe de la phase statorique de référence (Sa). Les flux sont considérés positifs selon le sens des axes des enroulements de la machine asynchrone.

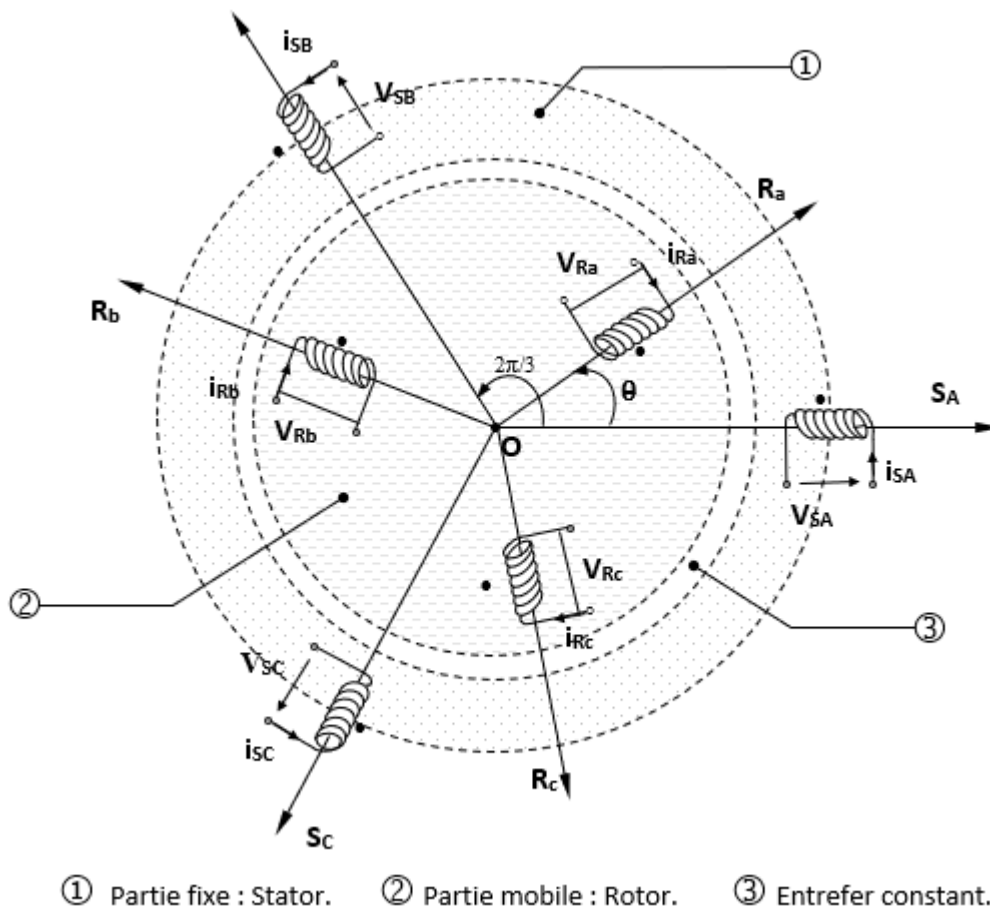


Figure II.1 – Représentation spatiale des enroulements de la machine asynchrone.

II.2.2 Modèle triphasé équivalent d'une machine asynchrone :

Par application de la loi de Faraday à l'un des six enroulements statoriques et rotoriques de la machine, la loi des mailles s'exprime par la relation (II.1) [12,14] :

$$V = RI + \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{II.1})$$

La machine peut être modélisée par les équations suivantes :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\phi_s] \quad (\text{II.2})$$

Cette notation est l'écriture condensée de :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

$$[0] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\phi_r] \quad (\text{II.4})$$

Cette notation est l'écriture condensée de :

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

$$[\phi_s] = ([M_{ss}] + [L_{sf}])[I_s] + [M_{sr}][I_r] \quad (\text{II.6})$$

$$[\phi_r] = [M_{rs}][I_s] + ([M_{rr}] + [L_{rf}])[I_r] \quad (\text{II.7})$$

Les variables : $[V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}$; $[I_s] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix}$; $[\phi_s] = \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix}$; Les matrices suivantes représentent les tensions, les courants, et les flux au stator.

Les variables : $[I_r] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix}$; $[\phi_r] = \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix}$; représentent les courants, et les flux au rotor respectivement.

Les inductances sont données par les expressions suivantes :

$$[L_{sf}] = \begin{bmatrix} L_{sf} & 0 & 0 \\ 0 & L_{sf} & 0 \\ 0 & 0 & L_{sf} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

$$[M_{ss}] = M_s \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ -1/2 & 1 & -1/2 \\ -1/2 & -1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

Avec :

La résistance de chaque phase statorique est proportionnelle au nombre de spires utiles. On écrit alors la matrice des résistances statoriques $[R_s]$ est donnée par :

$$[R_s] = R_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

Lorsque le moteur tourne, les coefficients $[M_{sr}]$ et $[M_{rs}]$ ne sont pas constants, ils varient en fonction de l'angle θ position angulaire entre le rotor et le stator. Ceci rend le modèle triphasé équivalent difficilement utilisable tant en commande qu'en surveillance, dans l'approche qui suit une transformation mathématique est appliqué sur les équations du modèle précédent afin de rendre l'ensemble calculable en ligne.

II.2.3 Définition de la matrice de transformation :

Le champ magnétique créé par le courant circulant au rotor à la même pulsation que celui créé par le courant circulant au stator, ainsi, le champ magnétique créé par un courant statorique fictif. La relation entre ce courant fictif et le courant rotorique est donné par une transformation mathématique. En utilisant cette transformation, l'ensemble des variables auront la même pulsation que les variables du stator. Ainsi, tous les paramètres du modèle seront indépendants de la position angulaire θ . La transformation est donnée par la matrice suivante [15] :

$$[T] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) + \frac{1}{2} & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{2} & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{2} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{2} & \cos(\theta) + \frac{1}{2} & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{2} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{2} & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{2} & \cos(\theta) + \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

On montre facilement que cette matrice est orthogonale :

$$[T]^{-1} = [T]^T \quad (\text{II.13})$$

Remarque : Cette matrice permet d'obtenir un nouveau modèle triphasé dont les inductances mutuelles sont indépendantes de l'angle téta (coefficient constants).

II.2.4 Transformation « triphasé-triphasé » des équations du modèle :

II.2.4.1 Les équations électriques et magnétiques :

Considérant l'équation (II.6) en introduisant la matrice [T] comme suit [15] :

$$[\Phi_s] = ([M_{ss}] + [L_{sf}]) [I_s] + [M_{sr}] [I_r] = [M_s] [I_s] + [M_{sr}] [I_r] = [M_s] [I_s] + [M_{sr}] [I_r] [T]^{-1} [T] \quad (\text{II.14})$$

Ceci conduit à :

$$[\Phi_s] = [M_s] [I_s] + [M_{sr}^s] [I_r^s] \quad (\text{II.15})$$

Où :

$$[M_{sr}^s] = [M_{sr}] [T]^{-1} \quad (\text{II.16})$$

$$[I_r^s] = [I_r] [T] \quad (\text{II.17})$$

Avec :

$$[M_{sr}^s] = \begin{bmatrix} M & -M/2 & -M/2 \\ -M/2 & M & -M/2 \\ -M/2 & -M/2 & M \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

En multipliant à gauche par [T] l'équation (II.7) on obtient :

$$[\Phi_r^s] = [M_{rs}^s] [I_s] + [M_r^s] [I_r^s] \quad (\text{II.19})$$

Où :

$$\begin{cases} [M_{rs}^s] = [M_{rs}] [T] \\ [M_r^s] = [M_r] [T]^{-1} [T] \\ [\Phi_r^s] = [\Phi_r] [T] \\ [I_r^s] = [I_r] [T] \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

On peut facilement montrer que les deux propriétés suivantes satisfaites :

$$[M_{rs}^s] = [M_{rs}^s]^T \quad (\text{II.21})$$

$$[M_r^s] = [M_r] \quad (\text{II.22})$$

Considérant maintenant l'équation (II.4) :

$$[0] = [R_r] [I_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \rightarrow [0] = [R_r] [I_r] [T]^{-1} [T] + \frac{d}{dt} ([T]^{-1} [T] [\Phi_r]) \quad (\text{II.23})$$

$$[0] = [T]^{-1} [R_r] [I_r] [T] + \frac{d}{dt} ([T]^{-1} [T] [\Phi_r]) \quad (\text{II.24})$$

En multipliant à gauche par [T] on obtient :

$$[0] = [T] [T]^{-1} [R_r] [I_r] [T] + [T] \frac{d}{dt} ([T]^{-1} [T] [\Phi_r]) \quad (\text{II.25})$$

$$[0] = [R_r] [I_r^s] + [T] \frac{d}{dt} ([T]^{-1}) [\Phi_r^s] + \frac{d}{dt} [\Phi_r^s] \quad (\text{II.26})$$

Cette équation peut être écrite sous la forme :

$$[0] = [R_r] [I_r^s] + (1 - S) W_N [K_{rs}^{sp}] \frac{d}{dt} [\Phi_r^s] \quad (\text{II.27})$$

Où :

$$[K_{rs}^{sp}] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\sqrt{3}}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} \\ -\frac{\sqrt{3}}{3} & 0 & \frac{\sqrt{3}}{3} \\ \frac{\sqrt{3}}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

Les équations (II.2), (II.27), (II.15), (II.19) représentent un nouveau modèle triphasé dans lequel tous les paramètres peuvent être calculés en ligne.

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] [I_s] + \left[\frac{d}{dt} \Phi_s \right] \\ [0] = [R_r] [I_r^s] + (1 - S) W_N [K_{rs}^{sp}] \frac{d}{dt} [\Phi_r^s] \\ [\Phi_s] = [M_s] [I_s] + [M_{sr}^s] [I_r^s] \\ [\Phi_r^s] = [M_{rs}^s] [I_s] + [M_r^s] [I_r^s] \end{cases}$$

Puisque $[M_r^s]$ est une matrice de rang plein, elle est inversible, à partir de (II.19) nous obtenons :

$$[I_r^s] = [M_r^s]^{-1} ([\Phi_r^s] - [M_{rs}^s] [I_s]) \quad (\text{II.29})$$

En substituant cette expression dans l'équation (II.26) on obtient :

$$[0] = [R_r] [M_r^s]^{-1} ([\Phi_r^s] - [M_{rs}^s] [I_s]) + (1 - S) W_N [K_{rs}^{sp}] [\Phi_r^s] + \frac{d}{dt} [\Phi_r^s] \quad (\text{II.30})$$

Ce qui est équivalent à :

$$[0] = ([R_r] [M_r^s]^{-1} + (1 - S) W_N [K_{rs}^{sp}]) [\Phi_r^s] - [R_r] [M_r^s]^{-1} [M_{rs}^s] [I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_r^s] \quad (\text{II.31})$$

En substituant l'expression de l'équation (II.28) dans l'équation (II.15) on obtient :

$$[\Phi_s] = [M_s] [I_s] + [M_r^s]^{-1} [M_{rs}^s] ([\Phi_r^s] - [M_{rs}^s] [I_s]) \quad (\text{II.32})$$

Qui est équivalent à :

$$[\Phi_s] = ([M_s] - [M_r^s]^{-1} [M_{sr}^s] [M_{rs}^s]) [I_s] + [M_r^s]^{-1} [M_{sr}^s] [\Phi_r^s] \quad (\text{II.33})$$

En utilisant (II.33) et (II.2) il vient :

$$[V_s] = [R_s] [I_s] + \left[\frac{d}{dt} \Phi_s \right]$$

$$[V_s] = [R_s] [I_s] + \frac{d}{dt} ([M_s] - [M_r^s]^{-1} [M_{sr}^s] [M_{rs}^s]) [I_s] + \frac{d}{dt} [M_r^s]^{-1} [M_{sr}^s] [\Phi_r^s] \quad (\text{II.34})$$

Ce qui donne :

$$[V_s] = [R_s] [I_s] + \frac{d}{dt} ([M_s] - [M_r^s]^{-1} [M_{sr}^s] [M_{rs}^s]) [I_s] + [M_r^s]^{-1} [M_{sr}^s] \frac{d}{dt} [\Phi_r^s] \quad (\text{II.35})$$

À partir de (II.31) on obtient :

$$\frac{d}{dt} [\Phi_r^s] = [R_r] [M_r^s]^{-1} [M_{rs}^s] [I_s] + ([R_r] [M_r^s]^{-1} (1 - S) W_N [K_{rs}^{sp}]) [\Phi_r^s] \quad (\text{II.36})$$

Ce qui donne en utilisant (II.35) et (II.36) :

$$[V_s] = [R_s] [I_s] + ([M_s] - [M_r^s]^{-1} [M_{sr}^s] [M_{rs}^s]) \frac{d}{dt} [I_s] + [M_{sr}^s] [M_r^s]^{-1} ([R_r] [M_r^s]^{-1} [M_{rs}^s] [I_s] - [M_r^s]^{-1} [M_{sr}^s] ([R_r] [M_r^s]^{-1} (1 - S) W_N [K_{rs}^{sp}]) [\Phi_r^s]) \quad (\text{II.37})$$

Ce qui conduit à :

$$\Gamma \frac{d}{dt} [I_s] = ([V_s] - ([R_s] + [M_{sr}^s] [M_r^s]^{-1} [R_r] [M_r^s]^{-1} [M_{rs}^s]) [I_s] + [M_{sr}^s] [M_r^s]^{-1} ([R_r] [M_r^s]^{-1} + (1 - S) W_N [K_{rs}^{sp}]) [\Phi_r^s]) \quad (\text{II.38})$$

Avec :

$$\Gamma = [M_s] - [M_{sr}^s] [M_r^s]^{-1} [M_{rs}^s] \quad (\text{II.39})$$

Finalement, nous obtenons :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} [I_s] &= \Gamma^{-1}([V_s] - ([R_s] + [M_{sr}^s][M_r^s]^{-1}[R_r][M_r^s]^{-1}[M_{rs}^s])[I_s]) + \\ &\Gamma^{-1}[M_{sr}^s][M_r^s]^{-1}([R_r][M_r^s]^{-1} + (1 - S)W_N[K_{rs}^{sp}])[\Phi_r^s] \end{aligned} \quad (II.40)$$

Les équations (II.36) et (II.40) représentent le modèle triphasé de la machine asynchrone.

II.2.4.2 Les équations mécaniques :

L'équation de mouvement est donnée par :

$$J \frac{d}{dt} \Omega + f \Omega = C_e - C_r \quad (II.41)$$

Le couple est donné par l'expression suivante :

$$[C_e] = P \frac{M_{sr}}{L_r} ([I_s] \wedge [\Phi_r])$$

$$C_e = P \frac{M_{sr}}{L_r} [(I_{sb} \Phi_{rc} - I_{sc} \Phi_{rb}) - (I_{sa} \Phi_{rc} - I_{sc} \Phi_{ra}) + (I_{sa} \Phi_{rb} - I_{sb} \Phi_{rb})] \quad (II.42)$$

II.2.5 Mise en équation d'état du modèle triphasé :

Pour un modèle triphasé de la machine asynchrone triphasée alimentée en tension, les tensions statoriques V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} représentent les variables de commande.

Et nous considérons les courants statoriques I_{sa}, I_{sb}, I_{sc} et les flux rotoriques $\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}$ et la pulsation mécanique Ω comme variables d'état, le couple résistant " C_r " étant comme perturbation.

On cherche à obtenir un système d'équation écrit sous forme identique à celle du modèle biphasé tel que :

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ Y = CX \end{cases} \quad (II.43)$$

[A]: Matrice d'évolution.

[B]: Matrice de commande.

[U]: $[V_{sa} V_{sb} V_{sc} \ 0 \ 0 \ 0]^T$: Vecteur de commande.

En choisissant les variables d'état : I_{sabc} et Φ_{rabc} on obtient le vecteur [X]:

$$[X] = [I_{sa} I_{sb} I_{sc} \ \Phi_{ra} \ \Phi_{rb} \ \Phi_{rc}]^T$$

Les équations :

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{I}_{sa}}{dt} &= d_1 f_{sb}^2 f_{sc}^2 \mathbf{V}_{sa} + d_2 f_{sa} f_{sb} f_{sc}^2 \mathbf{V}_{sb} + d_2 f_{sa} f_{sc} f_{sb}^2 \mathbf{V}_{sc} - \left(\frac{3}{2}(d_1 + d_2)\right) T f_{sa}^2 f_{sb}^2 f_{sc}^2 \\ &+ R_s d_1 f_{sa} f_{sb}^2 f_{sc}^2 \mathbf{I}_{sa} - \left(\frac{3}{2}\left(\frac{d_1 + 3d_2}{2}\right) T f_{sa} f_{sb}^3 f_{sc}^2 + R_s d_2 f_{sa} f_{sb}^2 f_{sc}^2\right) \mathbf{I}_{sb} \\ &- \left(\frac{3}{2}\left(\frac{d_1 + 3d_2}{2}\right) T f_{sa} f_{sb}^2 f_{sc}^3 + R_s d_2 f_{sa} f_{sb}^2 f_{sc}^2\right) \mathbf{I}_{sc} \\ &+ K f_{sa} f_{sb}^2 f_{sc}^2 \left(G \Phi_{ra} + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} W_r - \frac{G}{2}\right) \Phi_{rb} - \left(\frac{\sqrt{3}}{2} W_r + \frac{G}{2}\right) \Phi_{rc} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{I}_{sb}}{dt} &= d_2 f_{sa} f_{sb} f_{sc}^2 \mathbf{V}_{sa} + d_1 f_{sa}^2 f_{sc}^2 \mathbf{V}_{sb} + d_2 f_{sa}^2 f_{sb} f_{sc} \mathbf{V}_{sc} \\ &- \left(\frac{3}{2}\left(\frac{d_1 + 3d_2}{2}\right) T f_{sb} f_{sa}^3 f_{sc}^2 + R_s d_2 f_{sb} f_{sa}^2 f_{sc}^2\right) \mathbf{I}_{sa} - \left(\frac{3}{2}(d_1 + d_2)\right) T f_{sa}^2 f_{sb}^2 f_{sc}^2 \\ &+ R_s d_1 f_{sb} f_{sa}^2 f_{sc}^2 \mathbf{I}_{sb} - \left(\frac{3}{2}\left(\frac{d_1 + 3d_2}{2}\right) T f_{sb} f_{sa}^2 f_{sc}^3 + R_s d_2 f_{sb} f_{sa}^2 f_{sc}^2\right) \mathbf{I}_{sc} \\ &+ K f_{sb} f_{sa}^2 f_{sc}^2 \left(\left(\frac{\sqrt{3}}{2} W_r + \frac{G}{2}\right) \Phi_{ra} + G \Phi_{rb} + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} W_r - \frac{G}{2}\right) \Phi_{rc} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{I}_{sc}}{dt} &= d_2 f_{sa} f_{sc} f_{sb}^2 \mathbf{V}_{sa} + d_2 f_{sa}^2 f_{sb} f_{sc} \mathbf{V}_{sb} + d_1 f_{sa}^2 f_{sb}^2 \mathbf{V}_{sc} \\ &- \left(\frac{3}{2}\left(\frac{d_1 + 3d_2}{2}\right) T f_{sc} f_{sa}^3 f_{sb}^2 + R_s d_2 f_{sc} f_{sa}^2 f_{sb}^2\right) \mathbf{I}_{sa} - \left(\frac{3}{2}\left(\frac{d_1 + 3d_2}{2}\right) T f_{sc} f_{sa}^2 f_{sb}^3 \right. \\ &+ R_s d_2 f_{sc} f_{sa}^2 f_{sb}^2) \mathbf{I}_{sb} - \left(\frac{3}{2}(d_1 + d_2)\right) T f_{sa}^2 f_{sb}^2 f_{sc}^2 + R_s d_1 f_{sc} f_{sa}^2 f_{sb}^2) \mathbf{I}_{sc} \\ &+ K f_{sc} f_{sa}^2 f_{sb}^2 \left(\left(\frac{\sqrt{3}}{2} W_r - \frac{G}{2}\right) \Phi_{ra} - \left(\frac{\sqrt{3}}{2} W_r + \frac{G}{2}\right) \Phi_{rb} + G \Phi_{rc} \right) \end{aligned}$$

$$\frac{d\Phi_{ra}}{dt} = \partial \left(f_{sa} I_{sa} - \frac{f_{sb}}{2} I_{sb} - \frac{f_{sc}}{2} I_{sc} \right) - \frac{R_r A}{C} \Phi_{ra} - \left(\frac{R_r B}{C} + \frac{\sqrt{3}}{3} W_r \right) \Phi_{rb} - \left(\frac{R_r B}{C} - \frac{\sqrt{3}}{3} W_r \right) \Phi_{rc}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi_{rb}}{dt} &= \partial \left(\frac{f_{sa}}{2} I_{sa} - f_{sb} I_{sb} - \frac{f_{sc}}{2} I_{sc} \right) - \left(\frac{R_r B}{C} - \frac{\sqrt{3}}{3} W_r \right) \Phi_{ra} - \frac{R_r A}{C} \Phi_{rb} \\ &- \left(\frac{R_r B}{C} + \frac{\sqrt{3}}{3} W_r \right) \Phi_{rc} \end{aligned}$$

$$\frac{d\Phi_{rc}}{dt} = \partial \left(-\frac{f_{sa}}{2} I_{sa} - \frac{f_{sb}}{2} I_{sb} + f_{sc} I_{sc} \right) - \left(\frac{R_r B}{C} + \frac{\sqrt{3}}{3} w_r \right) \Phi_{ra} - \left(\frac{R_r B}{C} - \frac{\sqrt{3}}{3} w_r \right) \Phi_{rb} - \frac{R_r A}{C} \Phi_{rc}$$

Après arrangement des équations, on obtient le système suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_{sa}}{dt} = K_{A1} I_{sa} + K_{A2} I_{sb} + K_{A3} I_{sc} + G_{A1} \Phi_{ra} + G_{A2} \Phi_{rb} + G_{A3} \Phi_{rc} + V_{A1} V_{sa} + V_{A2} V_{sb} + V_{A3} V_{sc} \\ \frac{dI_{sb}}{dt} = K_{B1} I_{sa} + K_{B2} I_{sb} + K_{B3} I_{sc} + G_{B1} \Phi_{ra} + G_{B2} \Phi_{rb} + G_{B3} \Phi_{rc} + V_{B1} V_{sa} + V_{B2} V_{sb} + V_{B3} V_{sc} \\ \frac{dI_{sc}}{dt} = K_{C1} I_{sa} + K_{C2} I_{sb} + K_{C3} I_{sc} + G_{C1} \Phi_{ra} + G_{C2} \Phi_{rb} + G_{C3} \Phi_{rc} + V_{C1} V_{sa} + V_{C2} V_{sb} + V_{C3} V_{sc} \\ \frac{d\Phi_{ra}}{dt} = f_{A1} I_{sa} - f_{A2} I_{sb} + f_{A3} I_{sc} + H_{A1} \Phi_{ra} + H_{A2} \Phi_{rb} + H_{A3} \Phi_{rc} \\ \frac{d\Phi_{rb}}{dt} = f_{B1} I_{sa} - f_{B2} I_{sb} + f_{B3} I_{sc} + H_{B1} \Phi_{ra} + H_{B2} \Phi_{rb} + H_{B3} \Phi_{rc} \\ \frac{d\Phi_{rc}}{dt} = f_{C1} I_{sa} - f_{C2} I_{sb} + f_{C3} I_{sc} + H_{C1} \Phi_{ra} + H_{C2} \Phi_{rb} + H_{C3} \Phi_{rc} \end{array} \right.$$

Par identification :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} K_{A1} & K_{A2} & K_{A3} & G_{A1} & G_{A2} & G_{A3} \\ K_{B1} & K_{B2} & K_{B3} & G_{B1} & G_{B2} & G_{B3} \\ K_{C1} & K_{C2} & K_{C3} & G_{C1} & G_{C2} & G_{C3} \\ f_{A1} & f_{A2} & f_{A3} & H_{A1} & H_{A2} & H_{A3} \\ f_{B1} & f_{B2} & f_{B3} & H_{B1} & H_{B2} & H_{B3} \\ f_{C1} & f_{C2} & f_{C3} & H_{C1} & H_{C2} & H_{C3} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} V_{A1} & V_{A2} & V_{A3} & 0 & 0 & 0 \\ V_{B1} & V_{B2} & V_{B3} & 0 & 0 & 0 \\ V_{C1} & V_{C2} & V_{C3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \\ \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

II.2.6 Simulation de la machine dans le régime normal

Le schéma Block de la simulation est présenté dans la figure (II.2).

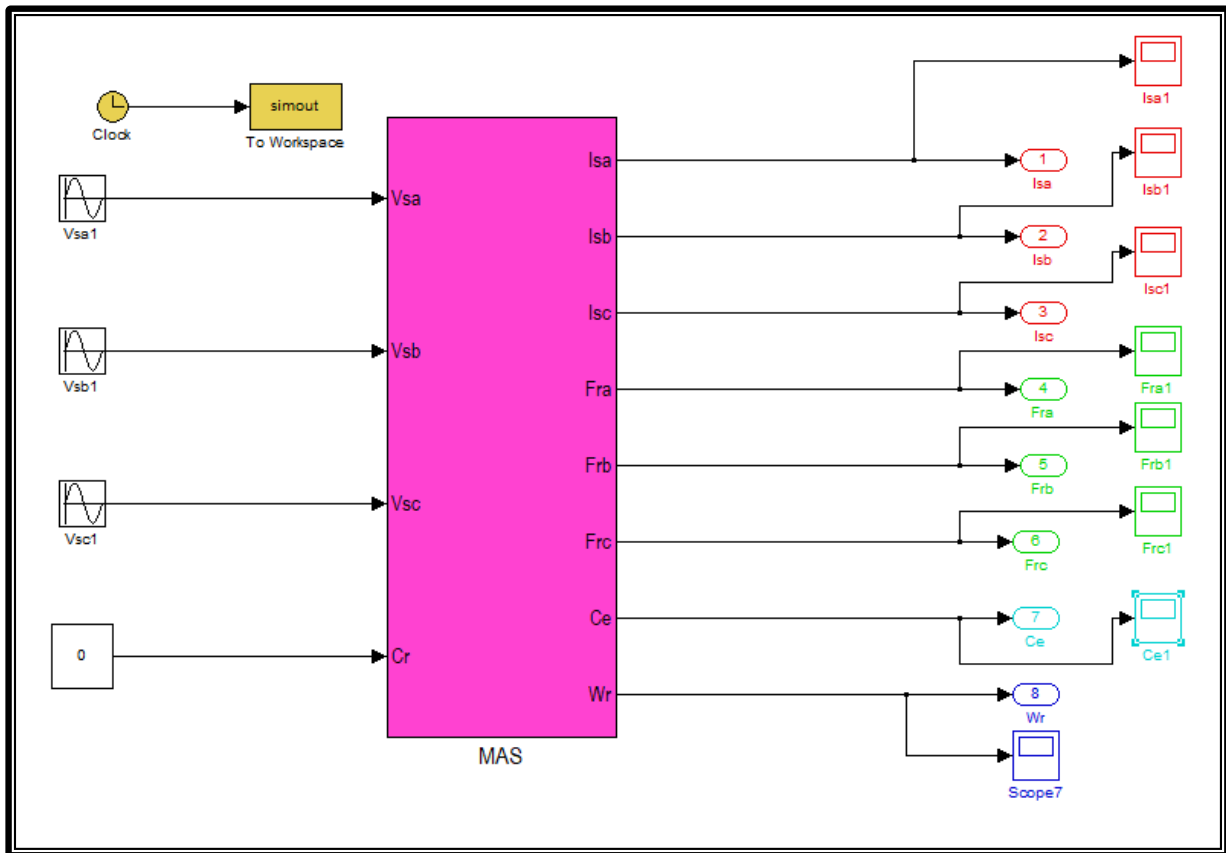


Figure II.2 - le schéma block de la simulation d'un MAS multi-enroulements

II.2.6.1 Résultats de simulation :

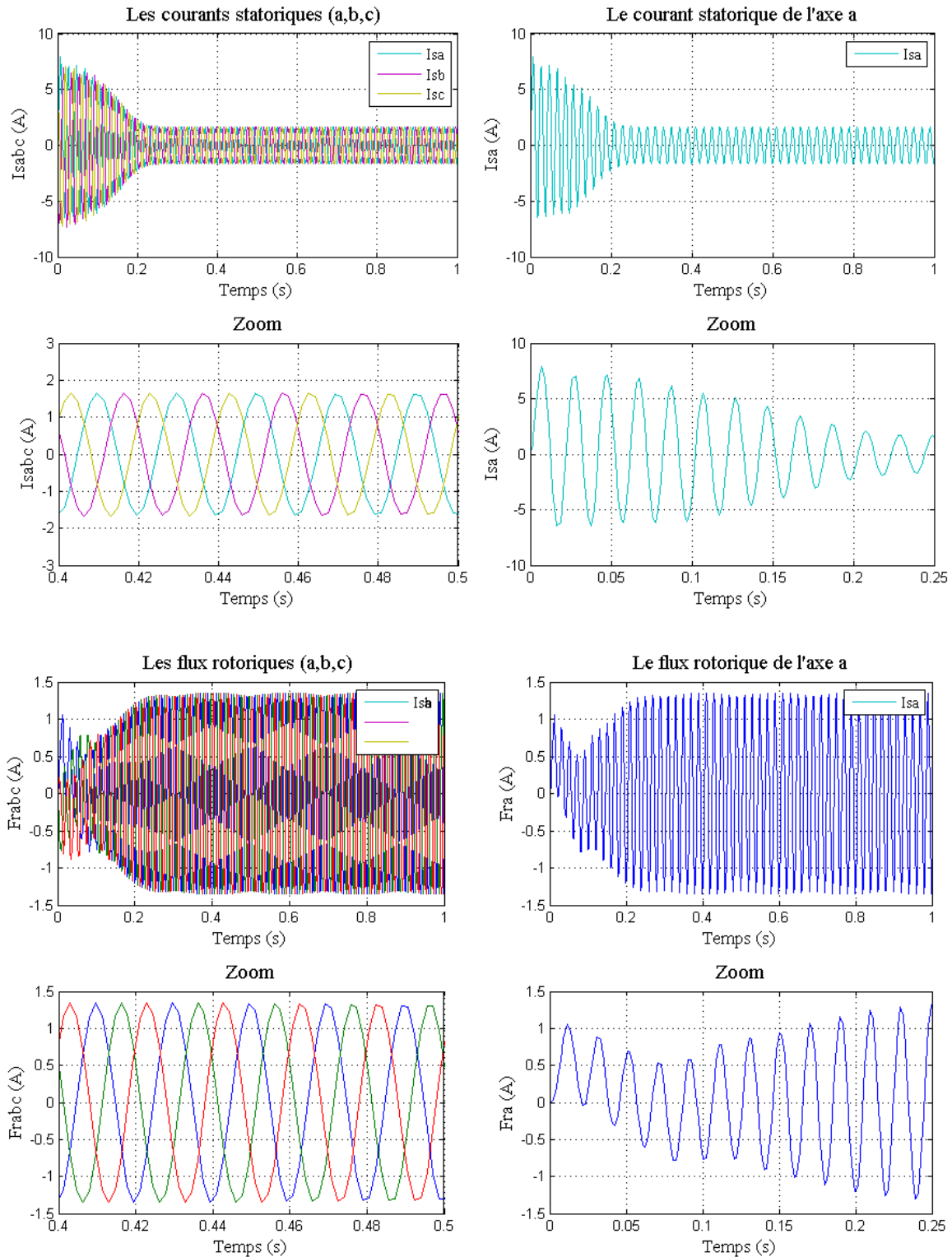


Figure II.3 - Résultats de simulation d'un démarrage direct d'un MAS à vide

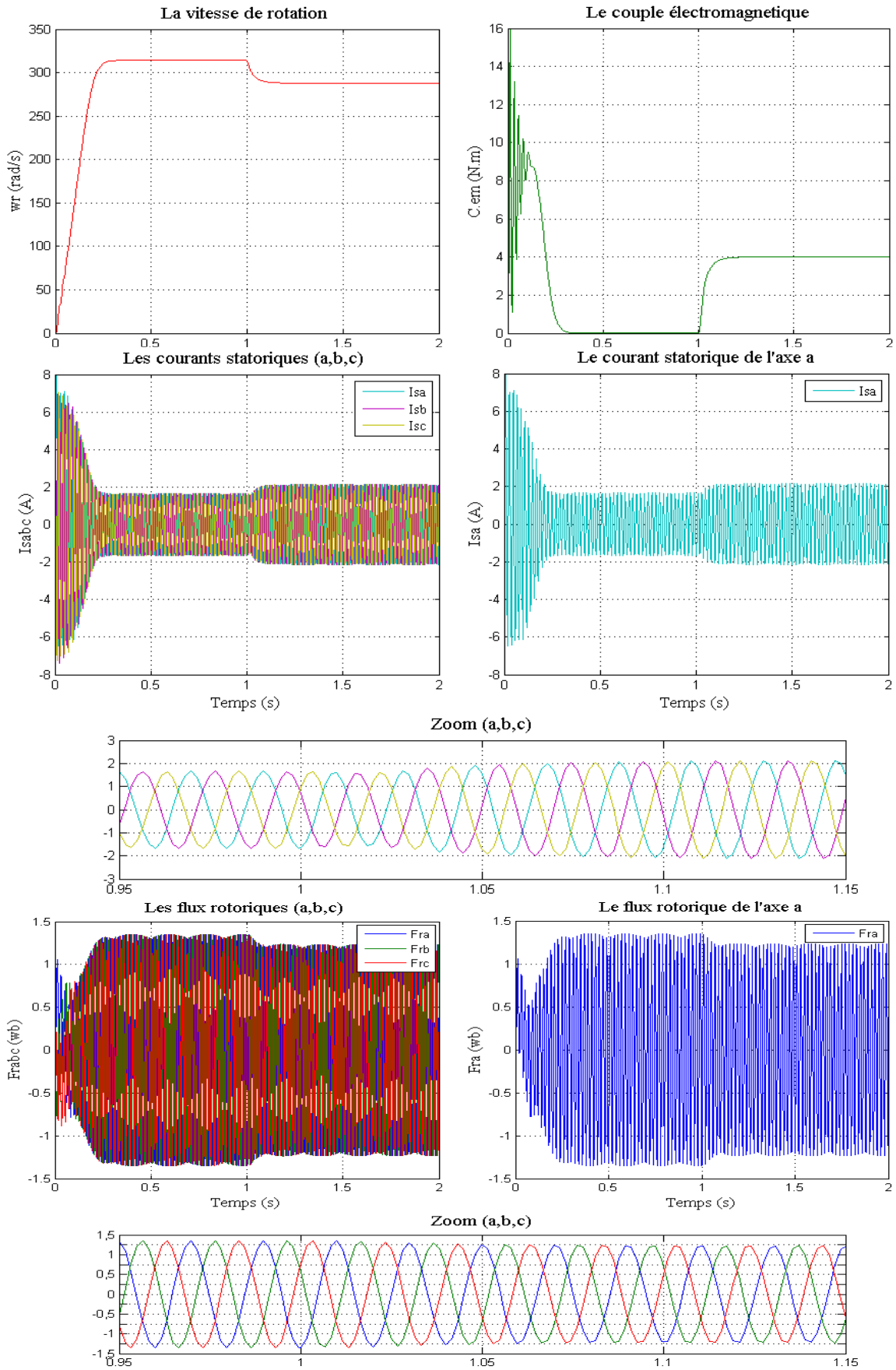


Figure II.4 - Résultat de simulation d'un démarrage direct d'un MAS en charge, $C_r=4$ N.m à l'instant $t=1$ s

II.2.6.2 Interprétations des résultats :

En régime transitoire, un appel de courant au bout des premières alternances remarqué par les amplitudes élevées des courants triphasés. Ces courants sont nécessaires pour développer un fort couple de démarrage avec des oscillations.

En régime établi (permanant), les courants vont stabiliser et seront des signaux sinusoïdaux avec des amplitudes fixes, et le couple développé de la machine tend vers zéro.

La vitesse augmente d'une manière presque linéaire par rapport au temps jusqu'à l'atteinte d'une vitesse fixe stable en régime permanent.

L'application d'une charge $C_r = 2 \text{ N.m}$ à l'instant $t = 2 \text{ s}$ provoque une augmentation des courants abc (remarqué au niveau des amplitudes). Le couple électromécanique atteint la valeur du couple résistant appliqué, la vitesse de rotation ω_r va se diminuer par une petite valeur ainsi que les flux rotorique abc (en amplitude).

II.3 Modélisation de la machine asynchrone en régime défectueux

II.3.1 Modélisation d'un défaut statorique « court-circuit entre spires statoriques » :

Dans le premier chapitre on a cité les différents défauts de la machine asynchrone, la majorité des défauts sont localisés au niveau de stator exactement dans les enroulements statorique (51% des défauts) surtout dans les machines de faible ou moyenne puissance.

Les courts circuits entre spires sont fréquemment rencontrés au stator à cause de la dégradation des isolants des spires du bobinage statorique, il apparait à l'intérieur des encoches statoriques, provoque l'augmentation des courants statoriques défectueux.

Par la suite on va modéliser des courts circuits entre spires dans le même enroulement (phase).

Ce défaut provoque l'apparition d'une série d'harmonique dans le spectre du flux axial. La fréquence caractérisant ce défaut est :

$$f_{cs} = f_s \left[\frac{n}{p} (1 - g) \pm k \right]$$

Avec : $n=1,2,3,\dots$ et $k=1,3,5,\dots$



Figure II.5 - court-circuit entre spires de la même phase

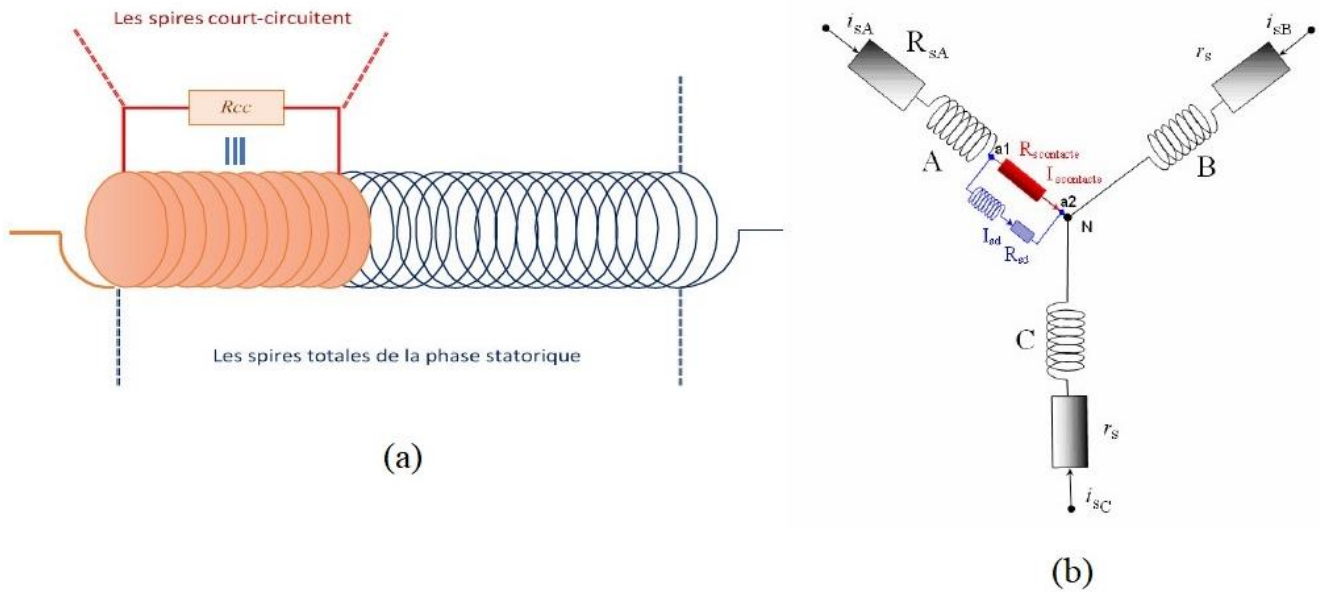


Figure II.6 - schéma caractérisant un court-circuit dans une phase (a) et dans le circuit statorique dans les trois phases (b)

Soit N_s le nombre de spires en régime sain de la machine asynchrone. Un court-circuit statorique conduira à une diminution dans le nombre de spires de chaque phase statorique.

On définit les coefficients de court-circuit suivants :

$$\text{Coefficient de court-circuit relatif à la 1}^{\text{ere}} \text{ phase statorique : } K_{sa} = N_{cc1}/N_s \quad (\text{II.44})$$

$$\text{Coefficient de court-circuit relatif à la 2}^{\text{eme}} \text{ phase statorique : } K_{sb} = N_{cc2}/N_s \quad (\text{II.45})$$

$$\text{Coefficient de court -circuit relatif à la 3}^{\text{eme}} \text{ phase statorique : } K_{sc} = N_{cc3}/N_s \quad (\text{II.46})$$

N_{cc} : Le nombre de spires en court-circuit.

Le nombre de spires utiles pour les trois phases statoriques, est alors donné par :

$$N_1 = N_s - N_{cc1} = (1 - K_{sa})N_s = f_{sa} N_s \quad (\text{II.47})$$

$$N_2 = N_s - N_{cc2} = (1 - K_{sb})N_s = f_{sb} N_s \quad (\text{II.48})$$

$$N_3 = N_s - N_{cc3} = (1 - K_{sc})N_s = f_{sc} N_s \quad (\text{II.49})$$

La matrice des résistances statoriques $[R_s]$ est donnée par :

$$[R_s] = R_s \begin{bmatrix} f_{sa} & 0 & 0 \\ 0 & f_{sb} & 0 \\ 0 & 0 & f_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.50})$$

Les inductances sont données par les expressions suivantes :

$$[L_{sf}] = \begin{bmatrix} f_{sa}^2 L_{sf} & 0 & 0 \\ 0 & f_{sb}^2 L_{sf} & 0 \\ 0 & 0 & f_{sc}^2 L_{sf} \end{bmatrix} \quad (\text{II .51})$$

$$[M_{ss}] = M_s \begin{bmatrix} f_{sa}^2 & -f_{sa}f_{sb}/2 & -f_{sa}f_{sc}/2 \\ -f_{sa}f_{sb}/2 & f_{sb}^2 & -f_{sc}f_{sb}/2 \\ -f_{sa}f_{sc}/2 & -f_{sc}f_{sb}/2 & f_{sc}^2 \end{bmatrix} \quad (\text{II .52})$$

$$[M_{sr}] = M \begin{bmatrix} f_{sa} \cos(\theta) & -f_{sa} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & f_{sa} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ f_{sb} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & f_{sb} \cos(\theta) & f_{sb} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ f_{sc} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & f_{sc} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & f_{sc} \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II .53})$$

$$\text{Avec : } [M_{sr}] = [M_{rs}]^T \quad (\text{II .54})$$

On remplace les matrices $[R_s]$, $[M_{ss}]$, $[L_{sf}]$, $[M_{rs}]$, $[M_{sr}]$, dans le modèle triphasé obtenu, afin de pouvoir simuler les défauts statoriques en modifiant les coefficients f_{sa}, f_{sb}, f_{sc} selon le nombre de spires en court-circuit. **[14,15]**

Dans notre simulation suivante on va prendre un défaut de court-circuit entre spire ou 32 spires de 160 sont en court-circuit dans la même phase a, donc 20% des spires de la phase a sont en CC.

On définit les coefficients de court-circuit :

$$K_{sa} = N_{cc1}/N_s = 32/160 = 0.2$$

$$K_{sb} = 0$$

$$K_{sc} = 0$$

Le coefficient de spires utiles pour les trois phases statoriques, est alors donné par :

$$f_{sa} = (1 - K_{sa}) = (1 - 0.2) = 0.8$$

$$f_{sb} = (1 - K_{sb}) = (1 - 0) = 1$$

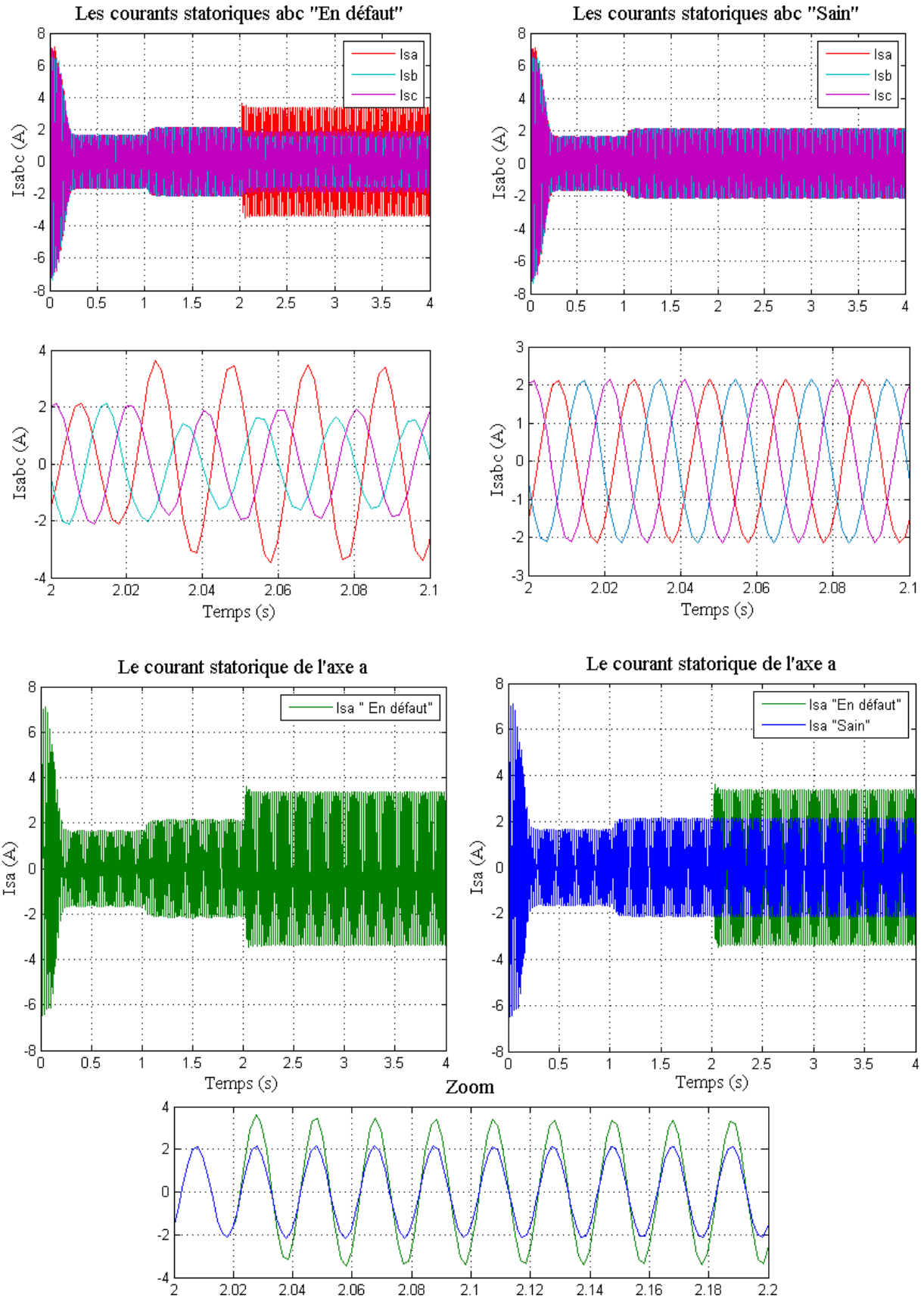
$$f_{sc} = (1 - K_{sc}) = (1 - 0) = 1$$

II.3.1.1 Simulation de la machine asynchrone en présence de défaut de court-circuit entre spires :

On va alimenter la machine asynchrone par un réseaux triphasé directement d'une fréquence 50 Hz et amplitude $220 \times \sqrt{2} V$, sa valeur efficace est de 220 V.

La machine démarre premièrement à vide. Ensuite en charge, en appliquant un couple résistant $C_r = 4 \text{ N.m}$ à l'instant $t = 1 \text{ s}$. Finalement la machine tombe en défaut où un court-circuit entre spires de 20% des spires de la phase à l'instant $t = 2 \text{ s}$.

II.3.1.2 Résultats de la simulation :



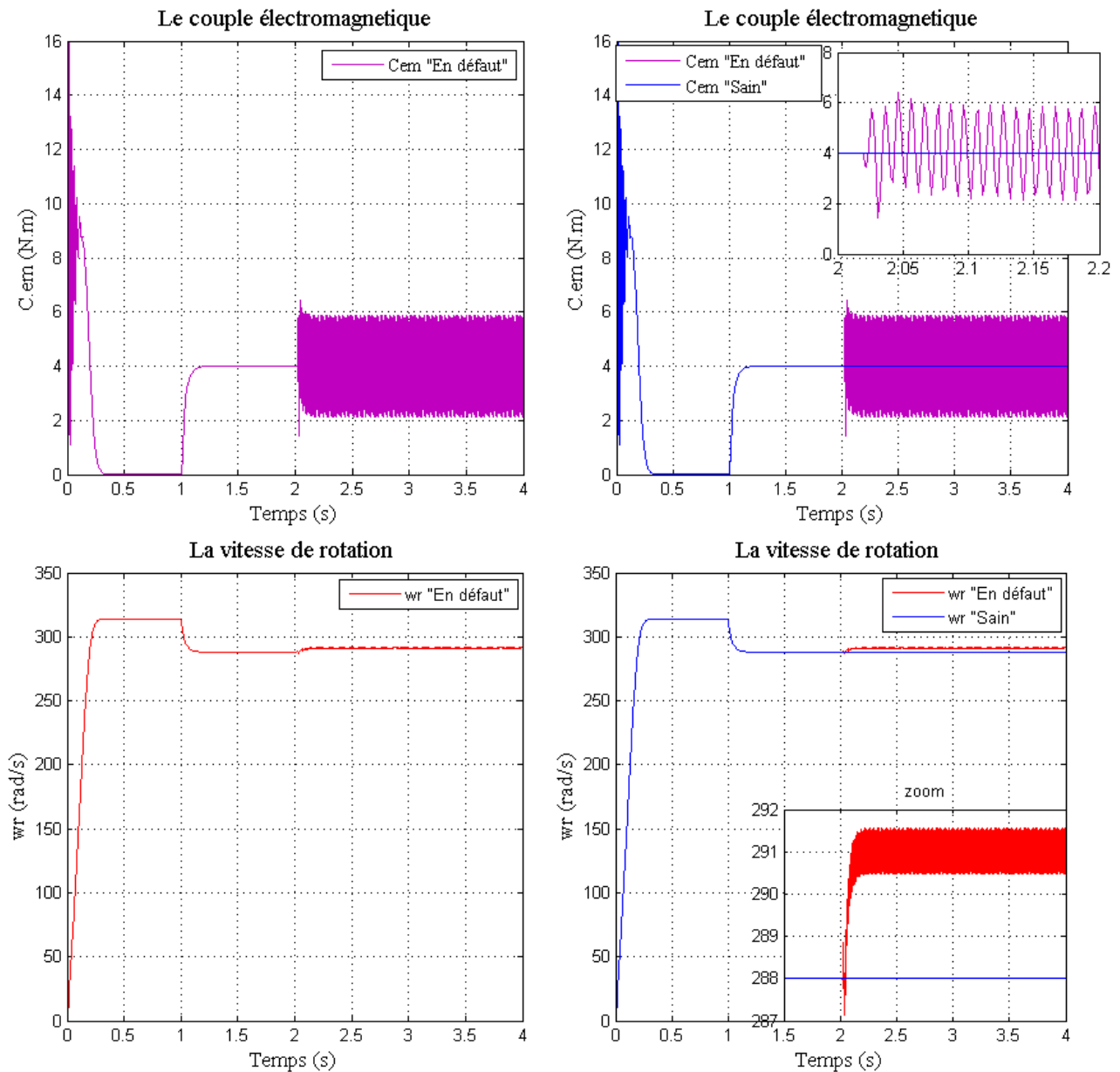


Figure II.7 - Résultat de simulation d'un démarrage direct d'un MAS à vide puis en charge, $C_r=4$ N.m à l'instant $t=1$ s, et en défaut à $t=2$ s, « MAS en défaut à gauche, MAS Sain à droite »

II.3.1.3 Interprétations des résultats

Le défaut de court-circuit entre spires provoque plusieurs effets sur les caractéristiques de la machine asynchrone à cage, ces effets sont des symptômes de la présence de ce défaut, on cite certain de ces effets dans les points ci-dessous :

Des oscillations de petite amplitude au niveau de graphe de vitesse de rotation avec une petite augmentation par rapport à l'état sain.

Au niveau des courants statoriques, amplification d'amplitude des phases défaillantes par rapport au sain, donc l'augmentation d'amplitude du courant I_{sa} de la phase « a » défaillante. Ainsi le déséquilibre des trois courants avec une petite diminution d'amplitude sur les autres courants (I_{sb}).

Sur le couple électromagnétique, lorsque le défaut est apparu, on remarque la perturbation du couple développé par des oscillations de grandes amplitudes.

II.4 Analyse des défauts statoriques par traitement de signal

Pour effectuer le diagnostic de défauts dans une installation, les opérateurs de maintenance analysent un certain nombre de paramètres, tel que la température, le bruit, les vibrations...etc.

Basé sur leur expertise, les symptômes d'un défaut sont le résultat final d'un ensemble de modification des caractéristiques temporelles et fréquentielles d'un certain nombre de grandeurs mesurables.

Pour cela il faut donc analyser les signaux caractéristiques mesurables qui sont extrait de la MAS afin de la surveiller et de détecter le défaut lors de l'apparition de ces symptômes.

L'analyse du signal est l'une des méthodes les plus importantes utilisées pour la surveillance et le diagnostic de défaut, dont le but est de trouver une simple et efficace transformée des signaux originaux cette étape est appelée le traitement du signal. Par conséquent, l'information importante contenue dans les signaux peut être extraite.

Les méthodes de traitement de signal disponibles pour le diagnostic des machines tournantes peuvent être classées en quatre groupes différents : la transformé de Fourier rapide (**FFT**), La transformation de Fourier à court terme (**STFT**), l'analyse spectrale, le spectrogramme, ainsi que la transformée en ondelettes (**WT**) [17].

Par la suite, on va présenter la méthode de traitement de signal la plus utilisée dans la surveillance et détection des défauts.

II.4.1 Analyse spectrale par FFT :

Beaucoup de méthodes d'analyse du signal ont été utilisées pour le diagnostic de défaut, parmi ces méthodes on trouve la **FFT** (Fast Fourier Transformation), une des méthodes les plus extensivement utilisées et les mieux établies.

La transformée de Fourier rapide est un algorithme qui permet le calcul de la valeur d'une transformée de Fourier intermittente rapide. L'algorithme est attribué à James W.Cooley et Johan W.Tukey, qui est développé et publié en 1965. Cette conversion est utilisée pour réduire

le bruit et les signaux qui se chevauchent avec une fréquence de filtre. La détection simultanée des défauts cinétiques, avec **FFT**, est basée sur l'analyse de signature de courant statique, et améliorer en réduisant et en séparant les fréquences déformées de la forme actuelle [17].

Malheureusement, les méthodes basées sur **FFT** ne sont pas appropriées à l'analyse des signaux non-stationnaires et ne peuvent pas indiquer l'information inhérente dans ces signaux [16].

La transformée de Fourier est surtout utilisée pour l'analyse des systèmes en régimes permanents. Cependant, il est possible de la mettre en œuvre pour l'étude de fonctionnements dynamiques (lents), par la méthode du spectrogramme [16].

Cette analyse est la prise en compte à la fois des informations sur l'amplitude et la phase. Le spectrogramme est le calcul répétitif de la transformée de Fourier sur une fenêtre temporelle glissant sur le signal, son calcul sera donc soumis aux paramètres suivants [16]:

- longueur de la fenêtre.
- type de fenêtre de pondération.
- longueur totale du signal analysé.
- pas de glissement de la fenêtre ou pas temporel.

II.4.2 La transformée de Fourier à court terme TFCT ou STFT :

Pour résoudre le problème de certaines limitations de la transformée de Fourier rapide **FFT** comme le manque d'informations sur le temps et le traitement des signaux en régimes non-stationnaires

Short-Time Fourier Transform en anglais, ainsi la transformé de Fourier locale ou transformée de Fourier à fenêtre glissante est une transformation liée aux transformée de Fourier utilisée pour déterminer la fréquence sinusoïdale et la phase d'une section locale d'un signal, le carré du module de cette transformée **STFT** est le spectrogramme qui on va l'utiliser pour le traitement de signal.

La notion de fenêtre fut introduite pour la première fois par Denis Gabor (1946), cette notion consiste à analyser le signal par transformée de Fourier par portion à l'aide de fenêtres temporelles dont la position centrale est déplacée sur tout le long du signal (**figure II.8**). La fenêtre est déplacée sur l'échelle des temps par l'incrément désiré par l'utilisateur.[16]

L'information tirée peut être plus ou moins pertinente selon l'incrément et la longueur de la fenêtre qui doit atténuer la distorsion des spectres obtenus par la transformée de Fourier. La transformation de Fourier à courte terme (**STFT**). Elle est exprimée mathématiquement par la relation de la transformée de Fourier local continu suivante [16] :

$$STFT\{x(t)\} \equiv X(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)w(t - \tau)e^{-j\omega t} dt$$

Où w est la fonction de fenêtrage

Dans le domaine des signaux sinusoïdaux, la relation sera :

$$STFT\{x(t)\} \equiv X(a, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)g(t - a)e^{-j2\pi ft} dt$$

Où :

g : est le complexe conjugué de la fonction de fenêtrage w

a : représente l'échelle

f : représente la fréquence

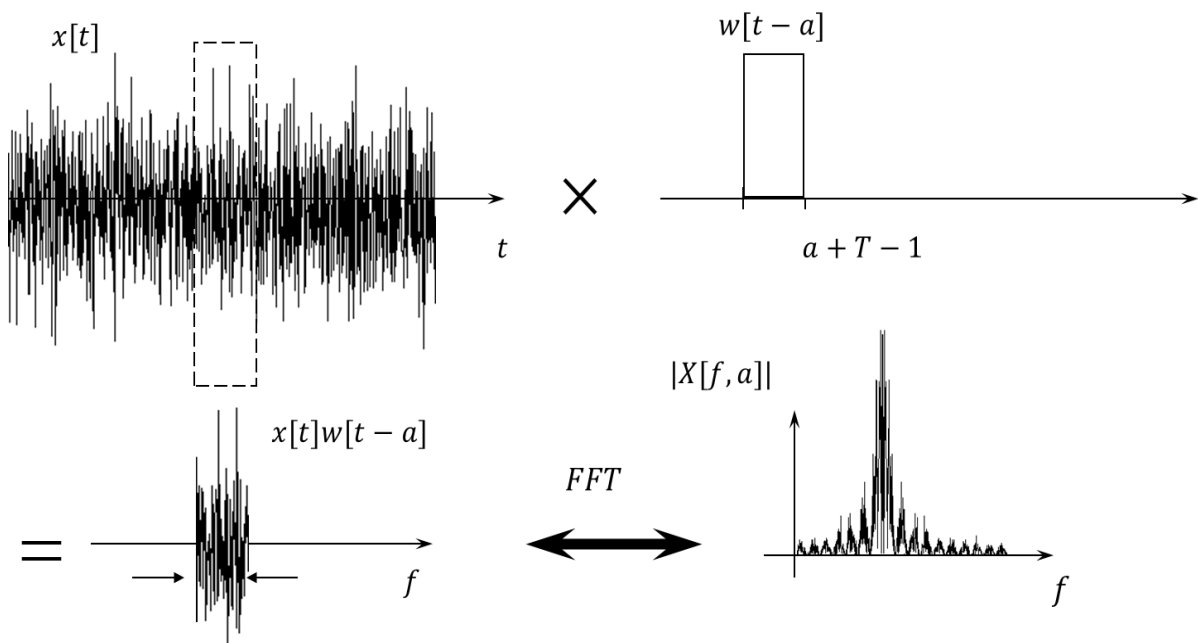


Figure II.8 - les étapes d'un traitement de signal par la transformé STFT

II.4.3 Analyse spectrale des courants statoriques

Une analyse spectrale par STFT était appliquée au signal du courant I_{sa} dans trois cas : sain, 20% de spires en court-circuit et 40% de spires en court-circuit.

La figure (II.9) représente l'allure du spectre fréquentiel du courant statorique de la phase A I_{sa} de la machine dans l'état sain, on ne distingue aucune raie latérale sauf de la raie la fréquence fondamentale (50) Hz jusqu' au 500 Hz.

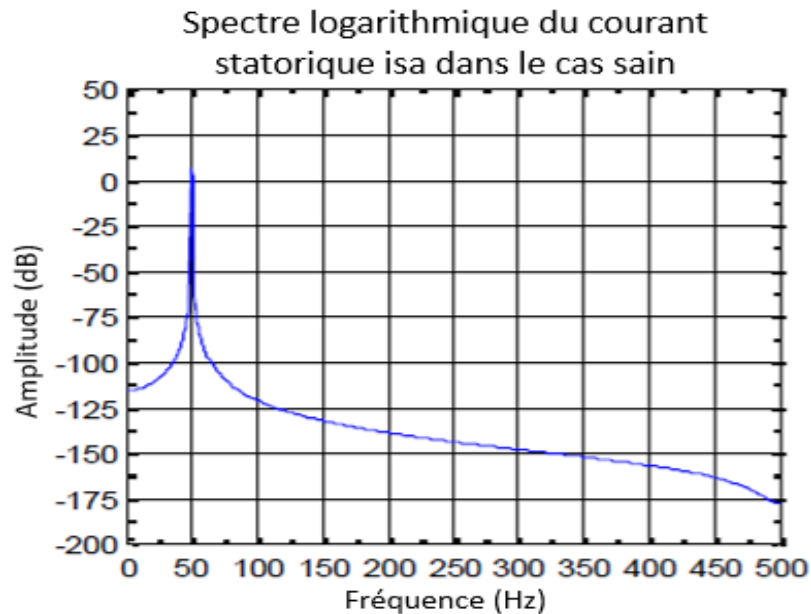


Figure II.10 - Spectre logarithmique du courant statorique I_{sa} dans le cas sain.

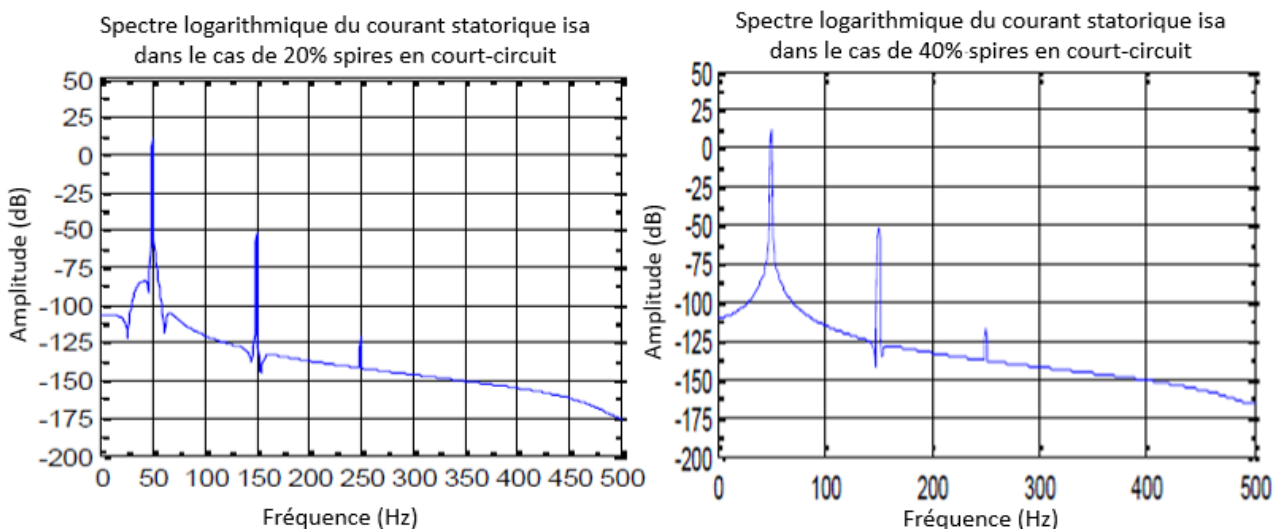


Figure II.9 - Spectre logarithmique du courant statorique I_{sa} dans le cas de 20% et 40% de spires en court-circuit.

La figure (II.10) représente les allures du spectre fréquentiel du courant statorique **I_{sa}** de la machine défectueuse dans le cas de 20% et 40% de spires en court-circuit, on remarque l'apparition de deux raies latérales de différentes amplitudes à 150 Hz et 250 Hz (la 3^{ème} et 5^{ème} harmonie) plus de la fréquence fondamentale (50) Hz.

La figure montre aussi que le pourcentage de spires en court-circuit fait effet qu'à sur les amplitudes des harmoniques d'ordre 3 et 5.

II.5 Conclusion

La machine asynchrone **MAS** a été modélisé par la réalisation d'un modèle triphasé multi-enroulements, ce qui nous permet d'observer son comportement et ses différentes caractéristiques en deux modes : à vide et en charge.

Contrairement au modèle biphasé classique qu'il est très facile à réaliser à cause de la simplicité de ses équations, le modèle triphasé multi-enroulements réalisé vise à modéliser les défauts statoriques et maintenir les trois phases statoriques de la machine.

Parmi les défaillances possibles, notre intérêt c'est porté sur les défauts de court-circuit entre spires, une simulation de défaut de court-circuit entre spires au niveau d'une phase statorique dans la machine asynchrone a été faite à l'aide du modèle réalisé.

En effet, les origines et les conséquences de ce défaut sur le fonctionnement de la machine est telles qu'il est nécessaire d'en parler et exprimer, pour cela les résultats de simulation sont obtenus en deux états de la machine, état sain et en présence de défaut, ce qui nous permet de comparer le comportement de la machine en présence et en absence de défaut de court-circuit entre spires.

De manière générale, lors de l'apparition d'un défaut de court-circuit entre spires, la topologie de la machine est modifiée ce qui implique l'apparition des signatures particulières sur certaines grandeurs physiques ou certains paramètres représentatifs de sa structure, ces signatures qu'on a localisé et interpréter dans les figures représentatives des signaux de la machine.

L'extraction, l'exploitation et l'analyse de ces changements "signatures" constituent le cœur même d'un bon diagnostic de la machine qui peut être fait par expertise "observation"

Par conséquence, Après l'extraction des signaux des courants statorique, un traitement de signal par STFT est fait pour avoir une analyse spectrale basé sur FFT qui transforme les symptômes de défaut en fonction des fréquences pour but de diagnostiquer la machine par expertise.

**Chapitre III. Application d'un diagnostic
automatique par intelligence artificielle à base de
« logique floue »**

Chapitre III. Diagnostic automatique par intelligence artificielle " logique floue "

III.1 Introduction

La surveillance des systèmes d'entraînement est très importante pour l'assurance de la continuité de production et pour ne pas bloquer les autres tâches dans la chaîne de production.

La détection dans un temps trop tôt peut diminuer la gravité des défaillances et leur impact sur tout le système d'entraînement ainsi que la localisation rapide a des avantages sur le côté de maintenance, c'est pour cela la surveillance et le diagnostic continu en temps réel est très importante.

Dans ce chapitre, on va faire un diagnostic automatique par l'un des outils d'intelligence artificielle c'est la logique floue qui va surveiller le système en cas d'un défaut qui va survenir.

Le moteur asynchrone MAS est l'un des éléments principaux d'un système d'entraînement qui va être surveillé par la technique de la logique floue.

La logique floue va détecter automatiquement le défaut de court-circuit entre spires dès son apparition sur le moteur asynchrone.

Le signal RMS du courant des phases statoriques du moteur asynchrone à cage d'écureuil sont utilisés comme des signaux indicateurs de défauts.

III.2 Traitement de signal par RMS

Root Mean square ou la valeur efficace d'un signal est la racine carrée de la moyenne des valeurs constantes au carré de cette grandeur du signal, sur un intervalle de temps donné [18,19] :

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t u(t)^2 dt} \quad (III.1)$$

Pour un signal périodique la relation sera :

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{2T} \int_{-T}^T u(t)^2 dt} \quad (III.2)$$

En domaine électrique la plupart des signaux électrique ont une fréquence f donc la majorité des signaux sont périodiques.

III.2.1 Application du RMS sur les signaux de la machine :

On applique la transformée RMS pour les signaux des courants statoriques abc où le défaut de court-circuit entre spires sera visible donc les signaux de courant sont des signaux indicateurs de défaut (**figure III.1**).

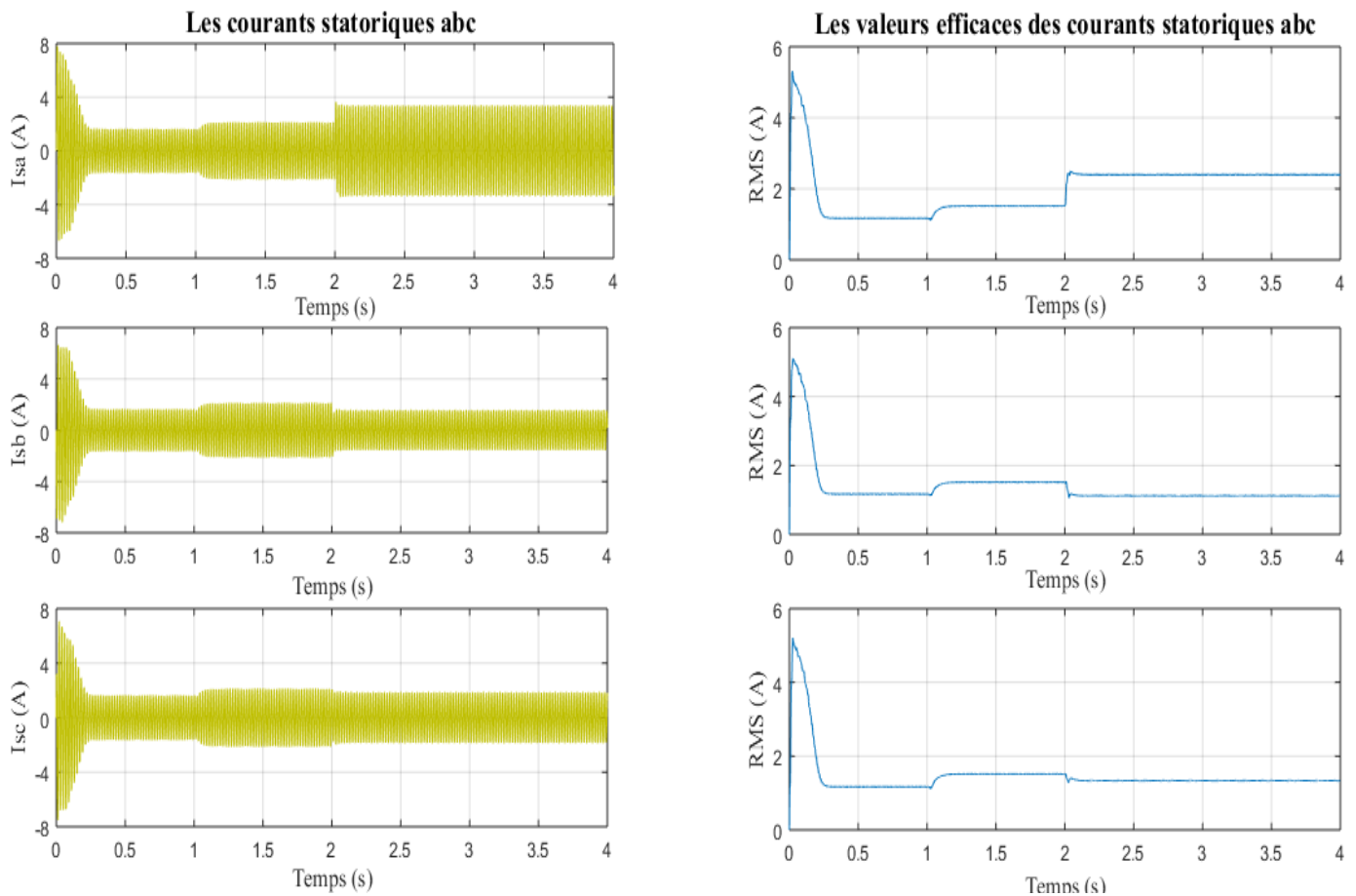


Figure III.1 - Résultat d'application de transformée RMS sur les courants statoriques abc

III.2.1.1 Interprétation :

A l'instant $t=2s$ un court-circuit de 20% des spires survient sur la phase A, il est traduit par l'augmentation de la valeur efficace de courant I_{sa} de la phase A.

Cette dernière augmentation a un effet sur le reste des phases (B, C) apparaît comme une petite diminution dans leurs valeurs efficaces, les signaux et leurs valeurs efficaces se varient cherchant l'équilibre entre eux.

III.3 Le diagnostic par la logique floue

Pour montrer le comportement de la MAS surveillé par RMS des courants indicateurs, ces dernières valeurs digitales de RMS représente une langue d'information résultante de l'analyse de performance et comportement, c'est une image de l'état de la machine elle-même.

Le schéma représenté dans la **Figure III.2** représente les différentes étapes de système de diagnostic automatique à base de logique floue élaboré.

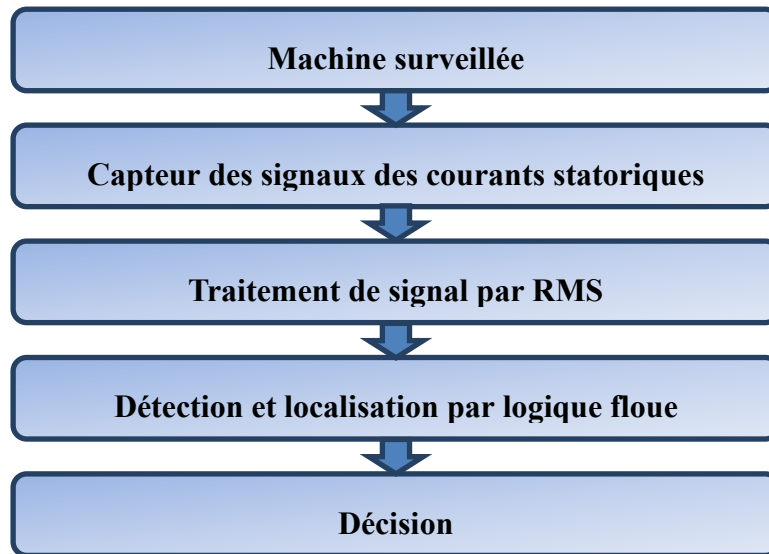


Figure III.2 - schéma représente les étapes d'un diagnostic automatique

L'évaluation de valeurs inductrices par la logique floue consiste à un processus de trois étapes, comme illustré dans la **Figure III.3**

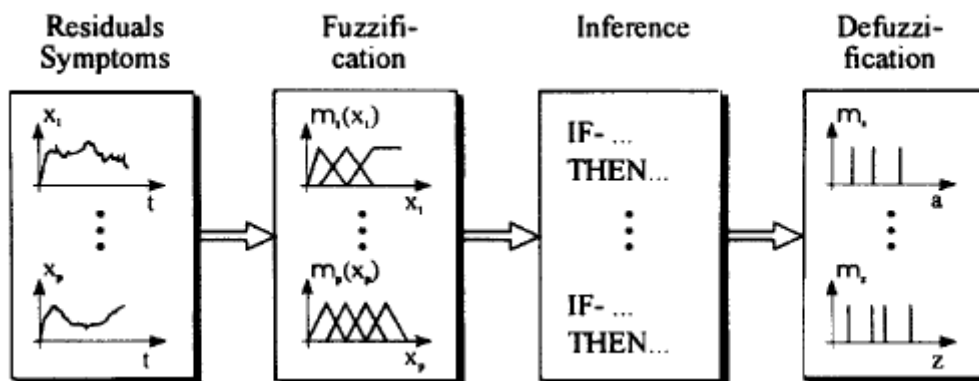


Figure III.3 - Schéma général d'évaluation par logique floue (supervision par floue)

Premièrement, les valeurs doivent être fuzzifier, puis ils doivent être évalués par un mécanisme d'inférence utilisant les règles floues **Si-Alors (IF-THEN)**, et enfin ils doivent être défuzzifiés [20].

III.3.1 La logique floue sous Matlab :

Sous Matlab la logique floue se trouve dans le **Toolbox** qui s'appelle **FuzzyLogic Designer**, cette boîte de dialogue (**figure III.4**) apparait lorsqu'on exécute la commande **fuzzy** dans **Command Window**.

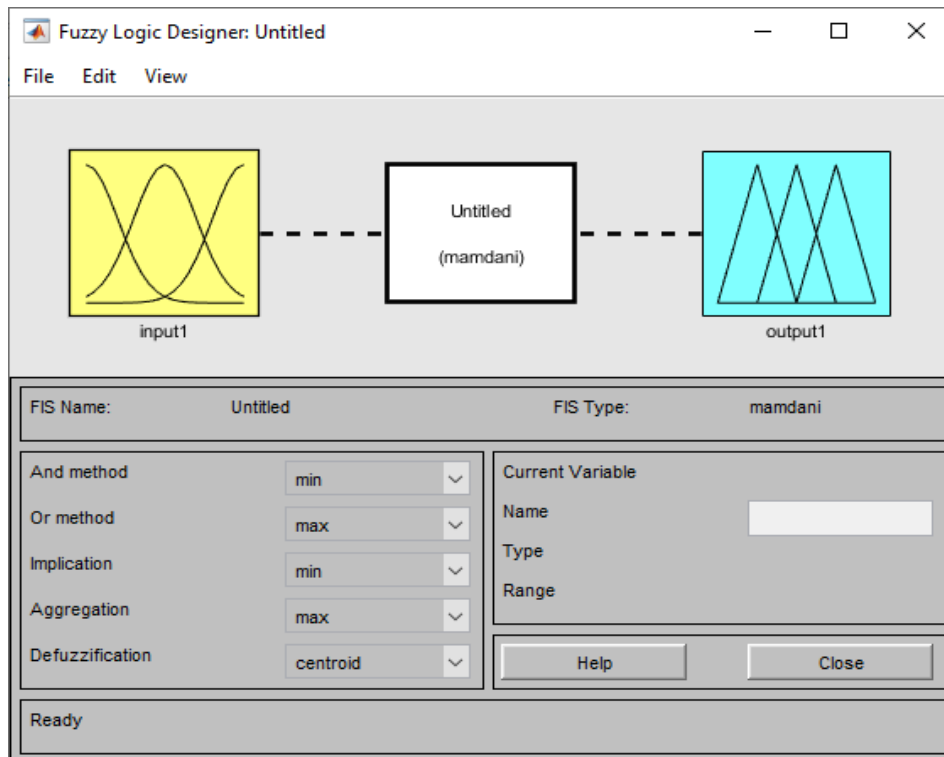


Figure III.4 - la fenetre de l'outil de logique floue sur Matlab 2020a.

La fenêtre de **Fuzzy Logique Desinger** permet d'éditer les **Membership Functions** et les **Rules** et choisir le type de système d'inférence floue (**Fuzzy Inference Systems**).

Membership Functions : c'est une fenêtre pour ajouter et éditer les variables d'entrée et de sortie du l'outil floue et leurs types.

Rules : c'est la fenêtre où on définir les règles (**IF-THEN**).

Fuzzy Inference Systems : c'est la fenêtre où on sélectionne les fonctions d'inférence floue pour :

- And opérations
- Or opérations
- Implication
- Agrégation
- Défuzzification

Ainsi la fenêtre permet de visualiser les entrées et les sorties associés aux fonctions d'inférence floue avec leur diagramme et exporter le système floue à **Matlab Workspace** ensuite **Simulink**.

III.3.2 Elaboration d'un système à base de logique floue pour le diagnostic et la détection des défauts statoriques :

Dans le chapitre précédent, on a déduit que les symptômes d'un défaut de court-circuit entre spires apparaissent dans la phase où les spires sont court-circuitées par une augmentation d'amplitude du signal du courant par rapport au régime sain, après un traitement de signal par **RMS** le symptôme se transforme à une augmentation dans la valeur efficace de la phase concerné.

A base des données et des conclusions précédentes on va utiliser les signaux **RMS** comme des variables d'entrée **Inputs** pour le système diagnostic floue, les sorties **Outputs** seront un signal qui prend la valeur 1 pour la présence de défaut, et 0 (pas de défaut), chaque sortie représente l'état d'une phase.

Afin de former les règles « **Rules** », la machine était simulée en régime normal « sain » à vide après en charge en suite en régime anormal « présence de défaut » pour déduire une méthodologie de détection à base de logique floue **FL**.

Les variables linguistiques sont définies par leurs valeurs linguistiques. Dans notre étude de cas, nous avons correspondu aux fonctions d'appartenance des variables d'entrées qui sont des soustractions entre deux valeurs RMS du courant (Isa-Isb, Isb-Isc et Isc-Isa) qui sont en général des triangles ou des trapèzes. Ces fonctions sont déterminées empiriquement après analyse du fonctionnement du système (à travers la simulation du modèle sain et / ou défectueux). Pour chaque variable, nous définissons les zones dans les ensembles flous comme suit (Négatif, nul, Positif). Les entrées et sorties du système sont définies en utilisant la théorie de la logique floue comme suit [21] :

L'ensemble des valeurs mesurées de l'univers des grandeurs mesurables est :

Isa-Isb, Isb-Isc, Isc-Isa = {**N** : inférieur, **nul** : nul=0, **P** : positif}

L'état des phases A, B et C, est choisi comme étant la sortie du système flou avec :

A = {**A-sain** : sain, **A-def** : en défaut}

B = {**B-sain** : sain, **B-def** : en défaut}

C = {**C-sain** : sain, **C-def** : en défaut}

Les inférences lient les grandeurs mesurées et les variables de sortie par des règles linguistiques. Une règle floue, dans ce cas, est la combinaison de symptômes - défauts.

Les règles « **Rules** » utilisées dans l'étude :

Pour la phase A :

Rule (1) : if Isa-Isb is **nul** and Isb-Isc is **nul** and Isc-Isa is **nul** Then A is **A-sain**

Rule (2) : if Isa-Isb is **P** and Isb-Isc is **not nul** and Isc-Isa is **N** Then A is **A-def**

Pour la phase B :

Rule (1) : if Isa-Isb is **nul** and Isb-Isc is **nul** and Isc-Isa is **nul** Then A is **B-sain**

Rule (2) : if Isa-Isb is **N** and Isb-Isc is **P** and Isc-Isa is **not nul** Then A is **B-sain**

Pour la phase C :

Rule (1) : if Isa-Isb is **nul** and Isb-Isc is **nul** and Isc-Isa is **nul** Then A is **C-sain**

Rule (2) : if Isa-Isb is **not nul** and Isb-Isc is **N** and Isc-Isa is **P** Then A is **B-sain**

III.3.3 Application et simulation de système de diagnostic floue sur la machine :

La machine a travaillé à vide après on applique une charge à l'instant $t=1s$ de valeur $Cr=4$ N.m, Comme premier essai on va simuler un défaut en $t=2s$ de 20% des spires court-circuités de la phase A.

III.3.3.1 Principe de fonctionnement de système de diagnostic floue :

Si la somme des sorties de systèmes de diagnostic égale à 0 la machine est en état Sain si égale à 1 la machine est en Défaut, pour localiser le défaut il faut exploiter les signaux de sorties du système de diagnostic.

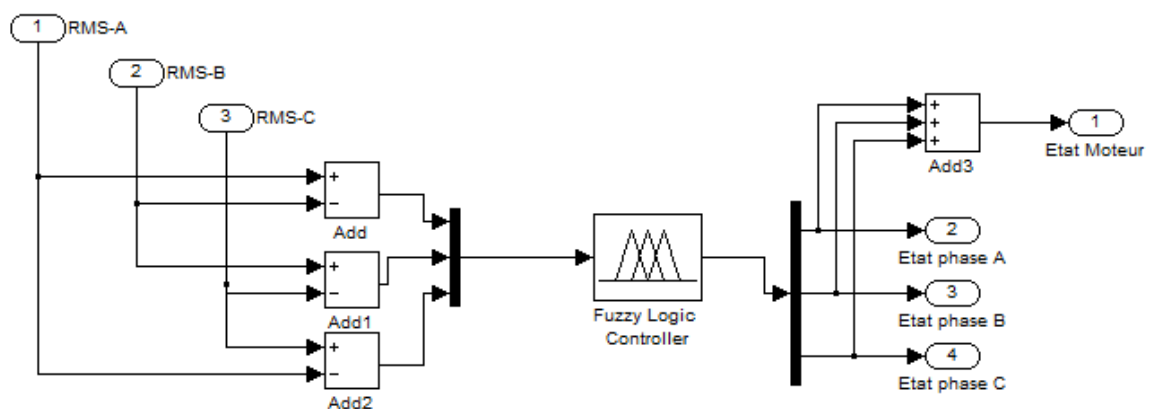


Figure III.5 - structure de système de détection à base de FL

III.3.3.2 Résultat de simulation :

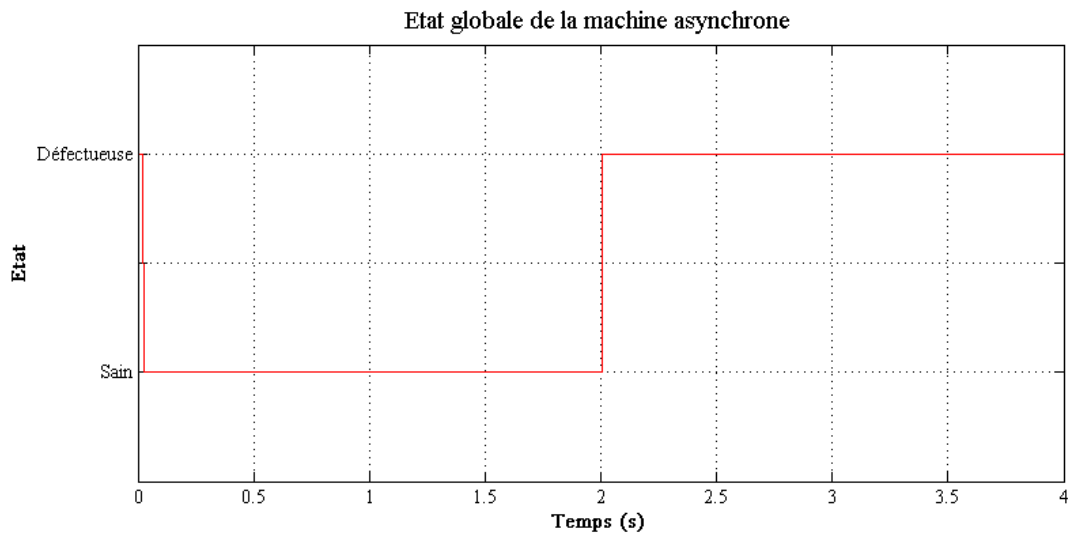


Figure III.7 - Résultat de surveillance de la MAS en fonction d'état

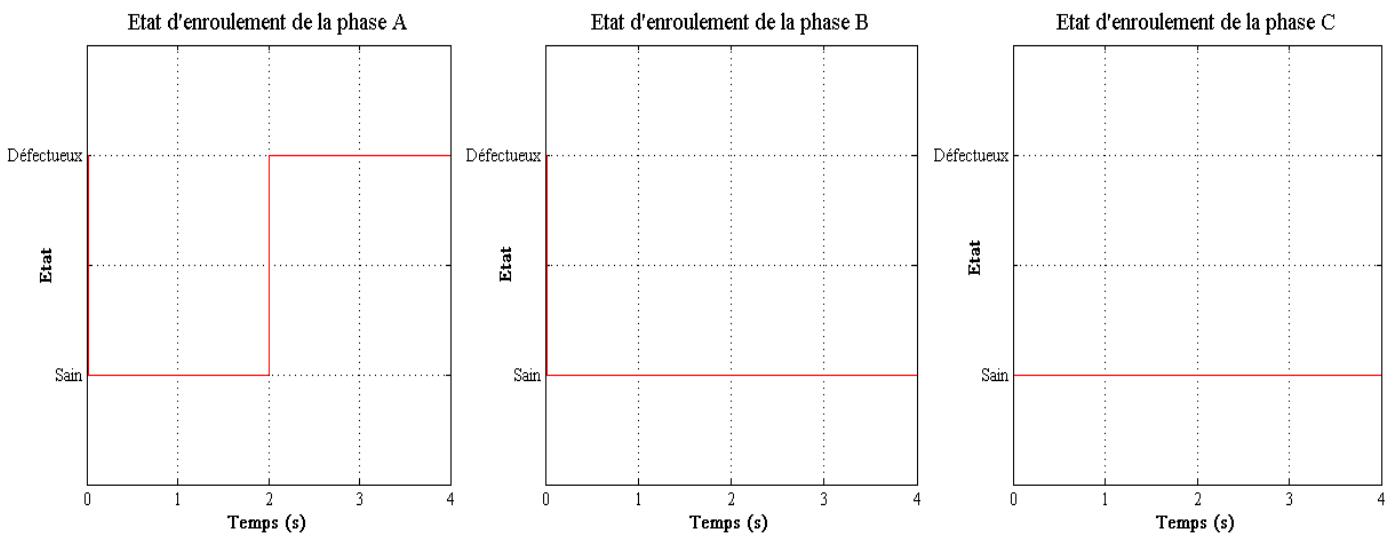


Figure III.6 - L'état des enroulements statoriques de la MAS surveillé

III.3.3.3 Interprétation :

Le système de détection et localisation des défauts de CC entre spires détecte un défaut dans l'enroulement de la phase A à l'instant $t=2$.

On remarque un signal instantané de défaut au début de la simulation, lors de démarrage de la machine, le système des courants statorique triphasé et la machine, cherchent la stabilité et l'équilibrage cela créer un signal instantané au début de simulation dans notre système de surveillance.

III.4 Application au domaine industriel

III.4.1 Programmation sous PLC

La réalisation de ce système de surveillance dans un automate programmable industriel et très facile, on a besoin que des capteurs RMS des courants.

Dans la programmation il existe plusieurs méthodologies pour programmer, on peut utiliser des blocs spéciaux programmables qui comparent deux valeurs RMS du courant ou bien des opérations de soustraction et des comparateurs par rapport au zéro ou bien des comparateurs entre deux valeur bi-décisionnel.

III.5 Conclusion

Après la modalisation de la machine asynchrone multi-enroulements et la détection par méthode traditionnelle à l'aide de la transformé STFT dans le chapitre précédent, le tour maintenant dans ce chapitre pour utiliser une méthode automatique à l'aide d'un outil d'intelligence artificiel.

Un traitement de signal par la transformé RMS pour transformer les signaux des courants triphasés en valeurs efficaces « numériques » afin de les utiliser comme entrées de notre système de détection.

Le système de détection et localisation des défauts est constitué de comparateurs entre valeur RMS des phases et un bloc contrôleur logique floue pour la surveillance.

Les sorties du système de **DLD** sont des sorties indiquent l'état global de la MAS et trois sorties indiquant les états de chaque phase ou enroulement.

Il est à remarquer que le système de surveillance peut aussi utiliser ou indiquer s'il y a un déséquilibre de réseaux triphasés donc un moyen de protection pour indiquer un autre type de défaut.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail fait partie de la maintenance prédictive, le mémoire est une contribution dans le domaine de diagnostic des systèmes d'entraînement 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'entraînement 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'entraînement électrique.

Ce travail est constitué de 3 chapitres :

- Etat de l'art des systèmes d'entraînement électriques et leurs diagnostics.
- Modélisation de la machine asynchrone Multi-enroulements.
- Application d'un diagnostic automatique par intelligence artificielle à base de « 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'entraînement 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 apparaître dans tous les parties du système d'entraînement 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**.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

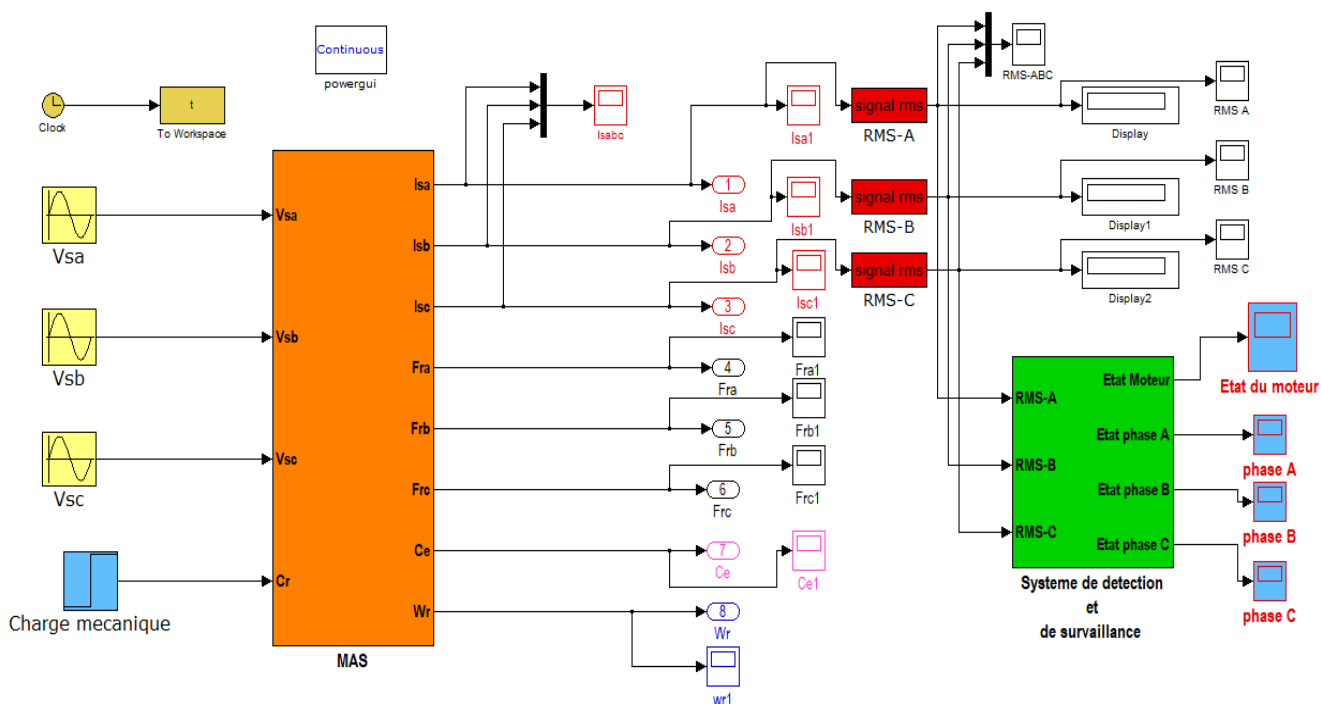
- [1] KHODJA Djalal-Eddine, "Entraînements Electriques des Convertisseurs Electromécanique", synthèse du cours pour master I Ingénierie des systems électromécaniques, 2019.
- [2] Systèmes d'entraînements électriques, documentation dans le site SEW usocom, https://www.usocom.com/entreprise/ce_qui_nous_anime/systemes_dentraiment_electriques/systemes_dentraiment_electriques.html
- [3] BOUZIDI Riad, "Contribution à l'optimisation et à la commande adaptative des entraînements électriques soumis à des défauts multiples", Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie, 2019
- [4] A. Bouguerne, "Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones", Mémoire de Magister, Université Mentouri, Constantine, Algérie, 2009
- [5] Bertrand Raison, "Détection et localisation de défaillances sur un entraînement électrique", Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, France, Septembre 2000
- [6] CHAHMI Abdelghani, "Identification paramétrique de la machine dédiée au diagnostic", Thèse de Doctorat, Université des sciences et technologies Mohamed Boudiaf, Oran, Algérie, 2017
- [7] HADJ HAFSI Zohir, "Détection et isolation des défauts d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil par observateur d'état", Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf de M'sila, Algérie, 2013
- [8] OLIVIER Ondel, "Diagnostic par reconnaissance des formes : application à un ensemble convertisseur-machine asynchrone", Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, 2006
- [9] KHODJA Djalal-Eddine, "Elaboration d'un système intelligent de surveillance et de diagnostic automatique en temps réel des défaillances des moteurs à induction", Thèse de Doctorat, Université de M'hamed Bouguera de Boumerdès, Algérie, Avril 2007
- [10] SAKHARA Saadi, "Diagnostic des défauts d'un entraînement électrique par la technique ondelette", Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba, Algérie, 2017
- [11] SAHRAOUI Dahmane, "Estimation par filtre de Kalman étendu des états et paramètres de la machine asynchrone en vue de détection des défauts", Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf de M'sila, Algérie, 2013
- [12] X.Chang, V.Conquenmpot, C.Christophe, "Modélisation de la machine asynchrone en présence de pannes du stator", http://www.univ-lille1.fr/lail_2002.
- [13] T. Boumegoura, " Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic", Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon Ecully, France, 2001.
- [14] Madani Nadir, "Diagnostic de défaillances de l'ensemble convertisseur-moteur et commande par les techniques de l'intelligence artificielle", Mémoire de Master, Université de M'SILA, 2012.

- [15] KHODJA Djalal-Eddine, et KHELDOUN Aissa, “Three-phases Model of the Induction Machine Taking Account the Stator Faults”, revue world academy of science, engineering and technology Vol 52, pp. 150-157, 2009.
- [16] Saci Fawzi, “Modèle multi-enroulements de la MAS dédiées au diagnostic”, Mémoire de Master, Université de M’SILA, 2013.
- [17] Boussag Essadiq, Bouaziz Said, “Détection de défaut de court-circuit entre spires statoriques d’une machine synchrone a aimants permanant MSAP”, Mémoire de Master, Université de M’SILA, 2019.
- [18] International electrotechnical commission (IEC)-IEC 60025 ; 103-02-03
- [19] Choudira Ibrahim, Khodja Djalel Eddine, chakroune Salim, “Induction machine faults detection and localization by neural networks methods”, Revue d’intelligence artificielle, Vol. 33, No. 6, pp. 427-434, December, 2019
- [20] Paul M. Frank and Birgit Kiippen-Seliger, “Fuzzy logic and neural network applications to fault diagnosis”, International journal of approximate reasoning 1997 ;16 :67-88, Elsevier Science Inc, 655 Avenue of the Americas, New York, NY 10010
- [21] Choudira Ibrahim, Khodja Djalel Eddine, chakroune Salim, “Fuzzy logic based broken bar fault diagnosis and behavior study of induction machine”, Revue Journal Européen des Systèmes Automatisés, Vol. 53, No. 2, pp. 233-242, April, 2020
- [22] G. Didier, “Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillance”, Doctorat de l’Université Henri Poincaré, Nancy 2004.
- [23] Abdelouhab AITOUICHE, “Detection et localisation des défaillances de capteurs”, Thèse de doctorat, Université de Nancy I, France, 1990.

Annexes

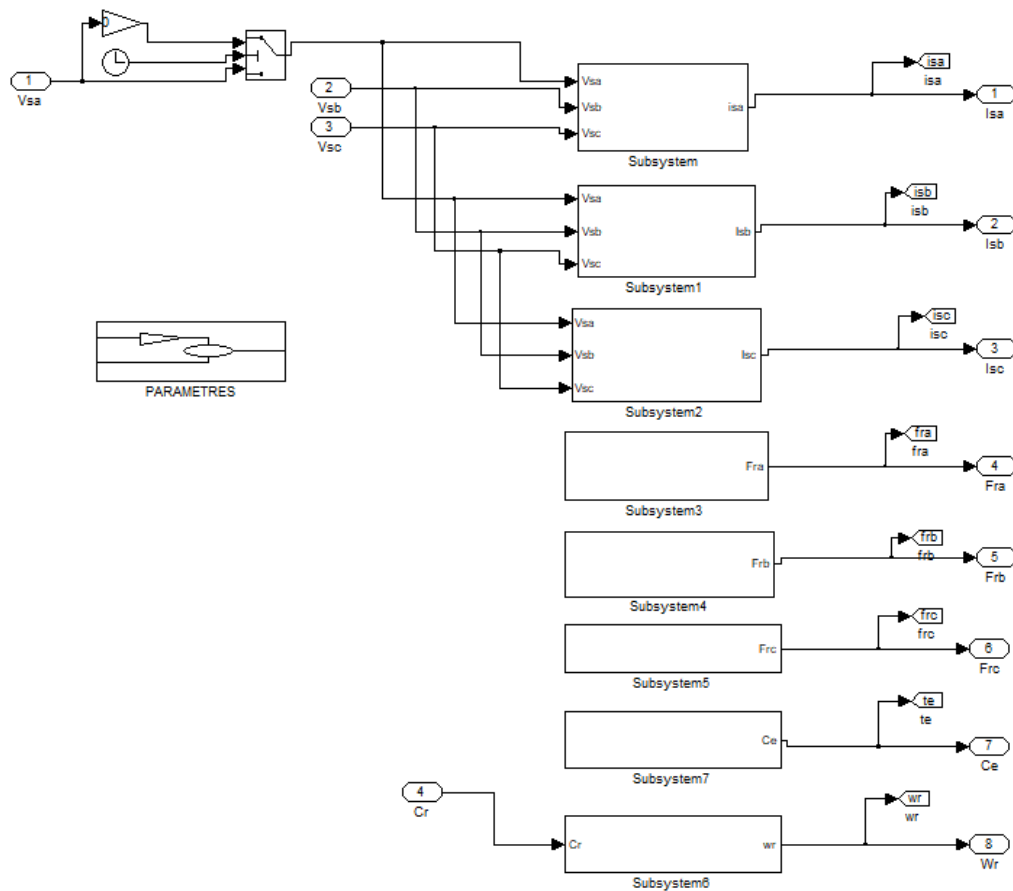
A. : schéma bloc d'un système de détection et localisation des défauts d'un entraînement électrique

Le schéma contient un système d'alimentation triphasé, un bloc de la machine asynchrone multi-enroulements, des capteur RMS et un système de détection et localisation des défauts de CC entre spires à base de logique floue.



A. 1 - schéma bloc de la surveillance d'un système d'entraînement électrique.

B. : Machine asynchrone Multi-enroulements



A. 2 - schéma bloc de la machine asynchrone multi-enroulements.

C. Paramètres de la machine asynchrone multi-enroulements

$P = 1,5 \text{ KW}$

$R_S = 7.58\Omega$

$L_S = 0.018\text{H}$

$M_S = 0.009\text{H}$

$M_{SR} = 0.542\text{H}$

$f = 0p = 1$

$R_r = 6.3 \Omega$

$L_r = 0.022\text{H}$

$M_r = 0.011\text{H}$

$J = 0.0054 \text{ Kg.m}^2$

D. Les coefficients de la modélisation de la machine asynchrone

$f_{sa} = 1/0.8/0.4$

$f_{sb} = 1$

$f_{sc} = 1$

$d_1 = 14.01$

$K = 4.682$

$T = 31.857$

$d_2 = 2.696$

$G = 26.14$

$\partial = 14.17$