



Université ABBES LAGHROUR Khenchela
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Industriel
جامعة عباس لغرور خنشلة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة الصناعية



N° Série :

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commande Electrique

Présenté par

H'MADA EL MOCTAR EL KEIHEL

SID'ELMOKHTAR ABDALLAHI JEYED

THEME

MODELESATION ET SIMULATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE EN PRESENCE DES DEFAILLANCES

Soutenu le 01/07/2019 devant la commission d'examen composée de :

Mr. RAFIK LABDANI	MAA à l'Université de Khenchela	Président
Mr. NABIL BENHADDA	MCB à l'Université de Khenchela	Encadreur
Mr. ABD RAHMEN KHEMIS	MAA à l'Université de Khenchela	Examineur

Promotion 2018/2019

سُبْحَانَكَ اللَّهُمَّ رَبِّيَ الْأَعْلَى

<< وَقُلْ رَبِّ زِدْنِي عِلْمًا >>

DÉDICACE

Je dédie ce travail :

A mon père **MOCTAR**, qui peut être fier de trouver ici le résultat des longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie, mon père qui m'a comblé avec tendresse et affection tout au long de mon parcours. Qui n'a pas cessé de me soutenir et de m'encourager durant toutes les années de mes études, Il a toujours été présent à mes côtés pour me consoler quand il fallait. Puisse le tout puissant te donner santé, bonheur et longue vie afin que je puisse te combler à mon tour. Autant de phrases et d'expressions aussi éloquentes soient-elles ne sauraient montrer le degré d'amour et d'affection que j'éprouve pour toi ni ma gratitude et ma reconnaissance.

A Ma mère **MARIEM**, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

A Mes frères sœurs, **LEMINA, WEHBA, AICHETOU**, et **BECAR** qui n'ont pas cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

A tous les membres de ma famille : mes tantes, mes oncles ainsi que mes cousins et cousines, petits et grands, Veuillez trouver dans ce modeste travail l'expression de mon affection.

A mes chères amies, je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes pensées, vous êtes pour moi des sœurs et des amis sur qui je peux compter. En témoignage de l'amitié qui nous uni et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

H'MADA EL MOCTAR EL KEIHEL

Dédicace

À mon père, ciel de ma vie, qui est toujours fier de moi;

À ma mère, sang de mon cœur, qui a toujours cru en moi ;

Que Dieu vous protège...Je vous aime très fort ;

J'ai l'hommage de vous offrir ce modeste travail, si grand qu'il puisse être, ne sera à la hauteur de vos sacrifices et vos prières pour moi.

À mes frères, toujours fiers de moi, et toujours près de moi je vous dédie ce travail espérant qu'il soit au niveau de vos attentes de votre frère aîné.

À mes oncles & tantes en témoignage de mon amour, de mon profond

Respect

À mes cousins & cousines, que ce travail soit pour vous l'expression de ma

Gratitude et de toute mon affection.

Que DIEU le tout puissant m'aide à réaliser vos rêves.

À toute ma famille, je vous porte un grand respect.

À mes amis

Pour tous les moments inoubliables que nous avons passés ensemble...

À vous, qui partagez avec moi, en ce moment, ces agréables sentiments.

Sid' el Mokhtar abdallahi jeyed

Remerciements

*Nous aimerons en tout premier lieu, remercier le bon Dieu **ALLAH**, tout puissant, de nous avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.*

*Nous tenons à remercier tout particulièrement et à témoigner toute nos reconnaissance au Monsieur **Dr.Nebil Benhadda**, Enseignant à l'université de **ABBES LEGHROUR**. En tant que Directeur de mémoire, il nous a guidé dans notre travail et nous a aidé à trouver des solutions pour avancer, nous le remercier de nous avoir encadré, orienté, aidé et conseillé tout au long de notre projet de mémoire de fin d'études. Nous le remercier aussi pour sa patience.*

Nous adressons par ce présent rapport, mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes du Département de génie électrique, qui pourraient voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.

Hommages à nos chers parents et une cordiale reconnaissance envers nos sœurs et frères.

Afin de n'oublier personne, nos vifs remerciements s'adressent à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Résumé :

Il est impossible d'imaginer notre vie aujourd'hui sans les machines électriques (tournantes), ces dernières qui ont un impact significatif pour la plupart des produits et des œuvres, d'être présentés dans de nombreux domaines.

Le processus de la surveillance des machines tournantes menant à un bénéfice en temps et en argent, donc le processus de diagnostic a pour objectif de détecter les défauts d'une manière précoce, est devenu un impératif.

Le diagnostic des défauts avant ses conversions à un dysfonctionnement s'effectue de diverses techniques, Cependant, les chercheurs, aujourd'hui, sont en concurrence et accélèrent afin de trouver un moyen plus efficace pour détecter les défauts dans les machines tournantes,

Le travail réalisé dans ce mémoire sera limité à l'étude de deux défauts qui sont la coupure d'une ou de trois phases et au déséquilibre d'une et deux phases. Les résultats obtenus montrent qu'à la coupure d'une phase la machine continue à fonctionner, dans le cas de coupure de trois phases la machine s'arrête. De même pour le déséquilibre mais avec des perturbations dans les caractéristiques de la machine.

Mot clés :

Moteur asynchrone triphasé, Défaut, coupure d'une phase, coupure des phases, Défaut déséquilibre d'une phase, deux phases. Maintenance, Diagnostic de défaillance.

ملخص

إنه من غير الممكن تصور الحياة اليوم من دون آلات (ماكينات) كهربائية ومن جملة هذه الآلات نذكر الدوارة منها، هذه الأخيرة التي لها الأثر الكبير لعدد من المنتجات والأشغال، لتكون متواجدة في عديد من المجالات

إن عملية صيانة هذه الآلات تؤدي إلى الربح في الوقت والمال لذا فإن عملية التشخيص لاكتشاف العيوب (الأعطاب) في وقت مبكر أضحت ضرورة حتمية

إن تشخيص أي عيب (خلل) قبل تحوله إلى عطب يتم بعدة تقنيات إلا أن الباحثين اليوم يتنافسون ويتسارعون لإيجاد طريقة أكثر فاعلية لاكتشاف العيوب في الآلات الدوارة

إن العمل المنجز في هذه المذكرة يتطرق إلى تطبيقين الأول يخص دراسة قطع طور أو قطع ثلاثة أطوار التغذية والثاني يقتصر على أحداث عدم توازن في طور أو طورين. توضح النتائج التي تم الحصول عليها أنه في حالة قطع طور تستمر الماكينة في العمل، وفي حالة انقطاع الأطوار الثلاثة الماكينة لا تستغل.

الشيء نفسه ينطبق على الماكينة في حالة أحداث عدم توازن في طور أو طورين ولكن مع الاضطرابات في خصائص الماكينة.

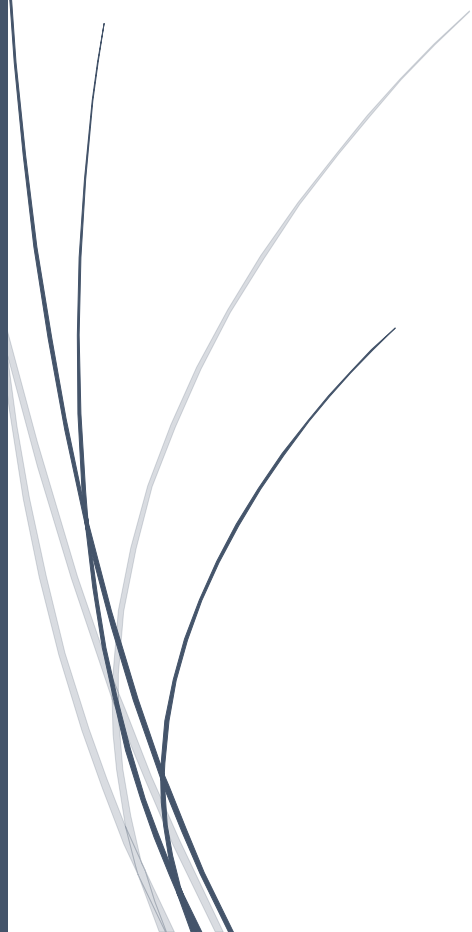
كلمات افتتاحية

الألة لا متزامنة عدم توازن في طور أو طورين قطع طور أو قطع ثلاثة أطوار الصيانة التشخيص



2018/2019

Liste des figures



Liste des figures		
N° de figure	Titre de figure	Page
Figure I.1	Méthodes de maintenance et les évènements associés	5
Figure I.2	Maintenance préventive systématique	6
Figure I.3	Maintenance préventive systématique	7
Figure I.4	Les différents indicateurs utilisés pour le diagnostic	7
Figure I.5	Les étapes de diagnostique	9
Figure I.6	Chaine d'acquisition	10
Figure I.7	Principe de surveillance par l'utilisation des signaux	11
Figure II.1	La distribution des défauts dans les machines électriques	15
Figure II.2	Distribution des défauts des machines asynchrones fonctionnant dans l'industrie pétrochimique	16
Figure II.3	Vue éclatée de la machine asynchrone	17
Figure II.4	Vue éclatée des éléments constitutifs d'un roulement à billes	21
Figure II.5	L'excentricité statique et excentricité dynamique	22
Figure II.6	Le défaut d'alignement des arbres	23
Figure II.7	Défaut de désalignement des paliers	24
Figure II.8	Engrenage à denture droite.	24
Figure III.1	Constitution de La machine asynchrone	28
Figure III.2	Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée	31
Figure III.3	Référentiel tournant d'axes (d-q)	36

Figure III.4	Schéma bloc de la machine asynchrone alimentée en tension.	40
Figure III.5	Schéma de simulation de la MAS	43
Figure III.6	Courant Statorique (A) à vide	44
Figure III.7	Courant Statorique (A) en charge	44
Figure III.8	Courant rotorique (A) à vide	44
Figure III.9	Courant rotorique (A) en charge	44
Figure III.10	la vitesse (rad/s) à vide	44
Figure III.11	la vitesse (rad/s) en charge	44
Figure III.12	couple (N.m) à vide	45
Figure III.13	couple (N.m) en charge	45
Figure IV.1	bloc de la machine asynchrone MAS	48
Figure IV.2	Tension d'alimentation (V) (cas d'une coupure d'une phase)	49
Figure IV.3	Zoom de la tension d'alimentation (V) (cas coupure d'une phase)	49
Figure IV.4	Vitesse en (rad/s) (cas d'une coupure d'une phase)	49
Figure IV.5	Couple en (Nm) (cas d'une coupure d'une phase)	49
Figure IV.6	Courant I_{sa} en (A) (cas d'une coupure d'une phase)	50
Figure IV.7	Zoom Courant I_{sa} en (A) (cas d'une coupure d'une phase)	50
Figure IV.8	Tension d'alimentation (V) (Cas d'une coupure de phase A)	51
Figure IV.9	Zoom de la tension d'alimentation (V) (Cas coupure de phase A)	51
Figure IV.10	Tension d'alimentation (V) (Cas d'une coupure de phase B)	51
Figure IV. 11	Zoom de la tension d'alimentation (V) (Cas coupure de phase B)	51

Figure IV.12	Tension d'alimentation (V) (Cas d'une coupure de phase C)	51
Figure IV.13	Zoom de la tension d'alimentation (V) (Cas coupure de phase C)	51
Figure IV.14	Vitesse en (rad/s) (Cas d'une coupure d'une phase)	52
Figure IV.15	Couple en (Nm) (Cas d'une coupure d'une phase)	52
Figure IV.16	Courant Isa en (A) (Cas d'une coupure d'une phase)	52
Figure IV.17	Zoom Courant Isa en (A) (Cas d'une coupure d'une phase)	52
Figure IV.18	Déséquilibre de la tension d'alimentation (V) (cas d'une phase A)	53
Figure IV.19	Zoom déséquilibre de la tension d'alimentation (V) (cas d'une phase A)	53
Figure IV.20	Vitesse en (rad/s) (cas déséquilibre d'une phase)	53
Figure IV.21	Couple en (Nm) (cas déséquilibre d'une phase)	53
Figure IV.22	Courant Isa en (A) (Cas d'un déséquilibre d'une phase)	54
Figure IV.23	Zoom Courant Isa en (A) (Cas d'un déséquilibre d'une phase)	54
Figure IV.24	Déséquilibre de la tension d'alimentation (V) (cas d'une phase A)	54
Figure IV.25	Zoom déséquilibre de la tension d'alimentation (V) cas d'une phase A)	54
Figure IV.26	Déséquilibre de la tension d'alimentation (V) (cas d'une phase B)	55
Figure IV.27	Zoom déséquilibre de la tension d'alimentation (V) (cas d'une phase B)	55
Figure IV.28	Courant Isa en (A) (Cas d'un déséquilibre d'une phase)	55
Figure IV.29	Zoom Courant Isa en (A) (Cas d'un déséquilibre d'une phase)	55
Figure IV.30	Courant Isa en (A) (Cas d'un déséquilibre deux phases)	55
Figure IV.31	Zoom Courant Isa en (A) (Cas d'un déséquilibre deux phases)	55



2018/2019

Liste des symboles

Liste des symboles

$[A]$: Matrice de la transformation de Park

$[I_r]$: Vecteur des courants rotoriques

$[I_s]$: Vecteur des courants statoriques

$[L_s]$: Matrice des inductances statoriques

$[L_r]$: Matrice des inductances rotoriques

$[M_{sr}]$: Matrice des inductances mutuelles entre les phases du stator et celles du rotor

$[R_s]$: Matrice des résistances statoriques

$[R_r]$: Matrice des résistances rotoriques

$[V_r]$: Vecteur des tensions rotoriques

$[V_s]$: Vecteur des tensions statoriques

$[\Phi_s]$: Vecteur des flux statoriques

$[\Phi_r]$: Vecteur des flux rotoriques

β : Angle de contact de la bille avec les bagues

$[\Delta_c]$: Composante variable du couple

$[\omega]$: Pulsation mécanique

$[\omega_c]$: Pulsation équivalente à la fréquence caractéristique du défaut

$[\omega_r]$: Pulsation mécanique du rotor

$[\omega_s]$: Pulsation de l'alimentation statorique

$[\Omega]$: Vitesse angulaire mécanique du rotor

$[\theta]$: Angle mécanique dans le repère fixe du stator

$[\theta_r]$: Position angulaire du rotor

$[\theta_s]$: Position angulaire du stator

F: Force magnétomotrice

$[D_c]$: Diamètre de la cage du roulement

$[D_b]$: Diamètre d'une bille du roulement

$[f_{bi}]$: Fréquence caractéristique du défaut sur une bille

$[f_{bex}]$: Fréquence caractéristique du défaut sur la bague externe

$[f_{bex}]$: Fréquence caractéristique du défaut sur la bague interne

$[f_{ca}]$: Fréquence caractéristique du défaut de cage

f_r : Fréquence de rotation mécanique du rotor

f_s : Fréquence d'alimentation du stator

F_r : Force magnétomotrice rotorique

F_s : Force magnétomotrice statorique

g : Glissement

H : Champ magnétique

i_{rd} : Composante du courant rotorique suivant l'axe d

i_{sd} : Composante du courant statorique suivant l'axe d

i_{rq} : Composante du courant rotorique suivant l'axe q

i_{sq} : Composante du courant statorique suivant l'axe q

B : Induction magnétique

C_c : Amplitude de l'oscillation du couple

C_{charge} : Couple de charge

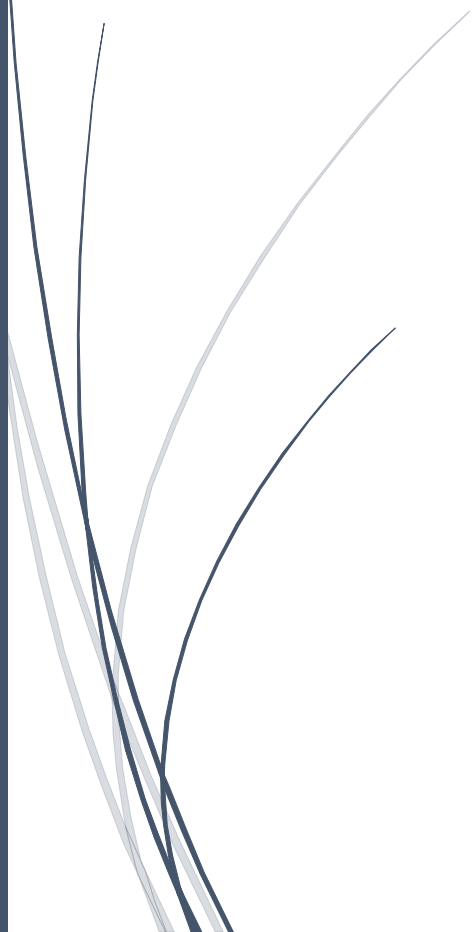
C_{em} : Couple électromagnétique

C_{moteur} : Couple moteur



2018/2019

Table des matières



Dedicace 1
Dedicace 2
Remerciement
Résumé
Liste des figures
Liste des symboles
Table des matières

Introduction générale	1
-----------------------	---

Chapitre I : Généralité sur la Maintenance Conditionnelle

I.1 Introduction	4
I.1.1 Définition	4
I.1.2 Types de maintenance	4
I.2 De la maintenance préventive au diagnostic	6
I.2.1 Maintenance systématique	6
I.2.2 Maintenance conditionnelle	7
I.3 Outils de la maintenance conditionnelle	7
I.3.1 Les différentes étapes de diagnostic d'un système	8
I.3.1.1 Elaboration d'indicateurs de défauts	10
I.3.1.2 Détection de défauts	10
I.3.1.3 Localisation de défaut	10
I.3.1.4 Prise de décision	10
I.3.2 Diagnostic appliqué aux machines électriques	10

I.3.2.1 Méthodologie de surveillance avec modèle	10
I.3.2.2 Méthodologie de surveillance sans modèle	11
I.4 Méthodes de la maintenance conditionnelle	11
I.4.1. Analyse temporelle	11
I.4.2 Vecteur de Park	12
I.4.3 Analyse statistique des signaux	12
I.4.3.1 Le Kurtosis	12
I.4.3.2 Facteur de crête	12
I.4.4 Analyse fréquentielle	12
I.4.4.1 Analyse spectrale	12
I.4.4.2 Analyse cepstral	12
I.4.4.3 Analyse d'enveloppe	13
I.5 Conclusion	13

Chapitre II : Défaits de la machine asynchrone

II.1 Introduction	15
II.2 Constitution du moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil	16
II.3 Défaillances dans un moteur asynchrone triphasé à cage	18
II.3.1 Défaillances statoriques	18
II.3.1.1 Défaillances du Carter	18
II.3.1.2 Défaillances de la boîte à bornes	18
II.3.1.3 Défaillances du circuit magnétique	19
II.3.1.4 Défaillances des conducteurs	19

II.3.2 Défaillances rotoriques	19
II.3.2.1 Défaillances du circuit magnétique	19
II.3.2.2 Défaillances des conducteurs	19
II.3.2.3 Défaillances de l'arbre	20
II.3.2.4 Défaillances du ventilateur	20
II.3.3 Défaillances des paliers	20
II.3.3.1 Défaillances des flasques	20
II.3.3.2 Défaillances des roulements	20
II.4 Défauts de la chaîne de transmission	22
II.4.1 Déséquilibre : défaut de balourd	22
II.4.2 Défaut d'alignement	22
II.4.3 Désalignement d'arbres accouplés	23
II.4.4 Désalignement des paliers	23
II.4.5 Défauts de serrage	24
II.4.6 Défaut d'engrenage	24
II.4.6.1 L'usure	25
II.4.6.2 Les piqûres (Pitting)	25
II.4.6.3 L'Écaillage	25
II.5 Conclusion	25

Chapitre III : Modélisation de la machine asynchrone

III.1 Introduction	27
III.2 Définition de la machine asynchrone	27

III.3 Description de la machine asynchrone triphasée	28
III.4 Avantages et inconvénients de la machine asynchrone	29
III.5 Modélisation de la machine asynchrone	30
III.5.1 Hypothèse simplificatrices	30
III.5.2 Modélisation de la MAS dans le plan triphasé abc	30
III.5.3 Équations générales de la machine asynchrone triphasée	31
III.6 Transformation de Park	35
III.6.1 Différents repères	35
III.6.2 Modélisation de la MAS dans le plan biphasé d-q	36
III.6.3 Equation électrique	38
III.7 la machine asynchrone alimentée en tension	39
III.8 Représentation d'état du modèle de la MAS	40
III.9 Simulation du modèle de la machine asynchrone	42
III.10 Interprétation des résultats de simulation	45
III.11 Conclusion	46

Chapitre IV Simulation et resultats

IV.1 Introduction	48
IV.2 Simulation du modèle de la machine asynchrone en présence de défauts	48
IV.3 Résultats de simulations	49
IV.4 Conclusion	56
Conclusion générale	58

Annexe

Bibliographe



2018/2019

Introduction générale



Introduction générale

Dans des nombreux secteurs industriels, la disponibilité et la sûreté de fonctionnement sont des enjeux majeurs pour assurer une continuité optimale de l'outil de production [1].

Tout changement indésirable ou un arrêt inattendu provoquera des pertes économiques considérables.

Pour éviter ce genre de problèmes, les chaînes de production doivent être dotées de systèmes de diagnostic fiables permettant de détecter n'importe quel défaut ou changement dans l'état de fonctionnement avant la défaillance totale [2].

Le travail présenté dans ce mémoire d'initiation à la recherche, rentre dans le cadre général du diagnostic des défauts dans les machines électriques, L'importance de ce type de machines revient au fait qu'elle représente un élément clé de la plupart des équipements industriels, vu sa grande robustesse et son faible coût par rapport aux autres types de machines électriques. Elle est en effet, présente dans tous les secteurs de pointes, tels que l'aéronautique, le nucléaire, la chimie,...

Tout d'abord, nous allons commencer par la problématique tout en fixant les objectifs de ce travail, ensuite nous exposerons brièvement la structure générale de ce mémoire.

Problématique et Objectifs :

L'activité du diagnostic comporte deux tâches : la détection et la localisation. La détection consiste à détecter la présence d'un défaut tandis que la localisation a pour but de trouver l'élément en défaut.

A travers une large étude bibliographique, nous avons remarqué que la plupart des méthodes utilisées pour le diagnostic des défauts dans les machines Asynchrones, appartiennent à l'approche signal.

La philosophie de cette approche suppose que chaque type de défaut est caractérisé par une propre signature spectrale ou fréquence caractéristique.

Par conséquent, le diagnostic (la détection et la localisation) de n'importe quel défaut peut être effectué par la surveillance de sa propre signature dans le spectre fréquentiel des différents signaux issus de la machine.

De plus, il a été démontré que la présence d'un défaut dans une machine s'accompagne toujours par des phénomènes physiques compliqués, tels que l'échauffement, les vibrations,

les oscillations dans le couple, les modulations dans le courant. Ces derniers sont causés par les défauts mécaniques.

L'efficacité de la MAS est prouvée par de nombreux chercheurs dans le domaine, cependant son application reste timide dans le secteur industriel.

Plan de travail :

Pour arriver aux objectifs fixés, ce travail sera structuré de la façon suivante :

Le premier chapitre sera consacré à la présentation d'un ensemble de définitions de base concernant la maintenance et le diagnostic ainsi qu'à la présentation de quelques outils de la maintenance conditionnelle.

Ensuite, le deuxième chapitre sera dédié aux différents types de défaillances de la machine asynchrone et la chaîne de transmission.

Dans le troisième chapitre, nous allons présenter un modèle de simulation de la machine asynchrone à cage d'écurieil à l'état sain, L'outil informatique utilisé pour faire cette simulation est MATLAB/SIMULINK.

Dans le quatrième chapitre, les notions et les résultats de simulation

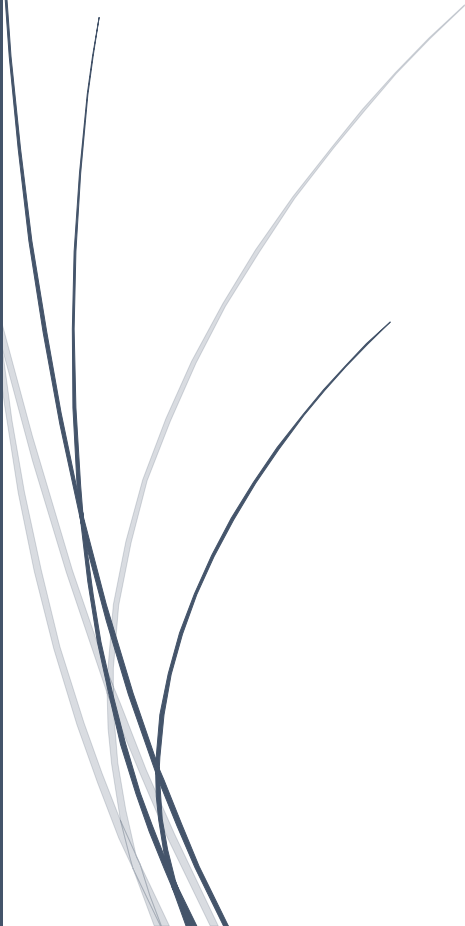
Enfin, nous concluons en soulignant les résultats les plus importants de ce travail et en présentant les perspectives.



2018/2019

Chapitre I

Généralité sur la maintenance conditionnelle



I.1 Introduction

Les activités de maintenance, au sens de dépannage d'un équipement, ont toujours existé. Mais ces activités étaient au départ peu ou pas formalisées : elles n'étaient pas nécessairement assurées par du personnel spécialisé, ni encadrées par des méthodes spécifiques.

De plus, elles consistaient essentiellement à réparer un équipement une fois que celui-ci était défaillant, mais n'intégrant que peu la notion de "préventif", c'est-à-dire des interventions visant à prévenir la panne.

La notion formalisée de "maintenance" est relativement récente. Elle est apparue avec l'automatisation des systèmes de production, les enjeux économiques et industriels croissants, les réglementations strictes pour la protection de l'individu et de l'environnement.

La fonction de maintenance ne peut se réduire à la seule activité d'entretenir un parc de machine mais a vocation à intervenir dans tout le cycle de l'exploitation du système (choix et conception du matériel, mise en service, détermination des plans de maintenance, organisation et logistique des activités de maintenance, suivi de l'évolution du système, etc.).

La complexité sans cesse croissante des systèmes industriels s'est accompagnée d'une demande toujours plus forte de la disponibilité et de la sûreté des installations industrielles. Il est en effet financièrement inutile de concevoir des installations sans cesse plus complexes, si celles-ci peuvent régulièrement tomber en panne et présenter un danger pour les personnes, l'environnement et les biens. L'accroissement de la disponibilité peut être obtenu par améliorations de la fiabilité des unités fonctionnelles mais aussi par la mise en œuvre d'une stratégie de maintenance adaptée à l'installation étudiée.

I.1.1 Définition

Selon la norme AFNOR NF X60010 la maintenance concerne: «l'ensemble des actions destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état spécifié, pour accomplir une fonction requise, ou pour assurer un service déterminé». [01] :

I.1.2 Types de maintenance

- **La maintenance corrective** : est l'ensemble des activités réalisées après la panne du système pouvant être liée à sa défaillance ou à la dégradation de sa fonction, elle a alors pour but de le remettre en état de marche. La maintenance corrective peut être :
 - ✚ **palliative** : des réparations ou des remises en état à caractère provisoire sont effectuées.
 - ✚ **curative**: des réparations, des modifications ou des remises en état à caractère permanent sont effectuées.

Cette maintenance est utilisée lorsque l'indisponibilité du système n'a pas de conséquences majeures ou quand les contraintes de sécurité sont faibles

- **Maintenance préventive** : dans laquelle les actions sont menées avant l'apparition de défaillance afin de ne pas la subir. Un récapitulatif sur les méthodes de maintenances et les évènements associés est présenté dans La **Figure I.1**.

Bien que la deuxième approche, maintenance conditionnelle semble la plus séduisante, elle n'est pas systématiquement appliquée à l'ensemble d'un procédé industriel. Dans la pratique les deux approches coexistent toujours.

Une bonne maintenance consiste alors à mettre en œuvre pour chaque équipement, sous-ensemble, voir chaque élément, la technique la mieux adaptée. Le choix d'une stratégie de maintenance s'opère en fonction des connaissances disponibles sur l'installation et des objectifs à atteindre [02].

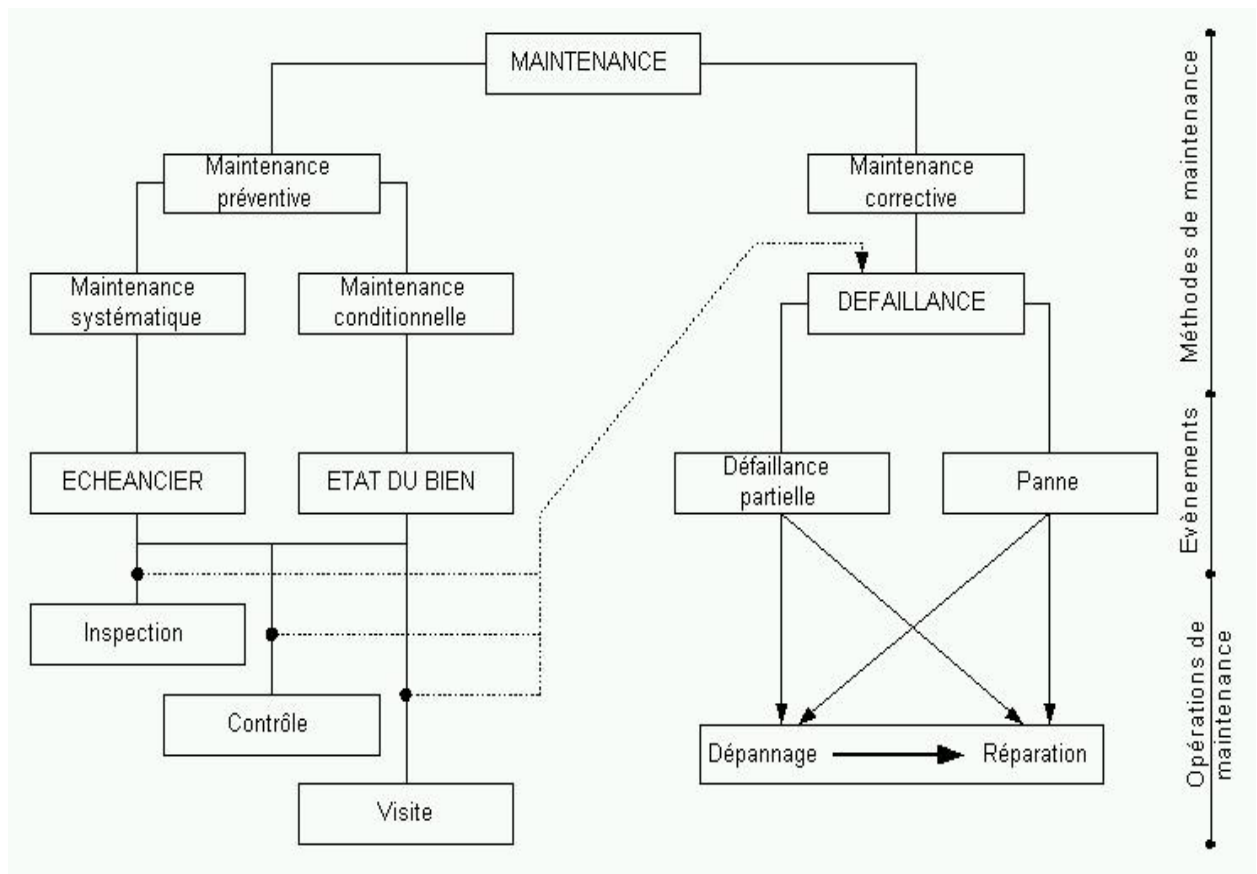


Figure I.1 : Méthodes de maintenance et les évènements associés.

I.2 De la maintenance préventive au diagnostic

L'objectif de la maintenance préventive est de déterminer l'ensemble des actions à exercer sur le procédé afin de ne pas subir l'effet d'une défaillance. On peut à cet effet distinguer deux approches possibles : la maintenance systématique et la maintenance conditionnelle.

I.2.1 Maintenance systématique

Ce type de maintenance est effectué dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu. C'est une intervention de maintenance prévue, préparée et programmée avant la date probable d'apparition d'une défaillance. Elle est effectuée selon un échéancier établi suivant le temps ou le nombre d'unités d'usage. Ci-après nous présentons une **Figure I.2** qui illustre ce principe.

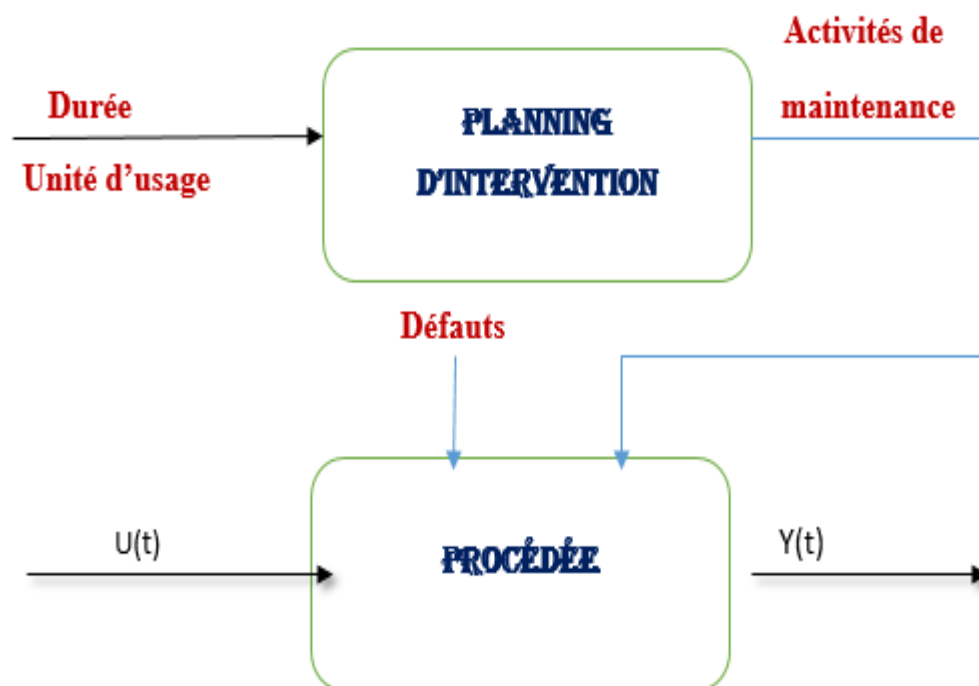


Figure I.2 : Maintenance préventive systématique

I.2.2 Maintenance conditionnelle

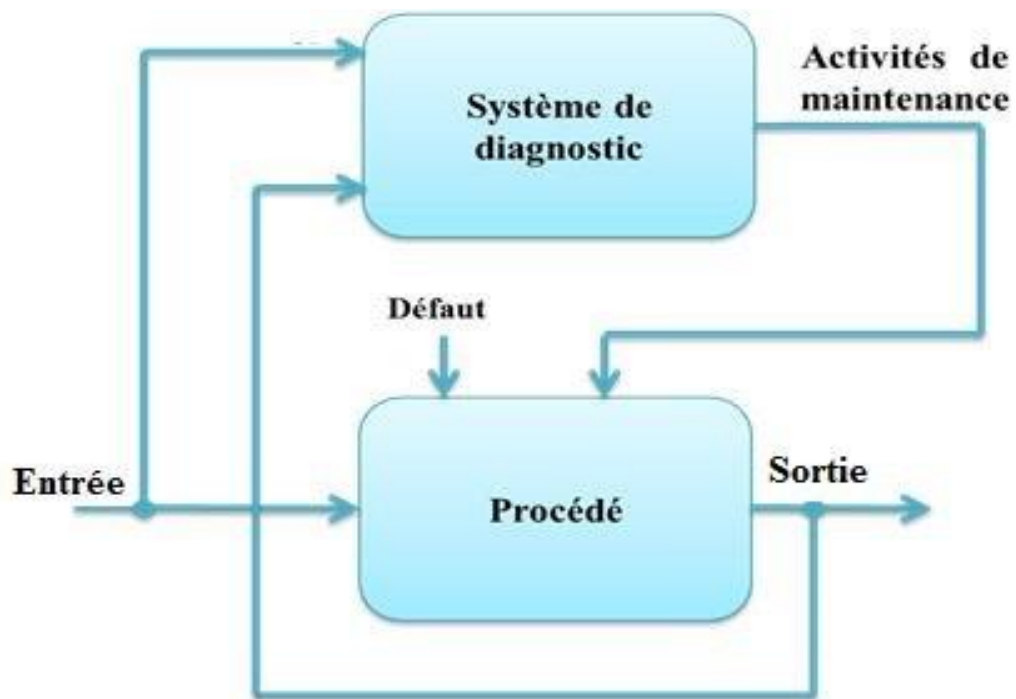


Figure I.3 : Maintenance préventive systématique

Ce type de maintenance est basé sur la surveillance en continu de l'évolution du système, afin de prévenir un dysfonctionnement avant qu'il n'arrive.

On s'intéresse dans la suite à la maintenance conditionnelle, basée sur la surveillance en continu de l'évolution du système considéré.

I.3 Outils de la maintenance conditionnelle

La maintenance conditionnelle se base sur l'analyse des grandeurs mesurées afin de détecter ou signaler une anomalie au niveau d'un système. Ces grandeurs peuvent être :

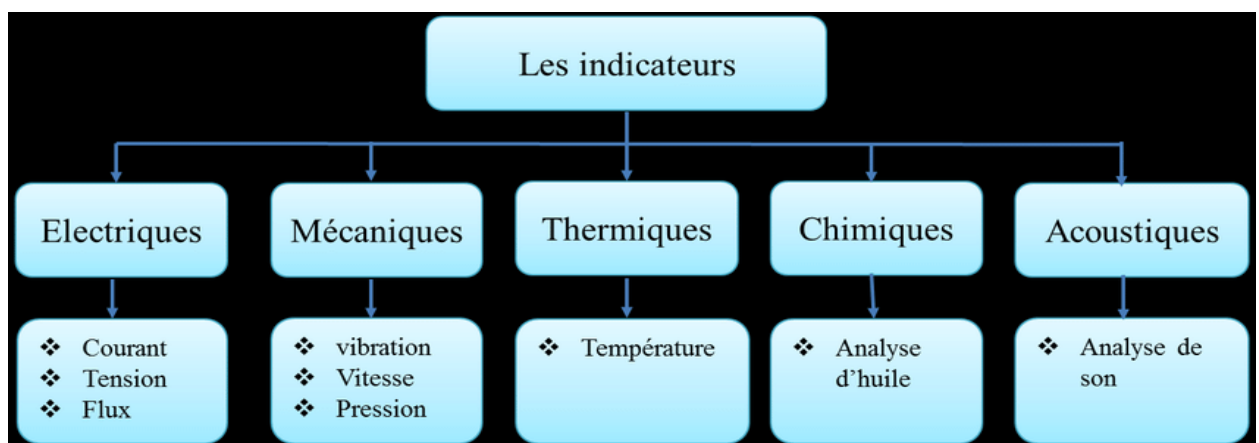


Figure I.4 : Les différents indicateurs utilisés pour le diagnostic

La grandeur surveillée subit, au cours du fonctionnement de l'installation deux types de variation [3] [4]:

- ✚ Des fluctuations autour de sa valeur nominale qui sont dues aux diverses perturbations agissant sur le système considéré.
- ✚ Une dérive qui peut être due à un phénomène de dégradation progressive.

Le suivi de cette grandeur permet alors de vérifier qu'elle ne s'écarte pas, de façon significative de sa valeur nominale. Un système de maintenance doit donc être en mesure de réaliser les trois étapes essentielles suivantes :

- La détection d'un défaut à partir de l'analyse des grandeurs mesurées.
- Le diagnostic du défaut.
- La prise de décision pour un retour au fonctionnement normal.

Donc le diagnostic a pour objectifs, rechercher l'origine d'un défaut constaté.

Un défaut correspond à une déviation jugée anormale d'une grandeur caractéristique du système.

I.3.1 Les différentes étapes de diagnostic d'un système

Le diagnostic des systèmes industriels nécessite un certain nombre d'étapes résumées dans la **Figure I.5**.

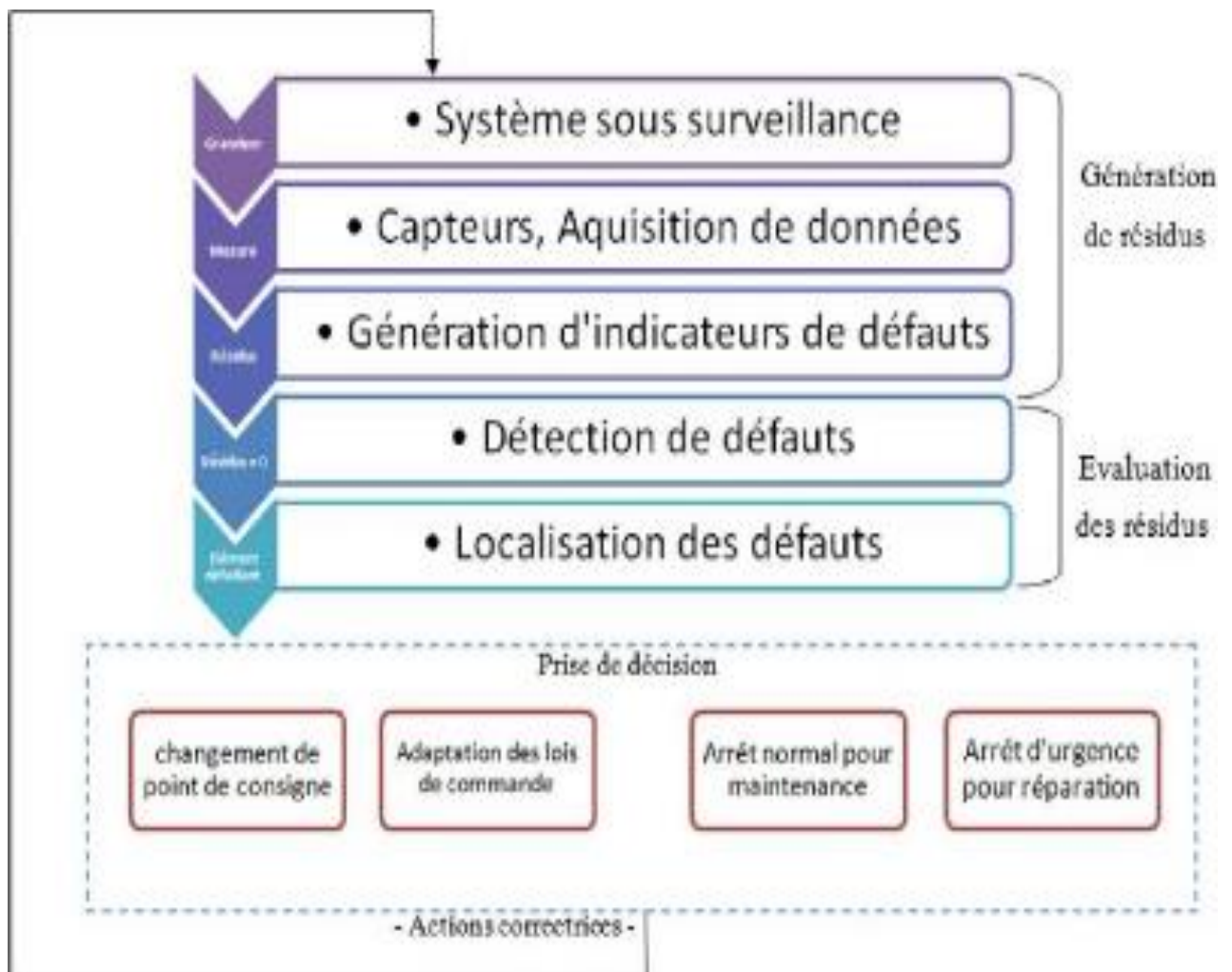


Figure I.5 Les étapes de diagnostic [5]

La procédure de diagnostic nécessite de disposer d'information sur le fonctionnement du système à surveiller. Cette étape implique l'utilisation de capteurs permettant de mesurer les différentes grandeurs de processus. La chaîne d'acquisition est donnée dans la **Figure I.6**

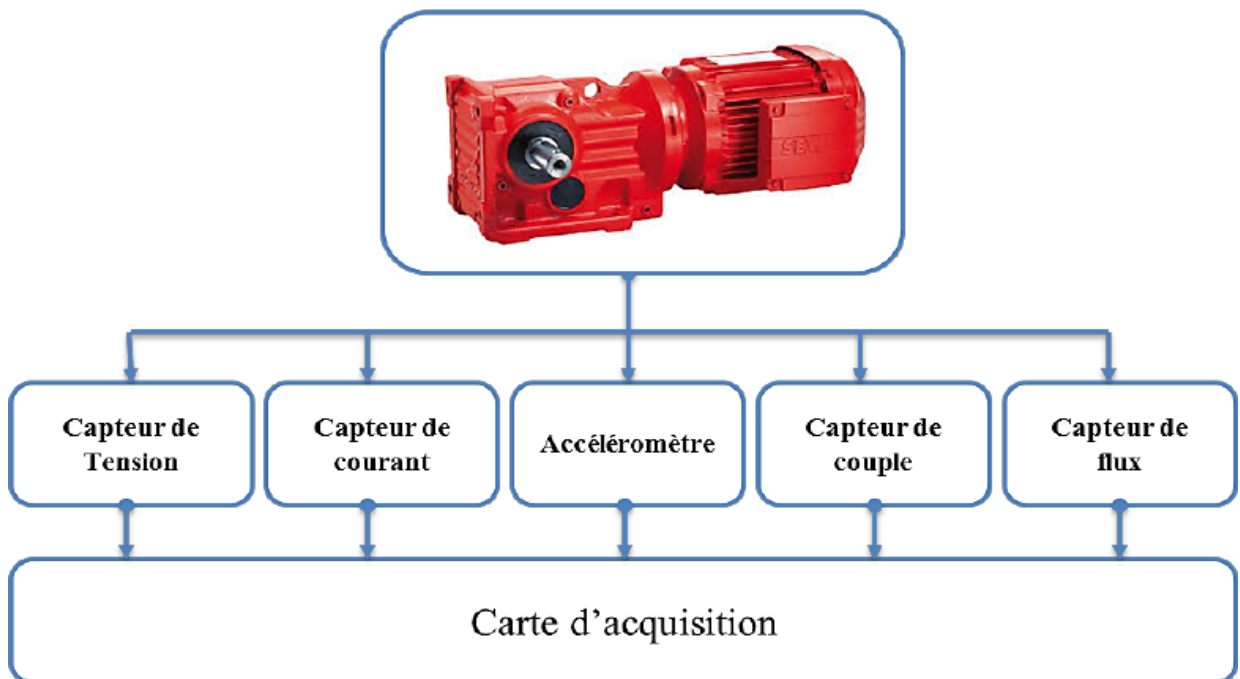


Figure I.6 : chaîne d'acquisition

I.3.1.1 Elaboration d'indicateurs de défauts

Il s'agit à partir des mesures réalisées, d'élaborer des indicateurs permettant de mettre en évidence les éventuels défauts pouvant apparaître au sein du système.

I.3.1.2 Détection de défauts

Cette étape doit permettre de décider si le système se trouve dans un état de fonctionnement normal ou non.

I.3.1.3 Localisation de défaut

L'étape de diagnostic consiste à analyser les données issues de la surveillance (détection) pour tenter à identifier et localiser la ou les causes probables de la défaillance.

1.3.1.4 Prise de décision

Dans cette étape, il s'agit de décider de la marche à suivre afin de conserver les performances souhaitées du système sous surveillance. Cette prise de décision doit permettre de générer les actions correctrices nécessaires à un retour au fonctionnement normal de l'installation.

I.3.2 Diagnostic appliqué aux machines électriques

Les méthodologies de surveillance sont généralement divisées en deux groupes.

I.3.2.1 Méthodologie de surveillance avec modèle

Se base sur l'existence d'un modèle formel de l'équipement et utilise généralement les techniques de l'automatique.

I.3.2.2 Méthodologie de surveillance sans modèle

Cette méthode est très intéressante dans le cas où le modèle de l'équipement est inexistant ou difficile à obtenir. Dans ce cas, on utilise les outils de traitement du signal dans le but d'extraire des informations révélatrices de défauts [13].

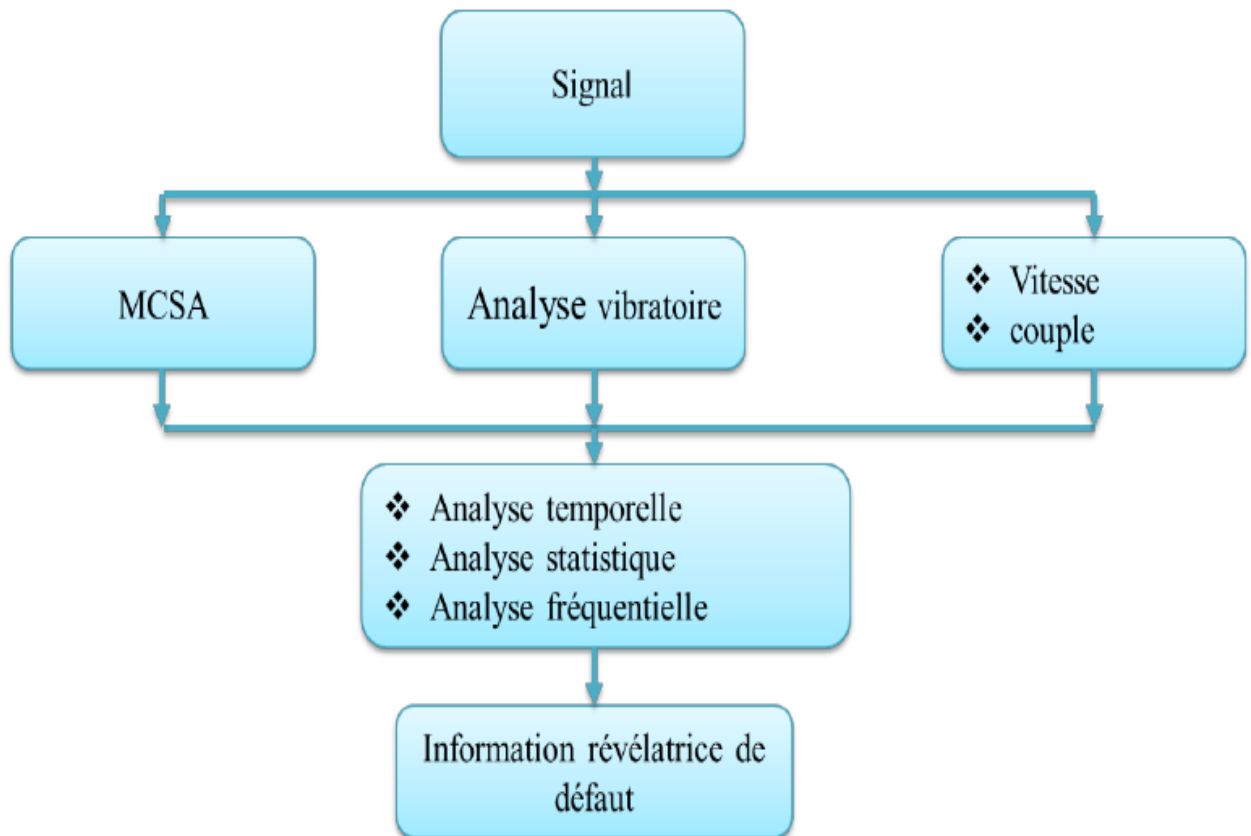


Figure I.7 : Principe de surveillance par l'utilisation des signaux

MCSA : Moteur Current Signature Analysis.

Dans la suite nous nous intéressons à la deuxième méthodologie qui se base sur les outils de traitement de signal des grandeurs mesurées.

I.4 Méthodes de la maintenance conditionnelle

Pour assurer la continuité et le bon fonctionnement des machines électriques, il existe plusieurs méthodes de surveillance [07] [08].

Nous donnons ci-après un aperçu sur les différentes méthodes.

I.4.1. Analyse temporelle

La première observation possible de ce signal est donc sa représentation temporelle qui peut être aisément, employé lorsque, le signal est simple, mais devient inexploitable dans le cas des sollicitations multiples [03].

L'analyse temporelle permet de détecter plusieurs phénomènes :

- a) La modulation d'amplitude [07].
- b) La variation de l'amplitude instantanée du signal [01] [03] [08].

I.4.2 Vecteur de Park

Elle a été appliquée principalement pour le diagnostic des défauts rotoriques (cassure de barre...) pour la machine asynchrone à cage [02]. L'idée de cette technique se base sur l'analyse des courants de Park. Les courants de Park $i_{sd}(t)$ et $i_{sq}(t)$ sont calculés à partir des courants statoriques $i_{sa}(t)$, $i_{sb}(t)$ et $i_{sc}(t)$.

I.4.3 Analyse statistique des signaux

Les indicateurs statistiques évaluent l'état de fonctionnement global des équipements mais ne localisent pas le défaut. Ce sont des méthodes utiles à la surveillance. De nombreux indicateurs existent dans la littérature et certains sont le résultat de la combinaison de plusieurs d'entre eux, [11] [12], c'est pourquoi nous ne présenterons ici que les plus courants.

I.4.3.1 Le Kurtosis

Le Kurtosis est un paramètre statistique permettant d'analyser les répartitions d'amplitude dans un signal temporel. Le Kurtosis est défini comme le rapport du moment d'ordre 4 de la distribution temporelle sur le carré de la puissance [11].

I.4.3.2 Facteur de crête

Le facteur de crête FC correspond au rapport entre la valeur crête d'un signal (en valeur absolue) et sa valeur efficace [11].

I.4.4 Analyse fréquentielle

I.4.4.1 Analyse spectrale

L'analyse spectrale permet de décomposer un signal complexe en ses constituants de base. L'analyse spectrale permet de représenter l'amplitude d'un signal en fonction de la fréquence.

I.4.4.2 Analyse cepstral

Le cepstre est une fonction du traitement du signal qui consiste à partir du domaine temporel, à passer dans le domaine des fréquences, et à revenir dans le domaine temporel.

Le cepstre peut être utilisé avec succès pour la surveillance de l'apparition et de l'évolution d'un certain nombre de défauts induisant [07] :

- des chocs périodiques (desserrages, jeux, écaillages de roulements, défauts de dentures...).
- une modulation en amplitude ou en fréquence de composantes cinématiques.

I.4.4.3 Analyse d'enveloppe

La détection d'enveloppe est un traitement qui permet l'étude des phénomènes de modulation. Elle permet la mise en évidence de la fréquence modulante, et de déterminer de manière fiable et rapide les fréquences de répétition des chocs souvent noyées dans un spectre de raies plus énergétiques [02].

I.5 Conclusion

Ce chapitre, a été consacré à la présentation des différents types de maintenance envisageables dans un environnement industriel et aux principales étapes et outils nécessaires pour la mise en place d'une démarche de surveillance et de diagnostic.

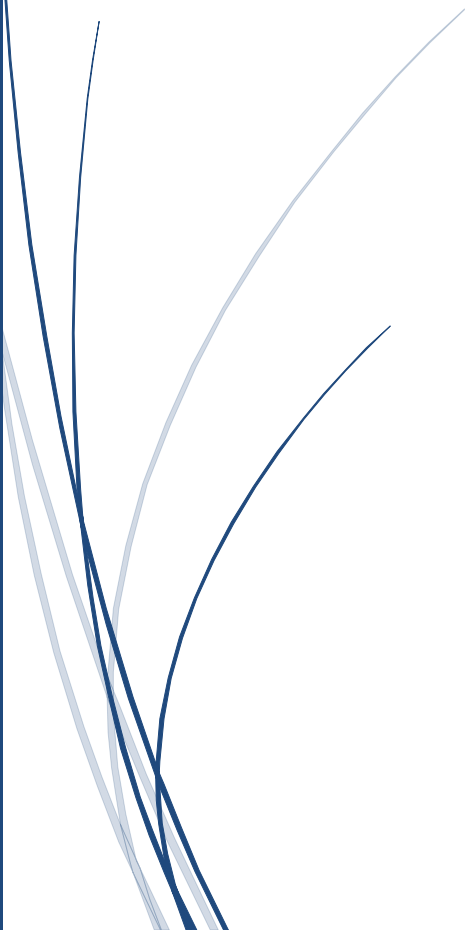
Avant de tester l'efficacité de certaines méthodes précitées et de contribuer à l'analyse des systèmes en présence de défauts, nous jugeons utile de faire une présentation des défauts de la machine asynchrone qui peuvent affecter un entraînement électrique, ce qui fait l'objet du second chapitre.



2018/2019

Chapitre II

Défauts de la machine asynchrone



II.1 Introduction

De multiples défaillances peuvent apparaître dans la machine asynchrone. Elles peuvent être mécaniques ou électriques. Leurs causes sont très variées.

Plusieurs études ont été effectuées sur la fiabilité des machines électriques réalisées par différents groupes industriels. L'étude principale, effectuée par la compagnie "General Electric" [13] ; elle couvre environ 5000 moteurs, dont approximativement 97% étaient des moteurs asynchrones triphasés à cage.

La **Figure II.1** présente la distribution des défauts dans les moteurs examinés dans cette étude.

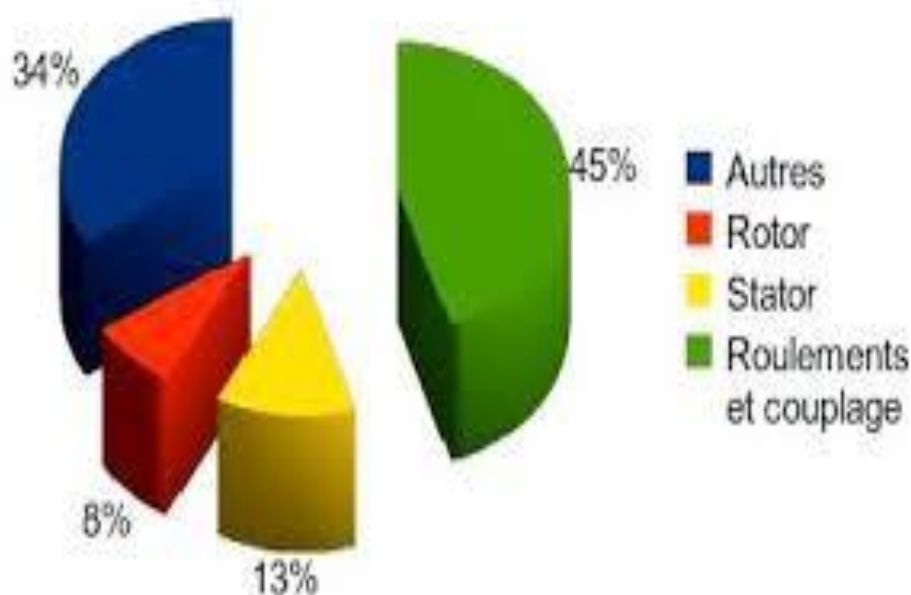


Figure II.1: La distribution des défauts dans les machines électriques

Une autre étude a été effectuée sur 483 grands moteurs asynchrones fonctionnant dans un même domaine lié à l'industrie pétrochimique (**Figure II.1**).

De tels moteurs fonctionnent très souvent en conditions extrêmes dans des activités sous-marines. Ils sont souvent directement amorcés, ce qui génère de grands courants de démarrage et des variations de couple importantes. Ces conditions sont nocives pour le moteur, et mènent à l'usure rapide des différents composants de la machine.

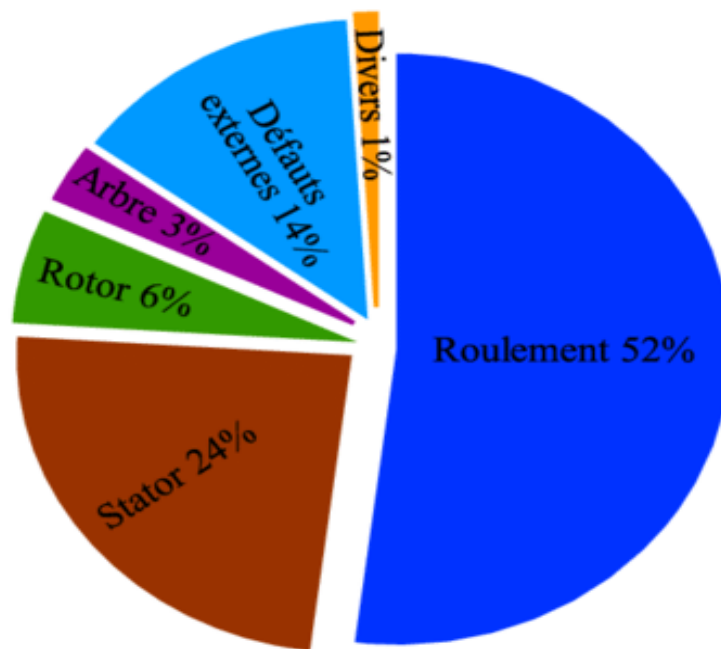


Figure II.2: Distribution des défauts des machines asynchrones fonctionnant dans l'industrie pétrochimique

Comparons les résultats de cette étude à EPRI (**Figure II.2**), il apparaît clairement que l'occurrence d'un type spécifique de défaut dépend considérablement de l'application spécifique de la machine et de l'environnement de fonctionnement.

II.2 Constitution du moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil

Le système considéré dans ce travail est le moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil. La fonction de ce système est d'assurer la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique avec un niveau de performances donné. Si la fonction de ce système n'est plus assurée, avec ces performances, suite à un incident quelconque, le système est alors jugé défaillant.

En réalité, le moteur asynchrone triphasé à cage est un système très compliqué. On peut le décomposer en trois sous-systèmes (**Figures II.3**) :

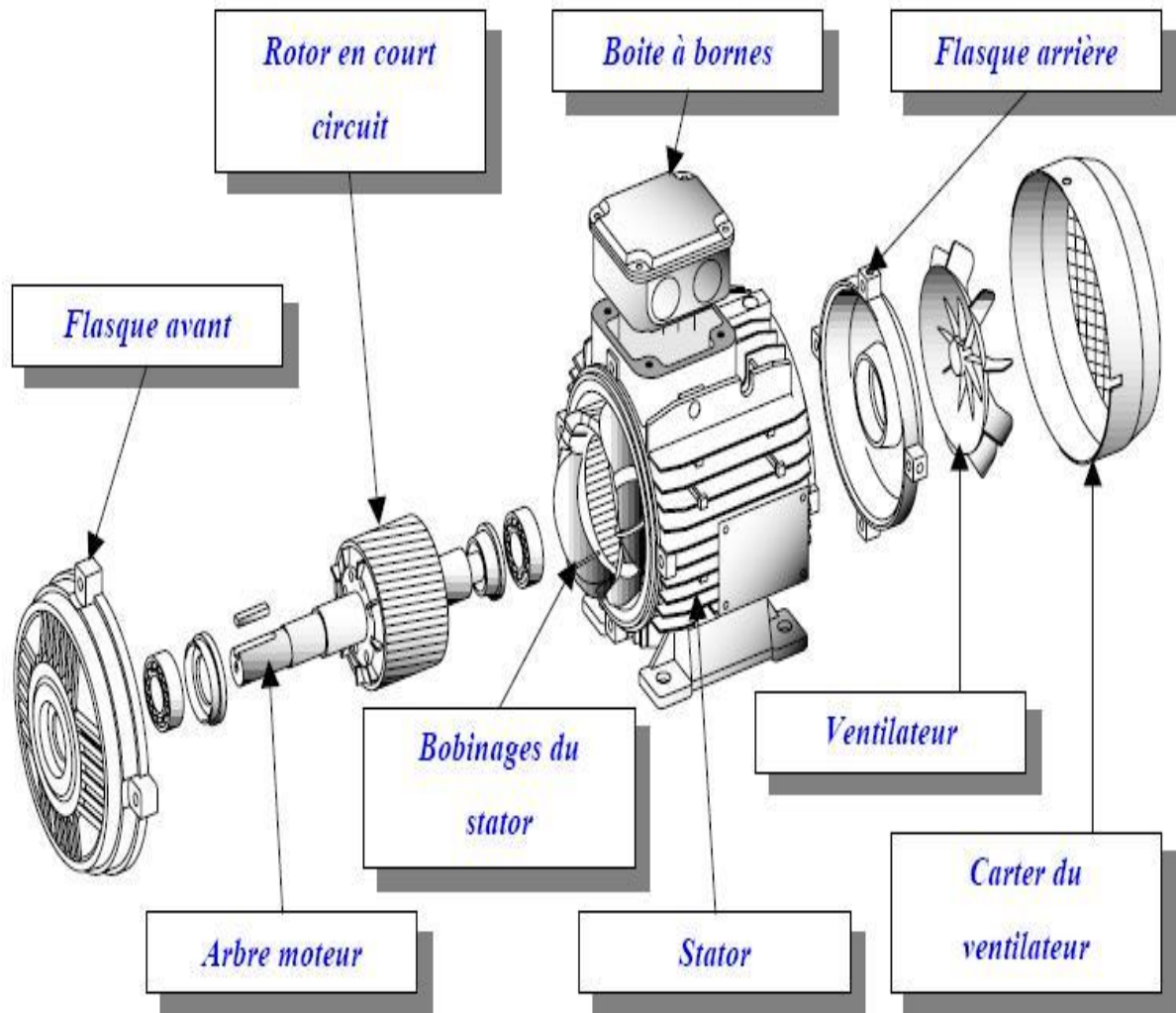


Figure II.3 : Vue éclaté de la machine asynchrone [14].

Le stator : c'est la partie fixe, où est connecté l'alimentation électrique. Il est composé de cinq éléments :

- ✚ Carter
- ✚ Boîte à bornes
- ✚ Circuit magnétique
- ✚ Conducteurs
- ✚ Isolants.

Le rotor, partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique.

On distingue deux types de rotor à cage d'écureuil et rotor bobiné. Il est composé de quatre éléments :

- ✚ Circuit magnétique
- ✚ Conducteurs
- ✚ Arbre
- ✚ Ventilateur

Les paliers : partie mécanique qui permettent de supporter et de mettre en rotation l'arbre rotorique, ils sont constitués de flasques et de roulements à billes.

II.3 Défaillances dans un moteur asynchrone triphasé à cage

Bien que la machine asynchrone à cage d'écureuil soit réputée robuste, elle peut parfois présenter différents types de défauts. Ces défauts peuvent être soit d'origine électrique, soit d'origine mécanique, comme précisé au dernier paragraphe. Un problème minime à l'étape de fabrication peut être à l'origine d'un défaut tout comme une utilisation non conforme de la machine.

Dans ce paragraphe, on va s'intéresser aux différents types de défaillances qui peuvent affecter les machines asynchrones triphasées à cage.

II.3.1 Défaillances statoriques

II.3.1.1 Défaillances du Carter

Elles sont généralement dues à :

- ✚ Positionnement avec un décentrage du carter sur le bâti.
- ✚ Mauvaise fabrication (si les bords du carter ne sont pas usinés correctement, les flasques sont alors décentrés par rapport à l'axe de symétrie).

En plus, si les ailettes de refroidissement (sur la surface du carter) sont sous dimensionnées, à cause d'une conception erronée, la machine risque une élévation anormale de sa température au cours du fonctionnement.

II.3.1.2 Défaillances de la boîte à bornes

Les vibrations excessives de différentes origines peuvent conduire à un desserrement des boulons de la boîte à bornes, ce qui mène à une rupture d'une phase en cours de fonctionnement. La contamination par des corps étrangers (poussière, graisse,...), peut aussi

induire un arc entre les prises de connexion. Il en résulte une rupture d'une phase ou un court-circuit entre les phases.

II.3.1.3 Défaillances du circuit magnétique

Les tôles du circuit magnétique sont normalement isolées entre elles ; toutefois elles peuvent être accidentellement en court-circuit. Ce défaut peut avoir comme origine :

- Un court-circuit des conducteurs qui peut également provoquer un échauffement local intense dans les tôles ;
- Les corps étrangers projetés dans l'entrefer peuvent entraîner l'abrasion des tôles et causer des court-circuits ;
- Un défaut sévère d'excentricité statique et/ou dynamique peut conduire à un contact franc entre le stator et le rotor, ce qui pourra détruire le circuit magnétique.

II.3.1.4 Défaillances des conducteurs

Les court-circuits entre spires ou bobines sont les défauts les plus nuisibles et les plus rencontrés au niveau du stator. Ils proviennent souvent d'une dégradation du matériau isolant recouvrant les conducteurs.

Cette dégradation est due principalement à un échauffement anormal dans le bobinage.

II.3.2 Défaillances rotoriques

II.3.2.1 Défaillances du circuit magnétique

Comme dans le stator, Ces défaillances sont dues généralement à une excentricité statique et/ou dynamique. Il en résulte la création de points chauds. Ces derniers peuvent engendrer des ruptures de barres ou de segments d'anneaux de court-circuit.

II.3.2.2 Défaillances des conducteurs

La cage rotorique étant formée de conducteurs (barres) est de deux anneaux de court-circuit. Les ruptures ou les fissures de barres ou de segments d'anneaux de court-circuit sont très fréquent dans les machines de grande puissance. La cassure d'une barre peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. Ce défaut est dû à :

- Un nombre important de démarrages successifs ce qui induit des courants énormes dans les barres rotoriques ;
- Une excentricité statique et/ou dynamique, le rotor sera soumis à différentes forces qui tendent à faire sortir les barres des encoches ;
- La dilatation puis la contraction répétée dans les barres rotoriques.

II.3.2.3 Défaillances de l'arbre

A cause de l'utilisation d'un mauvais matériau lors de sa construction, l'arbre peut comprendre des microfissures; et avec le temps, ces fissures peuvent mener à une fracture de l'arbre provoquant ainsi un arrêt immédiat de la machine. La robustesse mécanique de l'arbre peut être affectée par des phénomènes d'oxydation liés à l'environnement. Une excentricité statique et/ou dynamique ou un surdimensionnement de la charge mécanique peut induire des efforts considérables sur l'arbre moteur, amenant ainsi une fatigue supplémentaire.

II.3.2.4 Défaillances du ventilateur

Si le ventilateur n'est pas correctement fixé sur l'arbre ou s'il comporte un nombre de pales cassées, on aboutit à une augmentation anormale de la température de la machine.

II.3.3 Défaillances des paliers

II.3.3.1 Défaillances des flasques

Les défaillances des flasques sont généralement créées durant l'étape de fabrication. En effet, si les bords intérieurs ou extérieurs des flasques ne sont pas usinés correctement, les roulements à billes sont alors décentrés. Cela conduit à une excentricité du rotor par rapport au stator produisant des efforts supplémentaires sur l'arbre et sur les roulements à billes ce qui accélère leur détérioration.

II.3.3.2 Défaillances des roulements

Les roulements à billes jouent un rôle très important dans le fonctionnement de tout type de machines électriques et assurent la fonction de guidage en rotation.

a) Cause

Les roulements peuvent être endommagés par des causes comme [14] :

- Contamination du roulement par des particules extérieures : poussière, grains de sable, ...
- Corrosion engendrée par la pénétration d'eau, d'acides, ...
- Lubrification inadéquate qui peut causer un échauffement et l'usure du roulement,
- Mauvais alignement du rotor,
- courant qui traverse le roulement et qui cause des arcs électriques,

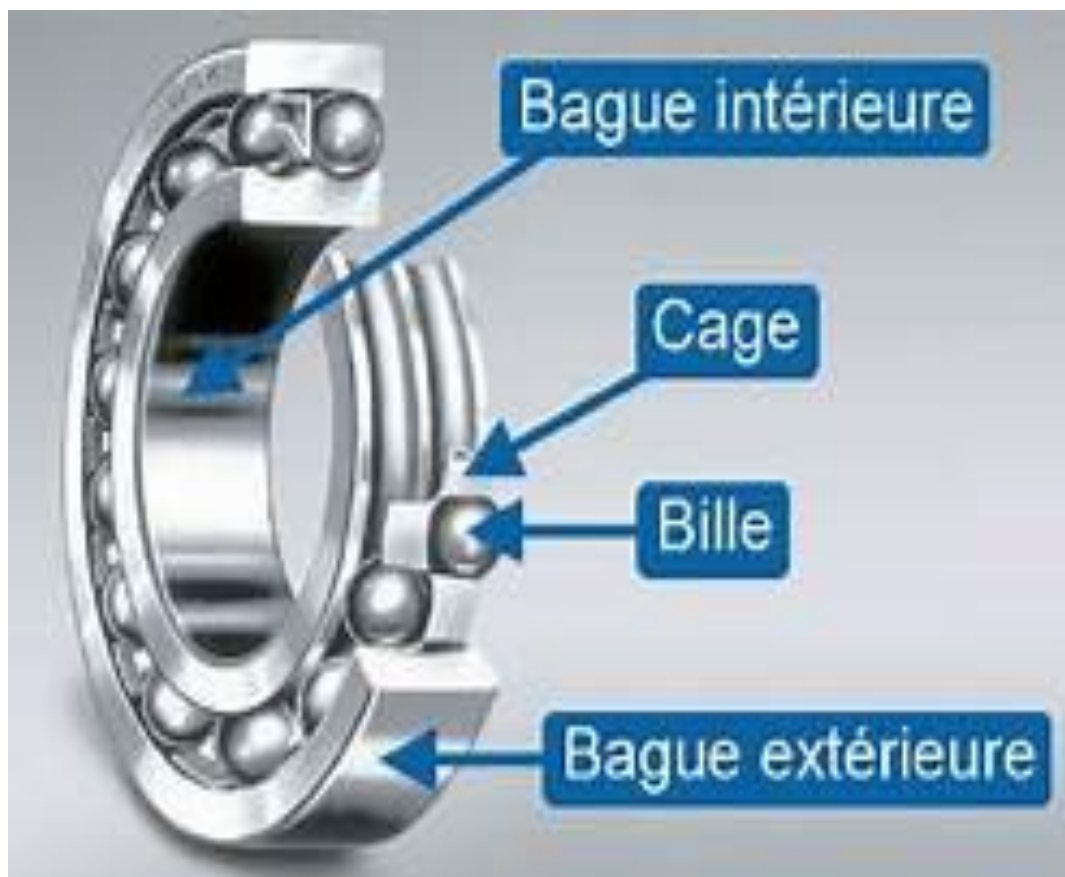


Figure II.4 : Vue éclatée des éléments constitutifs d'un roulement à billes

b) Effets mécaniques des défauts de roulements

Les défauts de roulements entraînent de manière générale plusieurs effets mécaniques dans les machines tels que

- ✚ une augmentation du niveau sonore et l'apparition de vibrations.
- ✚ des variations dans le couple de charge de la machine asynchrone.
- ✚ créer une excentricité statique et/ou dynamique.

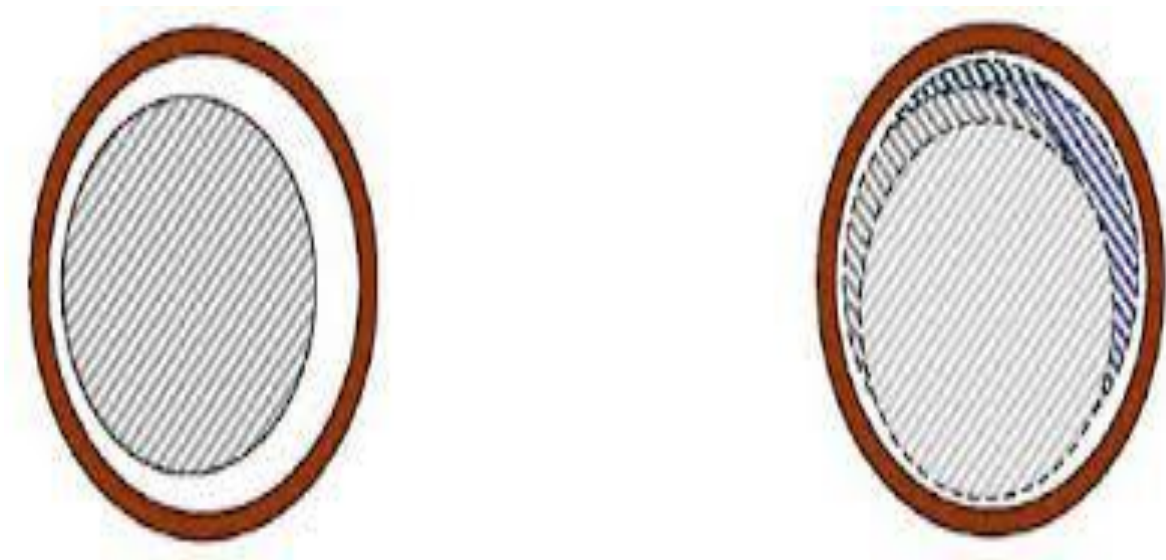


Figure II. 5 : L'excentricité statique et excentricité dynamique

II.4 Défauts de la chaîne de transmission

II.4.1 Déséquilibre : défaut de balourd

Quel que soit le soin apporté à la construction des machines, il n'est pas possible de faire coïncider l'axe de rotation avec le centre de gravité de chaque tranche élémentaire du rotor.

De ce non concentricité, résulte l'application de forces centrifuges proportionnelle à la vitesse de rotation selon la relation $F = M_r \omega^2$ qui déforment le rotor. On dit que le rotor présente un balourd.

Ce balourd provient généralement de défauts d'usinage, d'assemblage et de montage, ou sont la conséquence [13]:

- ✚ d'une altération mécanique : perte d'ailette, érosion ou encrassement,
- ✚ d'une altération thermique : déformation suite à des dilatations différentes des matériaux constituant le rotor ou à des différences de température localisées ...

II.4.2 Défaut d'alignement

Le défaut d'alignement est l'une des principales causes de réduction de la durée de vie des équipements. Il concerne soit deux arbres liés par un accouplement, soit deux paliers soutenant le même axe.

II.4.3 Désalignement d'arbres accouplés

Les axes des deux rotors peuvent présenter un désalignement angulaire au niveau de l'accouplement ou un désalignement radial (défaut de concentricité) ou la combinaison des deux [13].

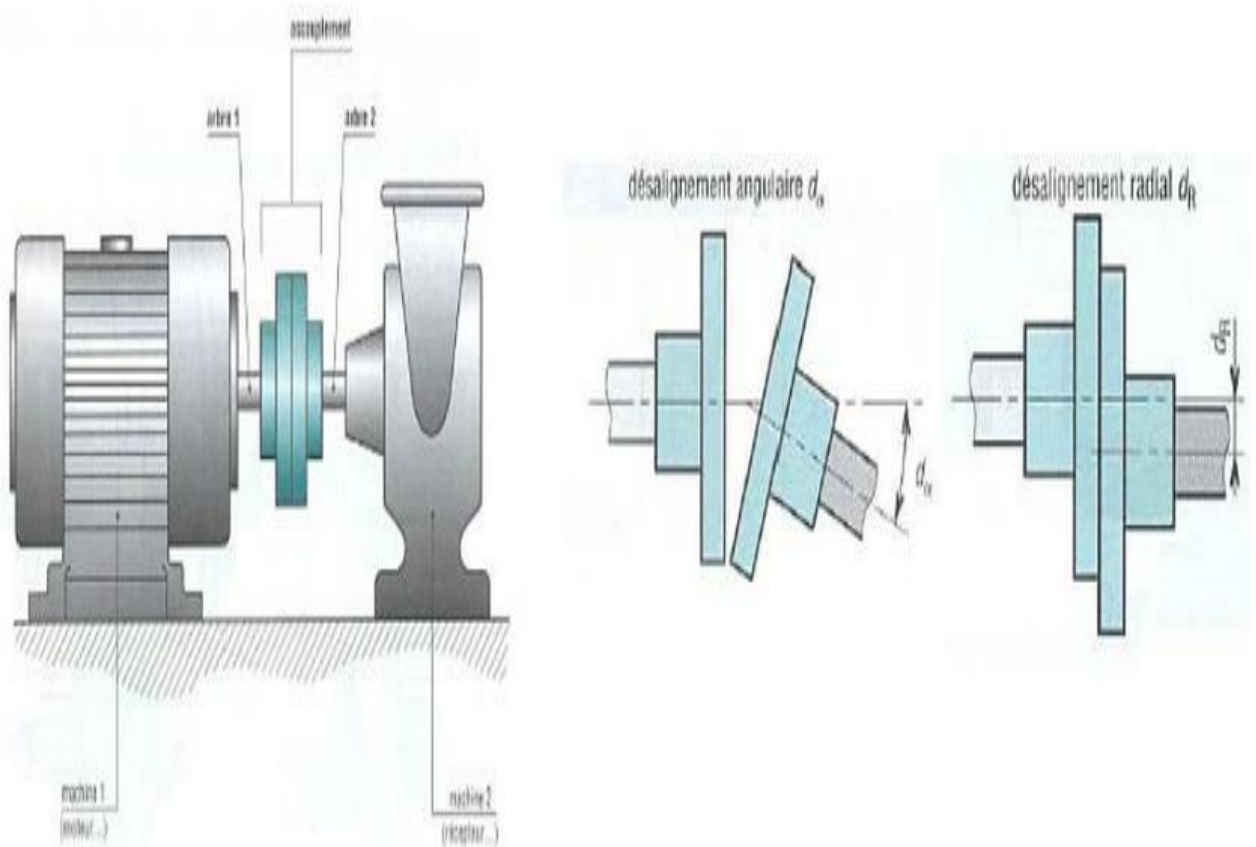


Figure II.6 : Le défaut d'alignement des arbres

II.4.4 Désalignement des paliers

Les axes des deux paliers d'un même corps de la machine ne sont pas concentriques. Cette anomalie peut être la conséquence d'un défaut de montage d'un palier, mais également d'un mauvais calage des pattes de fixation ou d'une déformation de châssis (par exemple à la suite de contraintes thermiques), qui se traduit par une flexion de l'arbre du rotor [12] [17].

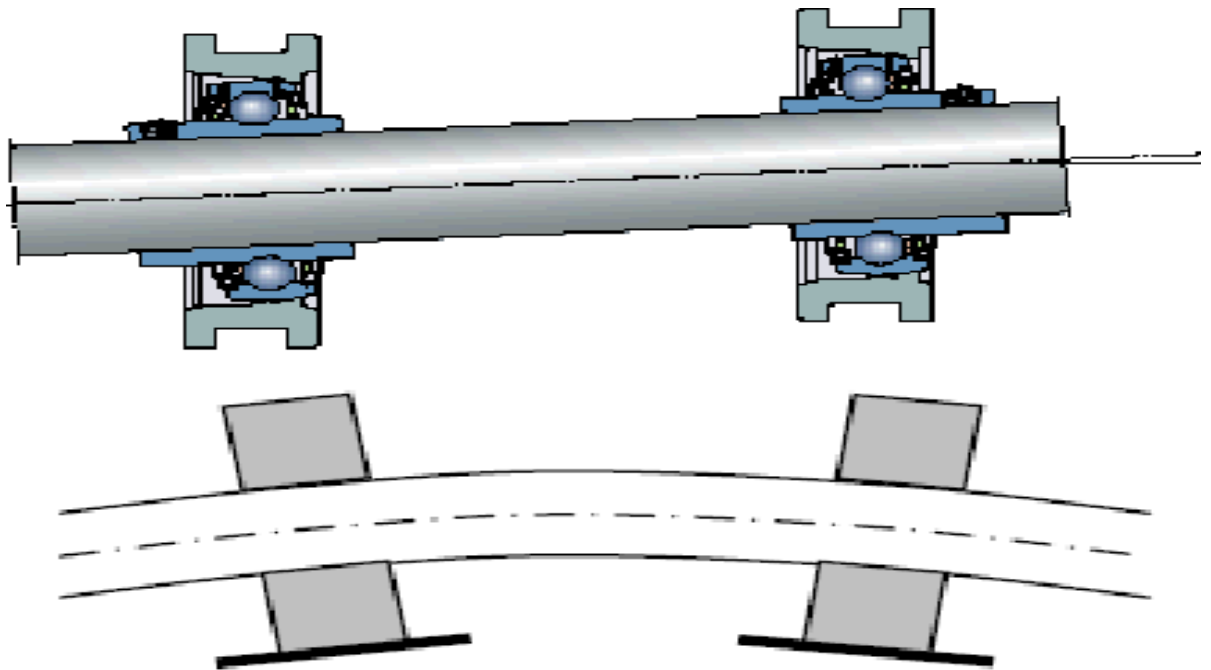


Figure II.7 : défaut de désalignement des paliers

II.4.5 Défauts de serrage

Le mauvais serrage de la structure de la machine génère des vibrations et un certain bruit.

II.4.6 Défaut d'engrenage

Un engrenage est composé de l'ensemble de deux roues dentées engrenant l'une avec l'autre, permettant de transmettre de la puissance entre deux arbres rapprochés avec un rapport de vitesse constant.



Figure II.8 : Engrenage à denture droite.

Généralement un système d'engrenage présente les défauts suivants [11] :

II.4.6.1 L'usure

L'usure est un phénomène local caractérisé par un enlèvement de matière dû au glissement de deux surfaces l'une contre l'autre.

II.4.6.2 Les piqûres (Pitting)

Il s'agit des trous peu profonds, qui affectent toutes les dents. Le pitting est une avarie qui se produit surtout sur des engrenages en acier de construction relativement peu dur.

II.4.6.3 L'Écaillage

Il se manifeste aussi sous forme de trous, mais ceux-ci sont beaucoup moins nombreux, plus profonds et plus étendus que ceux des piqûres.

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté rapidement les différents constituants de la machine asynchrone en montrant essentiellement les divers défauts qui peuvent affecter le bon fonctionnement de ces constituants.

En outre, nous avons souligné que la majorité des défauts de la machine asynchrone sont des défauts mécaniques. Ce type de défaut peut provoquer des conséquences graves entraînant la plupart du temps un arrêt intempestif de la machine asynchrone.

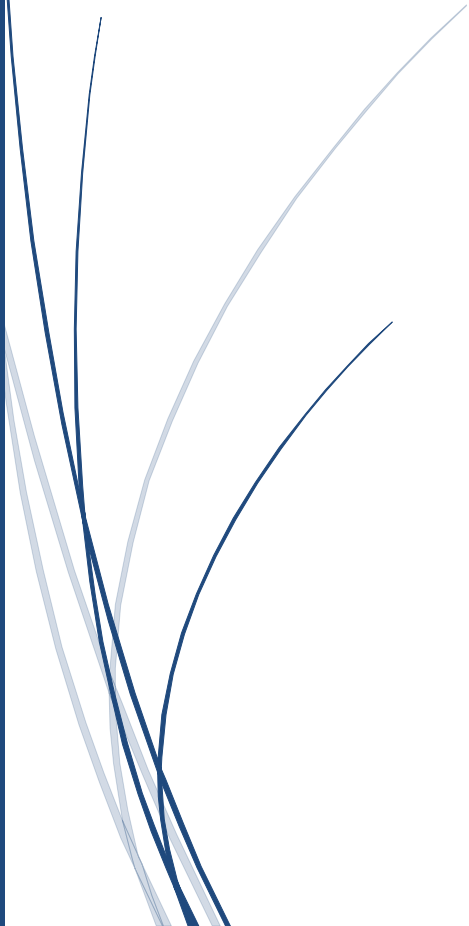
L'étude de l'effet de quelques défauts mécaniques sur les grandeurs électriques constitue la suite de ce travail. Nous proposerons aussi des méthodes de détection du défaut mécanique par des mesures électriques et l'exploitation des signaux vibratoires.



2018/2019

Chapitre III

Modélisation de la machine asynchrone



III.1 Introduction

Modélisation de la machine asynchrone triphasée (MAS). Dans un premier lieu, on donnera de manière explicite le modèle mathématique de la machine asynchrone (Equations électriques et mécanique) dans son référentiel triphasé. Puis, on réduira l'ordre du système par une transformation dite de PARK. Cette transformation modélise la MAS dans un nouveau référentiel, biphasé cette fois. Dans un dernier lieu, on donnera la simulation numérique des différentes grandeurs de la MAS [19].

Dans les pays industrialisés, plus de 60% de l'énergie électrique consommée est transformée en énergie mécanique par des entraînements utilisant les moteurs électriques. Le modèle mathématique d'une Machine Asynchrone (MAS) nous facilite largement son étude et permet sa commande dans les différents régimes de fonctionnement transitoire ou permanent [20].

La représentation de la machine asynchrone par des équations selon le système triphasé donne un modèle, dont les équations sont à coefficients variables en fonction du temps [24]. dans le but de faciliter leur résolution, on a recours à une modélisation dite «transformation de Park», qui consiste à transformer le système triphasé en système à deux axes orthogonaux. L'élaboration d'une telle modélisation est indispensable pour l'étude du régime de contrôle du flux, de couple, de régulation de tension et de vitesse [18].

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

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

III.2 Définition de la machine asynchrone

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

Parmi les machines asynchrones, on peut distinguer deux types [22]:

- Les machines à cage.
- Les machines à bague.

Le moteur d'induction est tellement plus utilisé que les autres que lorsqu'on parle de moteur

Asynchrone on sous-entend d'induction. La machine d'induction est caractérisée par une armature non alimentée (rotor), parcourue par des courants induits par l'autre armature qui est alimentée à partir d'un réseau de fréquence (stator) f_s [23].

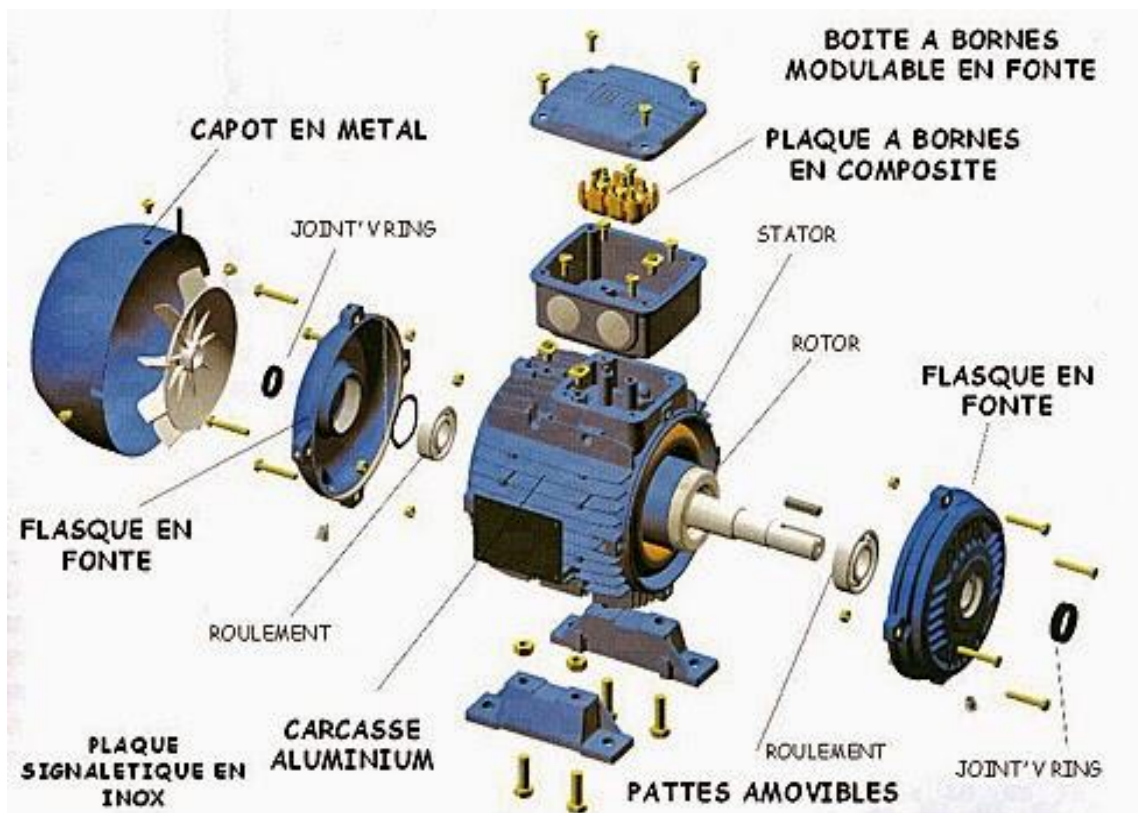


Figure III.1 Constitution de La machine asynchrone

III.3 Description de la machine asynchrone triphasée

La machine asynchrone comporte une partie fixe constituée d'une carcasse à l'intérieur de laquelle sont logés le circuit magnétique et le bobinage du stator d'une part, et une partie mobile appelée rotor d'autre part. La carcasse nervurée à ailettes longitudinales est un monobloc en fonte ou en acier [24].

Le principe de fonctionnement du moteur asynchrone est basé sur l'induction des courants dans le bobinage du rotor par un champ tournant dans l'entrefer dû à la circulation des courants polyphasés dans le stator. Ce champ tournant va créer un couple moteur qui s'exerce sur les conducteurs des courants induits, Il provoque ainsi le démarrage et la rotation du rotor dans le même sens que le champ tournant [25].

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

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad (\text{III.1})$$

Avec :

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

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

Le rotor est constitué de manière à obtenir trois enroulements ayant un nombre de pôles identique à celui du stator. Les enroulements rotoriques sont en court-circuit, la vitesse de rotation du rotor est inférieure à, Ω_s et on note : [29]

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad (\text{III.2})$$

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

III.4 Avantages et inconvénients de la machine asynchrone

Le moteur asynchrone est le moteur électrique le plus utilisé dans l'industrie; il est peu coûteux, on le fabrique en grande série, il est robuste, fiable et économique.

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

Les courants qui circulent dans le stator, constituent l'unique source externe du champ magnétique. Sa vitesse varie un peu quand on le charge, on dit qu'il glisse, mais ce glissement est en générale ne dépasse pas quelques centièmes de la vitesse à vide, il est négligeable le plus souvent. Le démarrage des moteurs asynchrones ne pose pas de problèmes pour les unités de petite puissance. Par contre, pour les moteurs de forte puissance, il faut démarrer sous tension réduite pour éviter un appel de courant trop élevé. Par contre dans le moteur asynchrone les courants statorique sont à la fois à générer le flux et le couple.

Le découplage naturel de la machine à courant continu n'existe pas. D'autre part on ne peut connaître les variables internes du rotor à cage qu'à travers le stator.

L'inaccessibilité du rotor nous amènera à modifier l'équation vectorielle rotorique pour exprimer les grandeurs rotoriques à travers leurs actions sur le stator. La simplicité structurelle cache donc une grande complexité fonctionnelle due aux caractéristiques qui viennent d'être évoquées mais également aux non linéarités, à la difficulté d'identification et aux variations des paramètres (R_r en particulier) [29].

III.5 Modélisation de la machine asynchrone

III.5.1 Hypothèse simplificatrices

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

- Les circuits magnétiques sont symétriques.
- La répartition de l'induction dans l'entrefer est sinusoïdale.
- L'entrefer est constant.
- On néglige les phénomènes de saturation, ce qui permet de considérer le flux magnétique comme fonction linéaire des courants.
- L'effet de l'encochage est négligeable.
- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas prise en compte.

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

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

III.5.2 Modélisation de la MAS dans le plan triphasé abc

Soit une machine asynchrone triphasée au stator et au rotor représentée schématiquement par la **Figure III.2** et dont les phases sont repérées respectivement par S_A , S_B , S_C .

L'angle électrique θ variable en fonction du temps définit la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phases S_A et R_a choisis comme axes de référence [24].

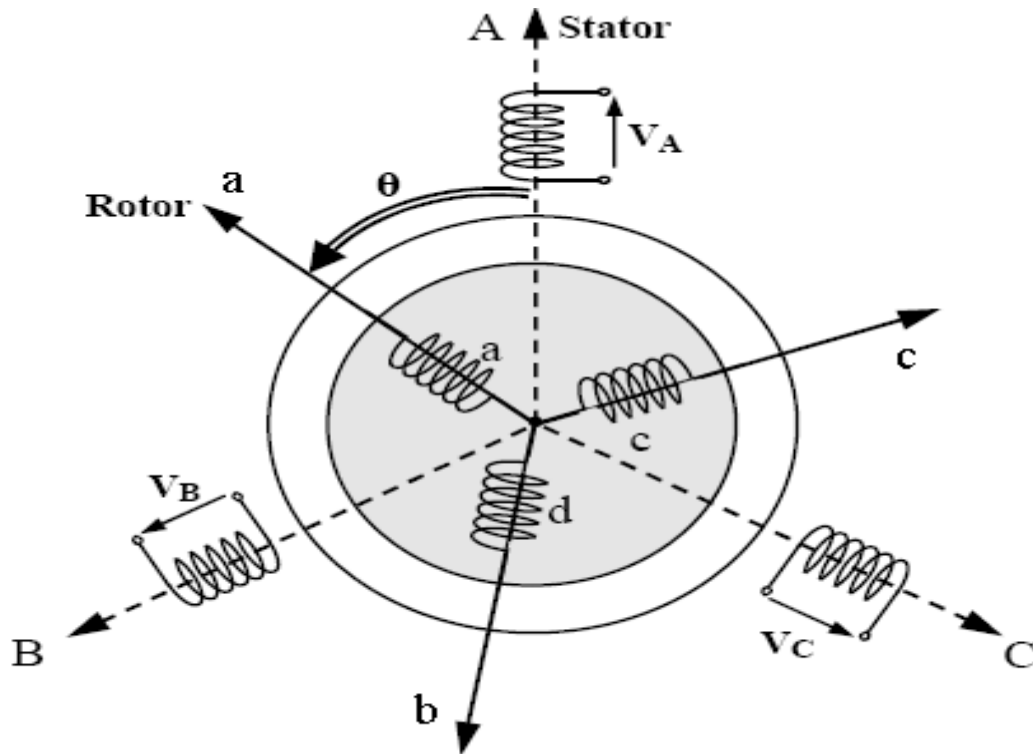


Figure III.2 : Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée.

III.5.3 Équations générales de la machine asynchrone triphasée

Dans ces conditions, si on considère que le moteur à induction est triphasé au stator et au rotor. Les trois types d'équations traduisant le comportement du moteur sont [28]:

a-Équations électriques

Les équations de tension des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques Sont:

$$\begin{cases} V_{s_A} = R_s i_{sa} + \frac{d}{dt} \Phi_{sa} \\ V_{s_B} = R_s i_{sb} + \frac{d}{dt} \Phi_{sb} \\ V_{s_C} = R_s i_{sc} + \frac{d}{dt} \Phi_{sc} \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

$$\begin{cases} V_{r_A} = R_r i_{ra} + \frac{d}{dt} \Phi_{ra} \\ V_{r_B} = R_r i_{rb} + \frac{d}{dt} \Phi_{rb} \\ V_{r_C} = R_r i_{rc} + \frac{d}{dt} \Phi_{rc} \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

En désignant par:

$V_{s_A}, V_{s_B}, V_{s_C}$:Tensions appliquées aux trois phases statoriques.

$i_{s_A}, i_{s_B}, i_{s_C}$:Courants qui traversent les trois phases statoriques.

$\Phi_{s_A}, \Phi_{s_B}, \Phi_{s_C}$:Flux totaux à travers ces enroulements.

$V_{r_A}, V_{r_B}, V_{r_C}$:Tensions rotoriques.

$i_{r_A}, i_{r_B}, i_{r_C}$:Courants rotoriques.

$\Phi_{r_A}, \Phi_{r_B}, \Phi_{r_C}$:Flux rotoriques.

R_s : Résistance d'une phase statorique.

R_r : Résistance d'une phase rotorique.

Les équations (III.2) et (III.3) peuvent être écrites sous la forme matricielle suivante:

Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} V_{s_A} \\ V_{s_B} \\ V_{s_C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s_A} \\ i_{s_B} \\ i_{s_C} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{s_A} \\ \Phi_{s_B} \\ \Phi_{s_C} \end{bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

Ou sous la forme condensée comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{s(abc)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s(abc)} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{s(abc)} \end{bmatrix} \quad (\text{III.6})$$

Pour le rotor:

$$\begin{bmatrix} V_{r_A} \\ V_{r_B} \\ V_{r_C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{r_A} \\ i_{r_B} \\ i_{r_C} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{r_A} \\ \Phi_{r_B} \\ \Phi_{r_C} \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

Ou sous la forme condensée comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{r(abc)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{r(abc)} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{r(abc)} \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

b-Equation magnétiques

Les hypothèses simplificatrices citées antérieurement conduisent à des relations linéaires entre les flux et les courants de la machine asynchrone, ces relations s'écrivent matriciellement comme suit: [29]

Pour le stator:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{sr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.9})$$

Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{sr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.10})$$

Tel que :

$$\begin{bmatrix} M_{sr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{rs} \end{bmatrix}^T$$

On désigne par:

$\begin{bmatrix} L_s \end{bmatrix}$: Matrice des inductances statoriques.

$\begin{bmatrix} L_r \end{bmatrix}$: Matrice des inductances rotoriques.

$\begin{bmatrix} M_{sr} \end{bmatrix}$: Matrice des inductances mutuelles statoriques.

$\begin{bmatrix} M_{rs} \end{bmatrix}$: Matrice des inductances mutuelles rotoriques.

Où :

$$\begin{bmatrix} L_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s M_s M_s \\ M_s L_s M_s \\ M_s M_s L_s \end{bmatrix} \quad (\text{III.11})$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (\text{III.12})$$

Ainsi :

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

Avec :

L_s : Inductance propre d'une phase statorique.

L_r : Inductance propre d'une phase rotorique.

M_s : Inductance mutuelle entre phases statoriques

M_r : Inductance mutuelle entre phases rotoriques.

θ : Angle électrique définit la position relative instantanée entre les axes Statoriques et les axes rotoriques qui sont choisis comme axes des références.

M : Maximum de l'inductance mutuelle entre phase du stator et la phase Correspondent du rotor

C-Equation mécanique

L'étude des caractéristiques de la machine asynchrone fait introduire de la variation non seulement des paramètres électriques (tension, courant, flux) mais aussi des paramètres mécaniques (couple, vitesse) [30] :

$$C_e = P \left[i_{s(abc)} \right]^T \frac{d}{dt} [M_{sr}] \left[i_{r(abc)} \right] \quad (\text{III.14})$$

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

$$J \frac{d}{dt} \Omega_r = C_e - C_r - f \Omega_r \quad (\text{III.15})$$

Avec :

J : Moment d'inertie des masses tournantes.

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

Ω_r : Vitesse rotorique.

C_e : Couple électromagnétique.

f : Coefficient de frottement visqueux.

Les équations (III.4) ainsi obtenus sont à coefficients variables entraînant la complexité de résolution du modèle défini par (III.3). Cela conduira à l'usage de la transformation de Park qui permettra de rendre constant ces paramètres.

III.6 Transformation de Park

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

Cette transformation ainsi, pour l'objectif de rendre les inductances mutuelles du modèle indépendantes de l'angle de rotation [31].

III.6.1 Différents repères

L'isotropie du moteur asynchrone permet une grande souplesse dans la composition des équations de la machine selon deux axes à l'aide des composantes de Park, cela nécessite l'utilisation d'un repère qui permet de simplifier au maximum les expressions analytiques.

Il existe différentes possibilités pour le choix du repère d'axes, se ramène pratiquement à trois référentiels (systèmes biphasés) orthogonaux [25]:

1) Référentiel immobile par rapport au stator : $(\alpha - \beta) \rightarrow \omega_{obs} = 0$.

2) Référentiel immobile par rapport au rotor : $(x - y) \rightarrow \omega_{obs} = \omega_R$.

3) Référentiel immobile par rapport au champ tournant : $(d - q) \rightarrow \omega_{obs} = \omega_s$

Où :

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

III.6.2 Modélisation de la MAS dans le plan biphasé d-q

Du fait de l'existence des termes trigonométriques continus dans la matrice des inductances mutuelles $[M_{sr}]$, les coefficients des équations différentielles sont variables et la résolution analytique du système se heurte à des difficultés pratiquement insurmontables. Pour obtenir un système d'équations à coefficients constants, on transforme les enroulements statoriques et rotoriques en deux enroulements biphasés orthogonaux dq selon la transformation de PARK.

La conversion implique la transformation des enroulements équivalents du point de vue électrique et magnétique. La **Figure III.3** représente la transformation des enroulements réels abc en enroulements orthogonaux d-q [28].

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

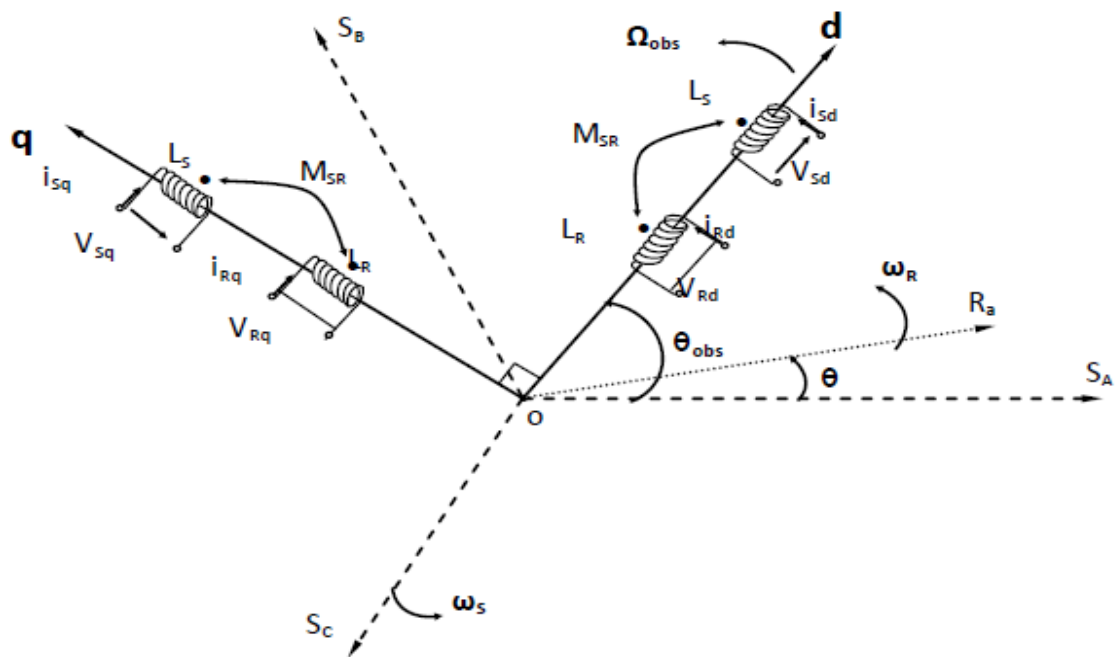


Figure III.3 Référentiel tournant d'axes (d-q)

Où :

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

La application de la transformation de Park à la machine asynchrone correspond à une transformation des trios bobine (statorique et rotorique) à deux bobine équivalente

reprenant les mêmes considérations ou aspects en terme, de flux, de couple, de courant ou du moins une image qui leur sera parfaitement proportionnelle [18].

Pour le passage du système triphasé vers le système biphasé, on a les équivalents suivants [20]:

➤ L'équivalent de tension

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_{dq0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}(\theta_{obs}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{abc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.16})$$

➤ L'équivalent de courant

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}_{dq0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}(\theta_{obs}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{abc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.17})$$

➤ L'équivalent de flux

$$\begin{bmatrix} \mathbf{\Phi}_{dq0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}(\theta_{obs}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{\Phi}_{abc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.18})$$

Ou :

$\begin{bmatrix} \mathbf{P}(\theta_{obs}) \end{bmatrix}$: est la matrice de Park

Dans le cas d'un passage inverse, on a :

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}(\theta_{obs}) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{dq0} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}(\theta_{obs}) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{dq0} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \mathbf{\Phi}_{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}(\theta_{obs}) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{\Phi}_{dq0} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

La matrice de transformation de Park modifiée directe et inverse s'écrit alors :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P}(\theta_{obs}) \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{obs}) \cos(\theta_{obs} - \frac{2\pi}{3}) \cos(\theta_{obs} - \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_{obs}) - \sin(\theta_{obs} - \frac{2\pi}{3}) - \sin(\theta_{obs} + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.20})$$

Le facteur $\sqrt{\frac{2}{3}}$: est là pour conserver la puissance électrique instantanée [29].

$$[P(\theta_{obs})]^T = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{obs}) - \sin(\theta_{obs} - \frac{2\pi}{3}) \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_{obs} - \frac{2\pi}{3}) - \sin(\theta_{obs} - \frac{2\pi}{3}) \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_{obs} + \frac{2\pi}{3}) - \sin(\theta_{obs} + \frac{2\pi}{3}) \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.21})$$

Lorsque l'angle est attribué à la valeur zéro, la transformation de Park est dite Transformation de Clarke et la matrice de passage s'écrit comme suit:

$$[C] = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{III.22})$$

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

III.6.3 Equation électrique [32]

a- Equations des tensions

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s \\ \omega_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{sq} \\ \Phi_{sd} \end{bmatrix} \quad (\text{III.23})$$

$$\begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -(\omega_s - \omega_r) \\ (\omega_s - \omega_r) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{rq} \\ \Phi_{rd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.24})$$

b-Equation magnétique

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & 0 \\ 0 & l_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{III.25})$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_r & 0 \\ 0 & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \quad (\text{III.26})$$

Avec:

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

$M = \frac{3}{2} M_o$: Inductance cyclique mutuelle stator-rotor

c-Equation mécanique

Le couple électromécanique représenté dans l'équation (III.9) devient :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_r} (\Phi_{rd} i_{sd} - \Phi_{rq} i_{sq}) \quad (\text{III.27})$$

L'équation de la vitesse mécanique est représentée par l'équation :

$$J \frac{d}{dt} \Omega_r = C_{em} - C_r - f \Omega_r \quad (\text{III.28})$$

III.7 la machine asynchrone alimentée en tension [33]

Pour une machine asynchrone alimentée en tension, si on considère le courant statorique i_s et le flux rotorique Φ_R comme variables d'état, et la pulsation ω_s et les tensions V_{sd} , V_{sq} comme grandeur de commande et le couple C_r comme une perturbation, on aura le schéma bloc suivant, **Figure III.4**.

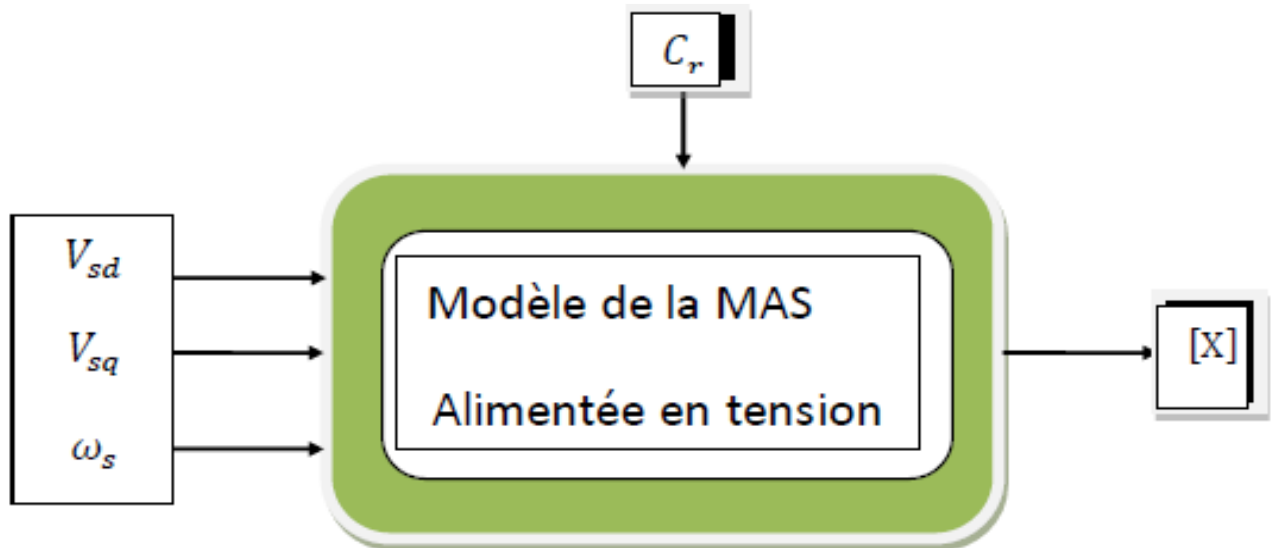


Figure III.4 Schéma bloc de la machine asynchrone alimentée en tension.

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

$$[X] = \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \text{ Ou } [X] = \begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} \text{ ou } [X] = \begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} \text{ ou } [X] = \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{III.29})$$

III.8 Représentation d'état du modèle de la MAS [33]

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

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \end{bmatrix} = [A][X] + [B][U] \quad (\text{III.30})$$

Avec :

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

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

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

$[B]$: Matrice du système de commande

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d i_{s\alpha}}{dt} = -\left(\frac{R_t}{L_s \sigma}\right) i_{s\alpha} + \frac{1-\sigma}{M T_s \sigma} \Phi_{r\alpha} + \frac{1-\sigma}{M \sigma} \omega \Phi_{r\beta} + \frac{1-\sigma}{L_s \sigma} V_{s\alpha} \\ \frac{d i_{s\beta}}{dt} = -\left(\frac{R_t}{L_s \sigma}\right) i_{s\beta} + \frac{1-\sigma}{M T_s \sigma} \Phi_{s\alpha} + \frac{1-\sigma}{M \sigma} \omega \Phi_{r\beta} + \frac{1-\sigma}{L_s \sigma} V_{s\beta} \\ \frac{d \Phi_{r\alpha}}{dt} = \frac{M}{T_r} i_{s\alpha} - \frac{1}{T_r} \Phi_{r\alpha} - \omega \Phi_{r\beta} \\ \frac{d \Phi_{r\beta}}{dt} = -\frac{M}{T_r} i_{s\beta} + \omega \Phi_{r\alpha} - \frac{1}{T_r} \Phi_{r\beta} \end{array} \right. \quad (\text{III.31})$$

Avec :

$$T_s = \frac{L_s}{R_s} : \text{Constante du temps statorique}$$

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} : \text{Constante de temps rotorique}$$

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

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{R_t}{L_s \sigma} & 0 & \frac{1-\sigma}{M T_s \sigma} & -\frac{1-\sigma}{M \sigma} \omega \\ 0 & -\frac{R_t}{L_s \sigma} & -\frac{1-\sigma}{M \sigma} \omega & \frac{1-\sigma}{M T_s \sigma} \\ \frac{M}{T_r} & 0 & & -\frac{1}{T_r} \omega \\ & 0 & \frac{M}{T_r} & \omega - \frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \quad (\text{III.32})$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s \sigma} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s \sigma} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.33})$$

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

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{R_t}{L_s \sigma} & \omega_s & \frac{1-\sigma}{MT_s \sigma} & -\frac{1-\sigma}{M \sigma} \omega \\ -\omega_s & -\frac{R_t}{L_s \sigma} & -\frac{1-\sigma}{M \sigma} \omega & \frac{1-\sigma}{MT_s \sigma} \\ \frac{M}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & (\omega_s - \omega) \\ 0 & \frac{M}{T_r} & (\omega_s - \omega) & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \quad (\text{III.34})$$

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

$$C_e = \frac{PM}{L_r} (\Phi_{r\alpha} i_{s\beta} - \Phi_{r\beta} i_{s\alpha}) \quad (\text{III.35})$$

III.9 Simulation du modèle de la machine asynchrone

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

Dans certaines applications pour lesquelles la variation de la vitesse est nécessaire, le moteur sera alimenté par un système de tensions triphasées ou par un système de courants triphasés (injectés) dans les enroulements du stator, par l'intermédiaire d'un convertisseur électronique de puissance placé entre le moteur et le réseau industriel électrique [34].

La **Figure III.5** représente le schéma bloc du modèle obtenu, ce dernier sera simulé à l'aide du logiciel SIMULINK sous MATLAB. Les paramètres de la MAS utilisée dans ce travail sont donnés en Annexe.

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

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

$$\begin{cases} V_{sa} = \sqrt{2}V_s \sin(\omega_s t) \\ V_{sb} = \sqrt{2}V_s \sin(\omega_s t - \frac{2\pi}{2}) \\ V_{sc} = \sqrt{2}V_s \sin(\omega_s t + \frac{2\pi}{2}) \end{cases} \quad (\text{III.36})$$

Avec :

V_s : Valeur efficace de tension

ω_s : Pulsation d'alimentation

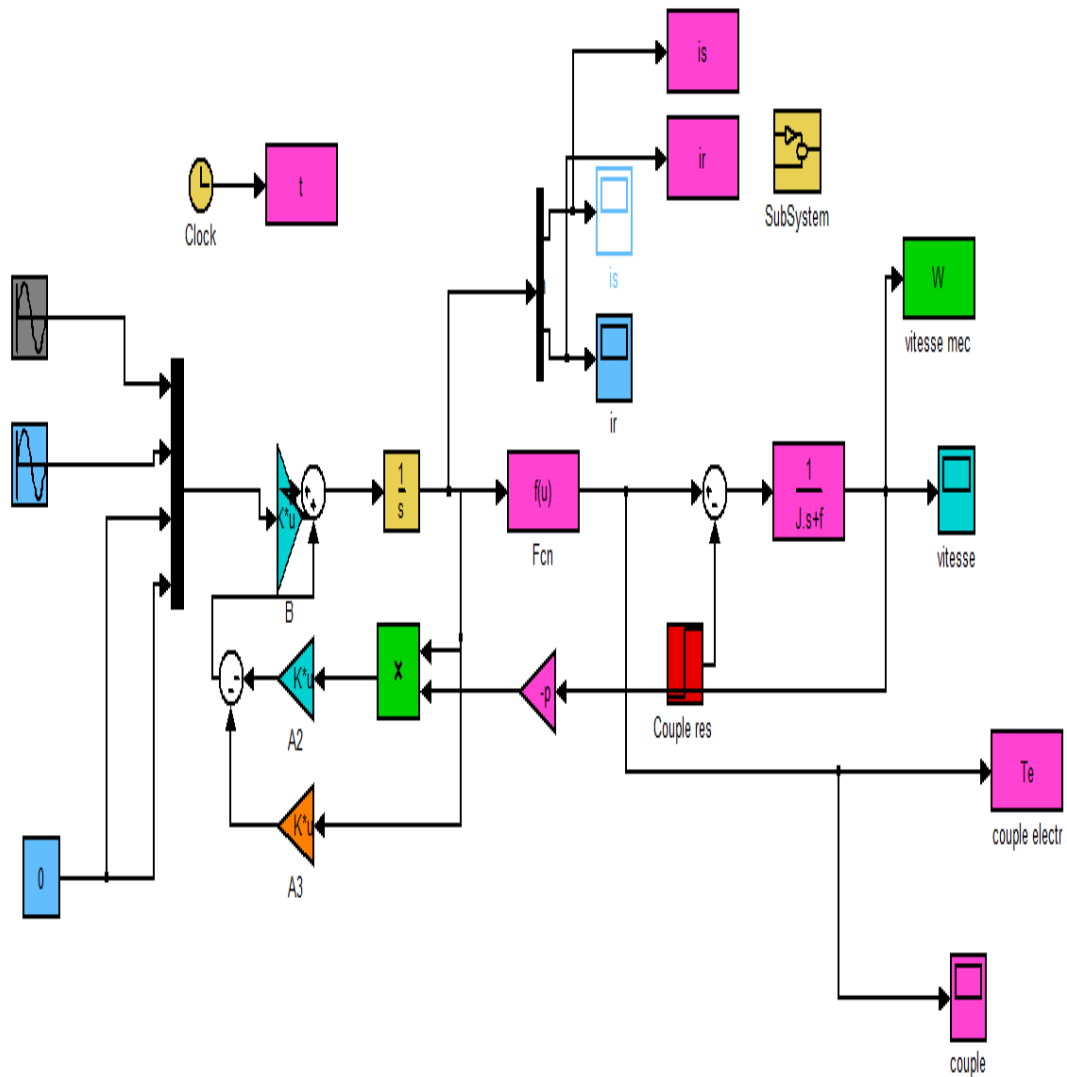


Figure III.5 Schéma de simulation de la MAS.

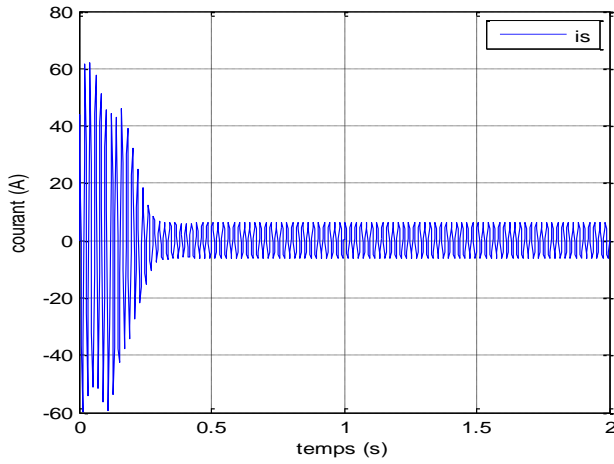


Figure III.6 Courant Statorique (A) à vide

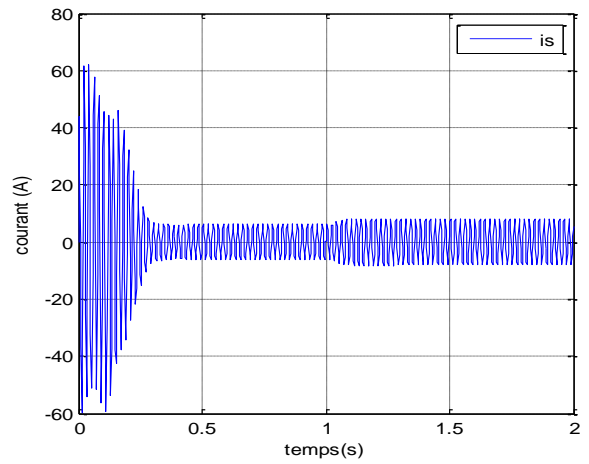


Figure III.7 Courant Statorique (A) en charge

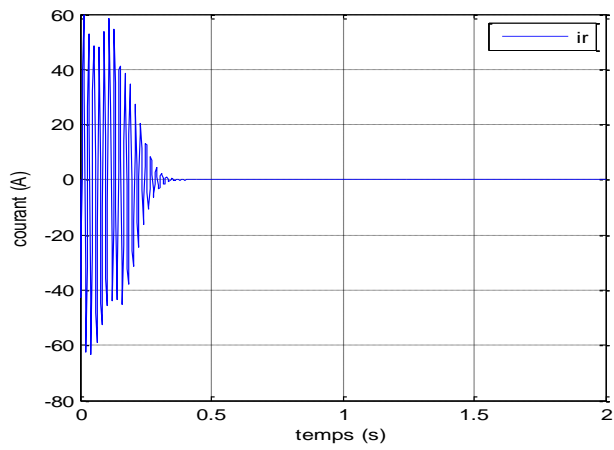


Figure III.8 Courant rotorique (A) à vide

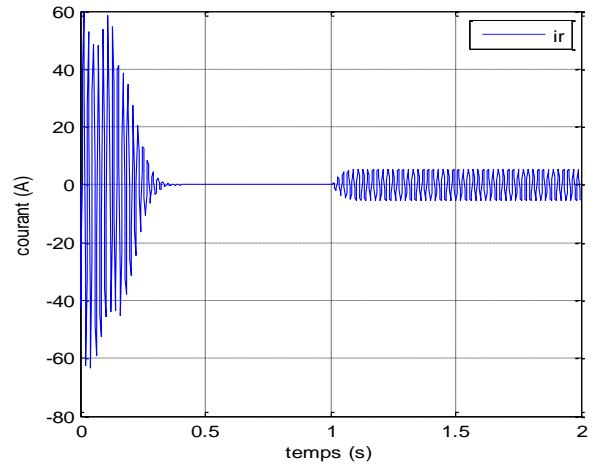


Figure III.9 Courant rotorique (A) en charge

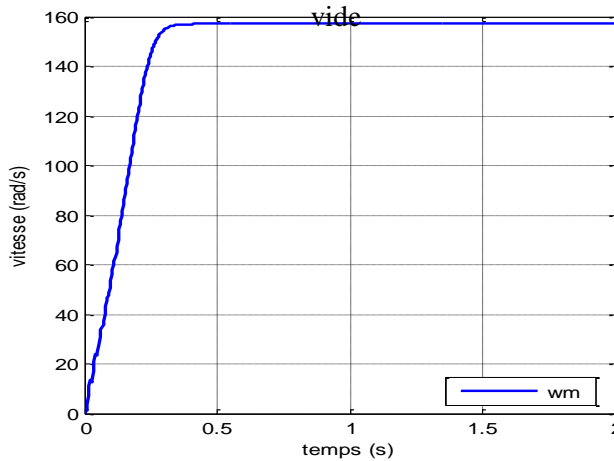


Figure III.10 la vitesse (rad/s) à vide

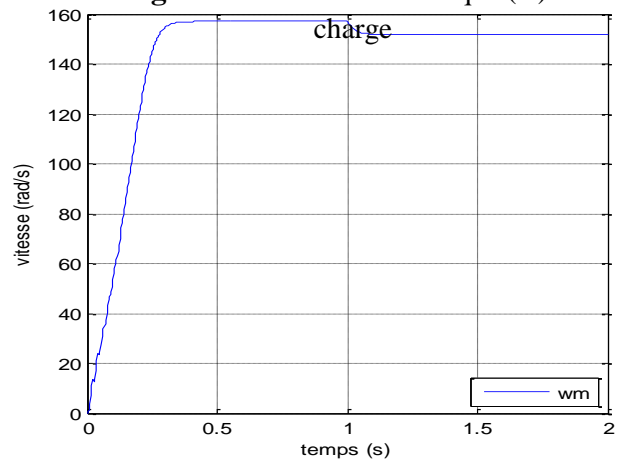


Figure III.11 la vitesse (rad/s) en charge

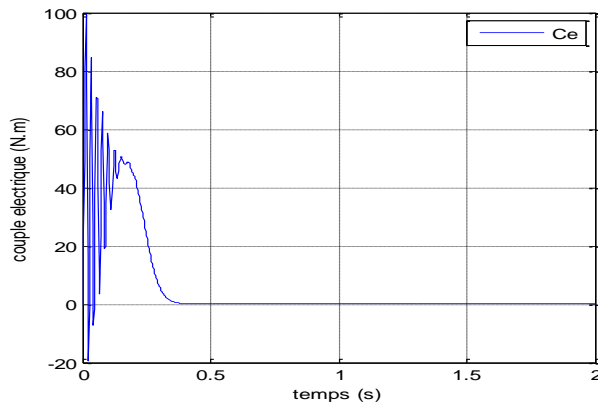


Figure III.12 couple (N.m) à vide

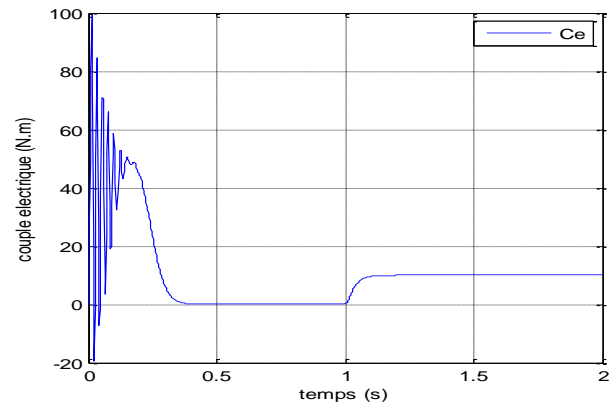


Figure III.13 couple (N.m) en charge

III.10 Interprétation des résultats de simulation

Notons que les paramètres de la machine sont donnés dans l'annexe (A).

En première étape on va simuler numériquement le fonctionnement de la machine asynchrone alimenté directement par le réseau standard 220/380V, 50HZ et sans l'application de charge ($C_r = 0$).

L'examen des courbes des **Figure III.6, III.8 et III.12** permet de constater que le démarrage à vide avec une tension nominale permet d'avoir:

Aux premiers instants, les courants statoriques présentent des oscillations successives autour de zéro, mais qui disparaissent rapidement au bout de quelques alternances, le régime permanent est atteint, ces oscillations peuvent être à l'origine de la destruction de la machine par échauffement en cas de répétitions excessives.

Pendant le régime transitoire, le couple est fortement pulsatoire, présente aux premiers instants de démarrage des battements importants suivi d'un nombre d'oscillations avant de se stabiliser à zéro.

En deuxième étape, une perturbation du couple ($C_r = 5 \text{ N.m}$) est appliquée à l'arbre du moteur à l'instant ($t = 1 \text{ s}$) et les résultats de simulation sont regroupés dans la **Figure III.7, III.9, III.11 et III.13**

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

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

III.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait la modélisation de la machine asynchrone cette modélisation basée sur la théorie de Park, l'intérêt primordial de cette transformation est de simplifier le problème dans le modèle triphasé.

Les résultats obtenus par simulation montrent la validité du modèle de Park de la machine asynchrone, cette dernière répond bien pour décrire l'évolution d'un démarrage direct sur un réseau standard.

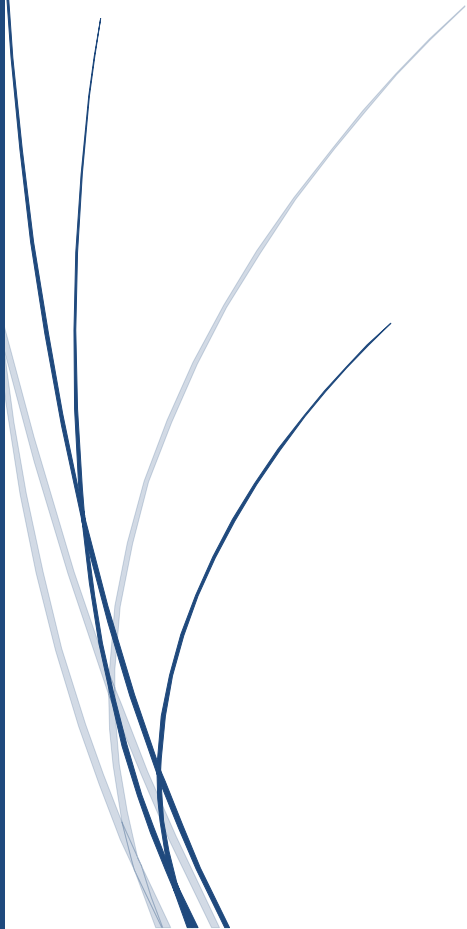
Malgré cela, la machine seule ne répond pas toujours aux exigences des systèmes d'entraînements à vitesse variable.



2018/2019

Chapitre IV

Simulations et résultats



IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, on considère la simulation d'une machine MAS en présence de défaut, permettant de représenter les différentes courbes du courant statorique, du couple et de la vitesse. La simulation est effectuée dans différentes applications de fonctionnement: la machine à l'état de coupure des phases et en déséquilibre des phases de tension

Ensuite, on présente une analyse détaillée des différents défauts. Cette analyse a pour objectif d'analyser les phénomènes observés sur les grandeurs électriques et mécaniques du moteur, tels que les oscillations du couple et de la vitesse, ainsi que la modulation de l'enveloppe du courant statorique.

IV.2 Simulation du modèle de la machine asynchrone en présence de défauts

Une fois le modèle de la machine asynchrone MAS établi, nous pouvons aborder l'aspect lié à la simulation de celle-ci en utilisant **MATLAB/SIMILINK**.

Cela permet de mettre en évidence le comportement du moteur asynchrone en présence d'un défaut dans le cas de coupure d'une et de trois phases d'un côté et d'autre coté la présence de l'équilibre d'une et de trois phases.

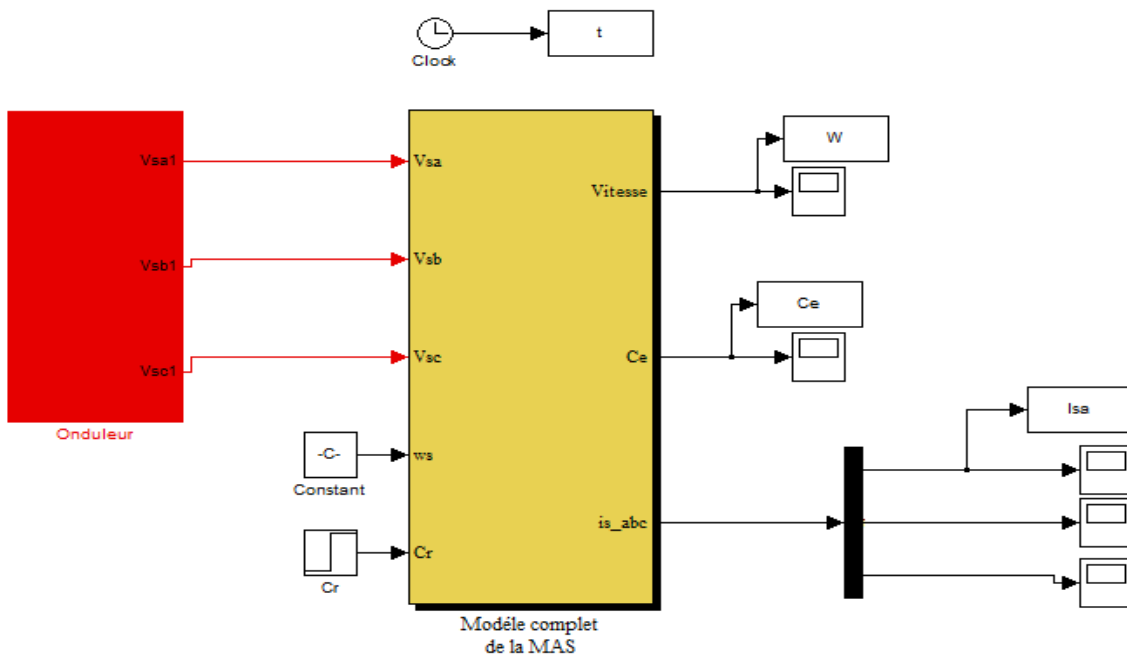


Figure IV.1 bloc de la machine asynchrone MAS

IV.3 Résultats de simulations

Après la réalisation du schéma bloc de la machine associée à un onduleur triphasé à MLI, plusieurs applications sont considérées.

Cas de coupure de phases

1^{ere} application : coupure monophasés

Dans cette application, on considère une phase de l'alimentation de la machine est coupée après un temps considéré ($t=4s$), les caractéristiques de la machine sont

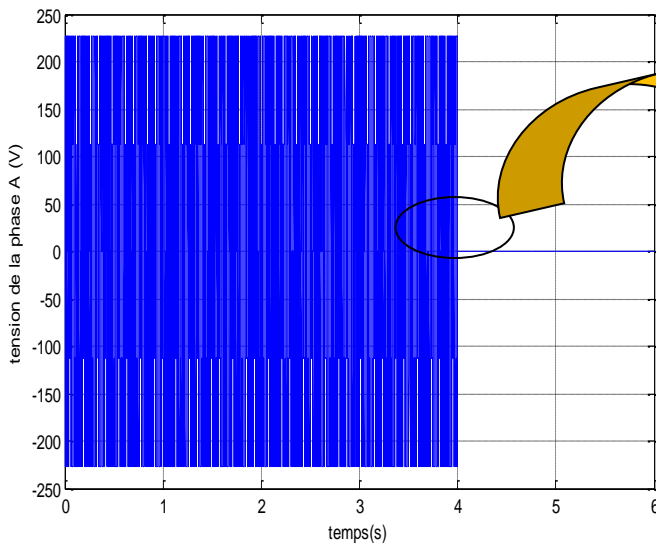


Figure IV. 2 Tension d'alimentation (V)
(Cas d'une coupure d'une phase)

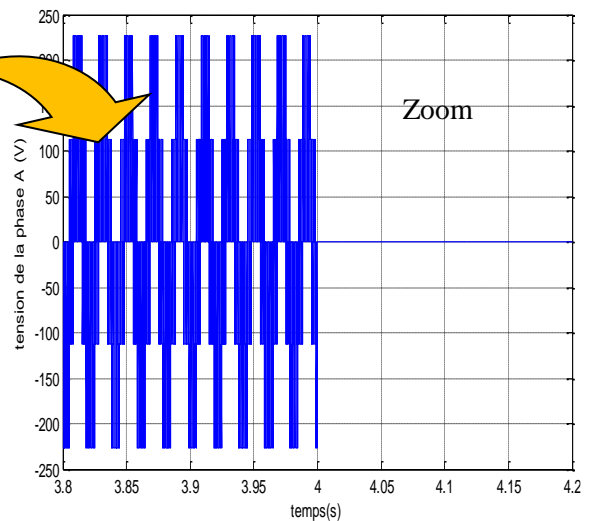


Figure IV. 3 Zoom de la tension d'alimentation (V)
(Cas coupure d'une phase)

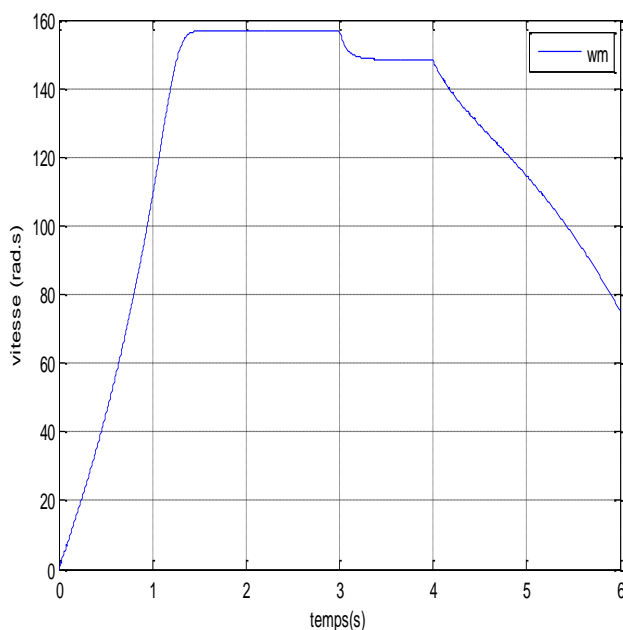


Figure IV. 4 Vitesse en (rad/s) (cas d'une coupure d'une phase)

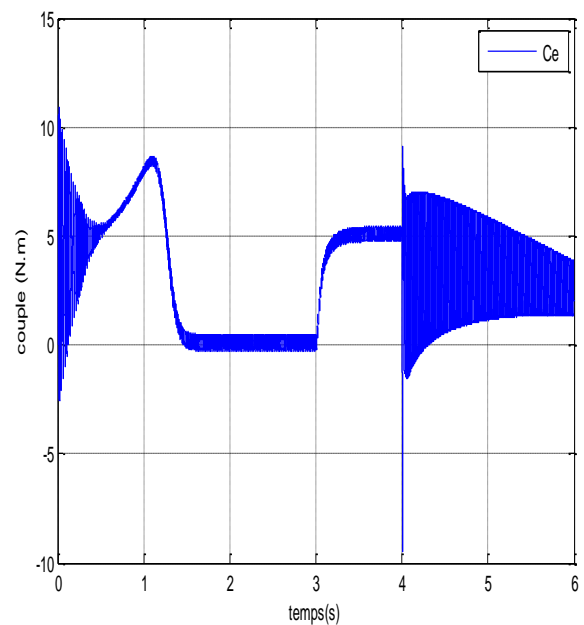


Figure IV. 5 Couple en (Nm) (cas d'une coupure d'une phase)

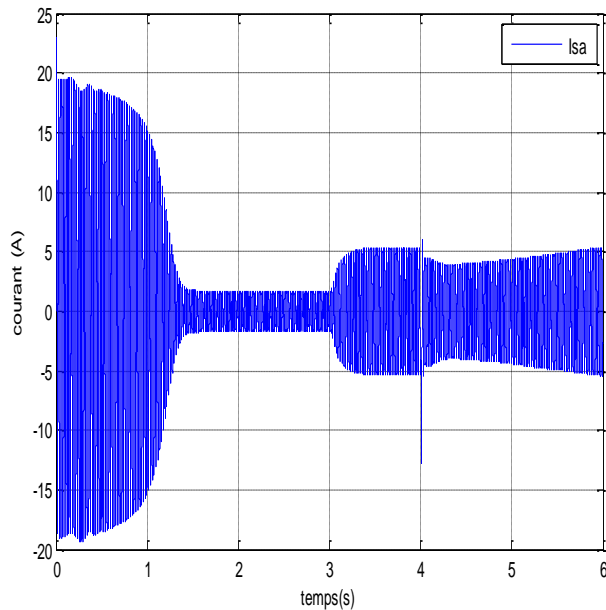


Figure IV. 6 Courant $I_{s\alpha}$ en (A) (cas d'une coupure d'une phase)

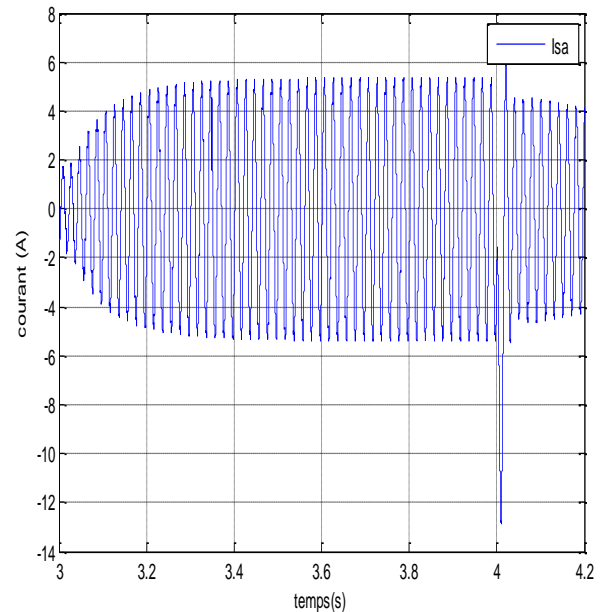


Figure IV. 7 Zoom Courant $I_{s\alpha}$ en (A) (cas d'une coupure d'une phase)

✚ Interprétation des résultats de simulation

Dans cette partie de ce travail on considère une phase d'alimentation de la machine coupée c à d ($V_a = 0$) à un temps considéré $t=4s$, appliqué après l'application d'un couple de charge $C_r = 5 \text{ Nm}$ à $t = 3s$, où les résultats de simulation sont représentés comme l'indique la figure ci-dessus.

La figure IV.2 illustre la tension d'alimentation en présence d'une coupure de tension dans une durée de temps ($t=4s$), après cette durée la tension est considérée nulle. La figure VI.3 présente le zoom de cette tension d'alimentation.

La figure IV. 4 représente la vitesse, on constate que la vitesse suit parfaitement sa référence, ($\omega = 157 \text{ rad/s}$), après l'application de la charge ($C_e = 5 \text{ NM}$), une diminution de cette dernière est remarqué, après la coupure de la tension d'alimentation on constate une chute brusque de la vitesse ($\omega = 80 \text{ rad/s}$), et sa peut influencer sur le comportement et les caractéristiques de la machine en générale.

Le couple de la machine qu'il est illustré par la figure VI.5, couple augmente quand on applique le couple de charge ($C_e = 5 \text{ N.m}$) est ça est évident. Une augmentation de ce dernier est remarquable à l'instant de la coupure de la phase A de la tension suivi par des ondulations (harmoniques) puis il s'annule.

L'allure du courant statorique évoqué par la figure VI.6, au démarrage un courant très important est remarquable, puis dans le régime permanent il se stabilise est suis sa référence, après l'application de couple de charge ($C_e = 5 \text{ Nm}$) une augmentation de ce dernier est concevable, mais à l'instant de la coupure d'une phase une perturbation de ce dernier est remarquable traduite par une augmentation non suitable pour la machine (échauffement des enroulements).

2^{eme} application : coupure triphasé

Dans cette application, on considère les trois phases de l'alimentation de la machine sont coupées, après un temps considéré ($t=4s$), les caractéristiques de la machine sont présentés par les résultats de simulation suivantes :

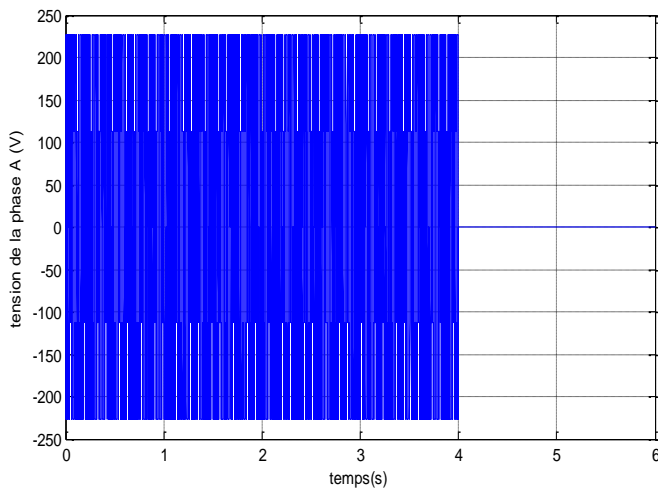


Figure IV. 8 Tension d'alimentation (V)
(Cas d'une coupure de phase A)

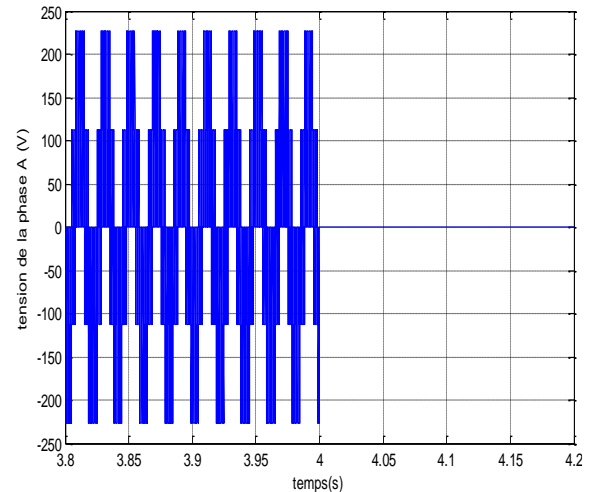


Figure IV. 9 Zoom de la tension
d'alimentation (V)
(Cas coupure de phase A)

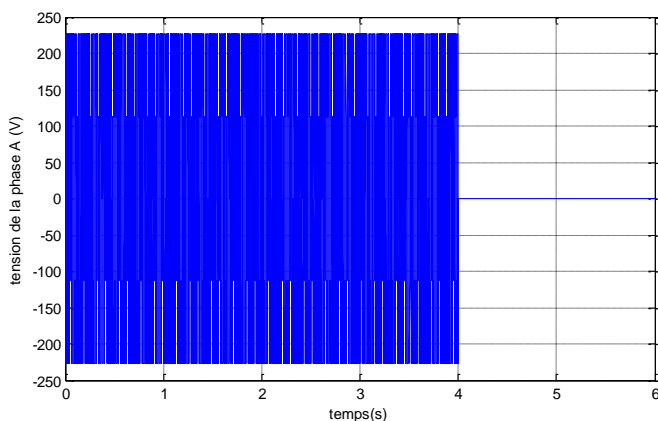


Figure IV. 10 Tension d'alimentation (V)
(Cas d'une coupure de phase B)

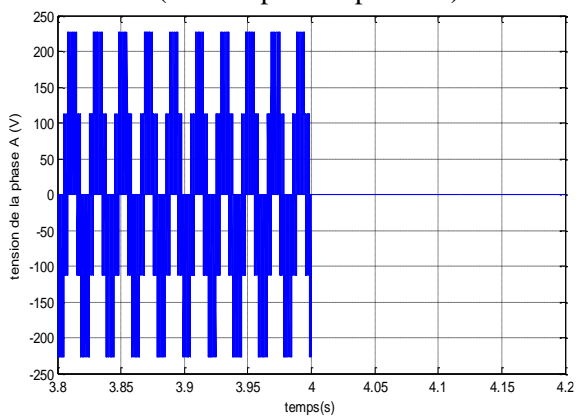


Figure IV. 11 Zoom de la tension
d'alimentation (V)
(Cas coupure de phase B)

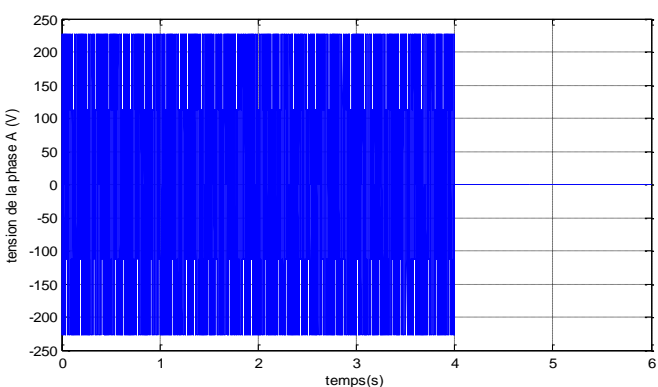


Figure IV. 12 Tension d'alimentation (V)
(Cas d'une coupure de phase C)

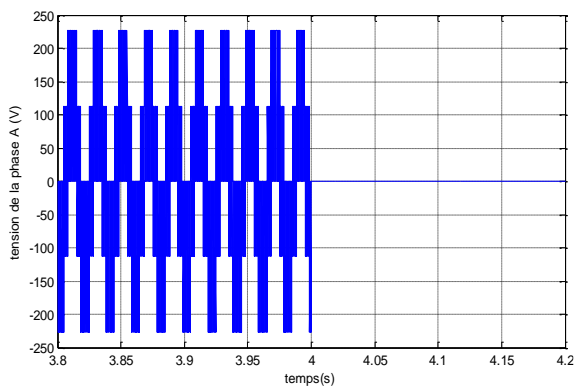


Figure IV. 13 Zoom de la tension
d'alimentation (V)
(Cas coupure de phase C)

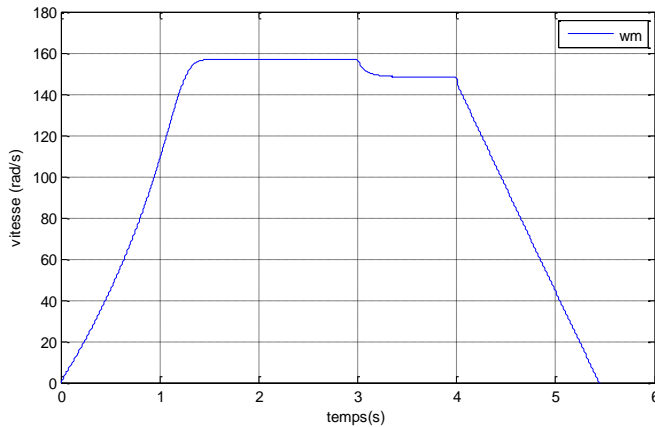


Figure IV. 14 Vitesse en (rad/s) (Cas d'une coupure d'une phase)

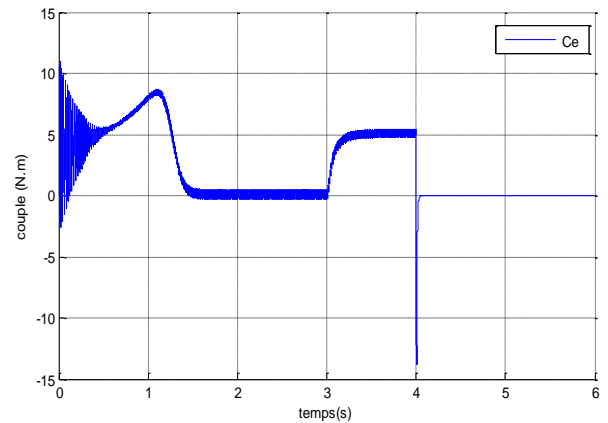


Figure IV. 15 Couple en (Nm) (Cas d'une coupure d'une phase)

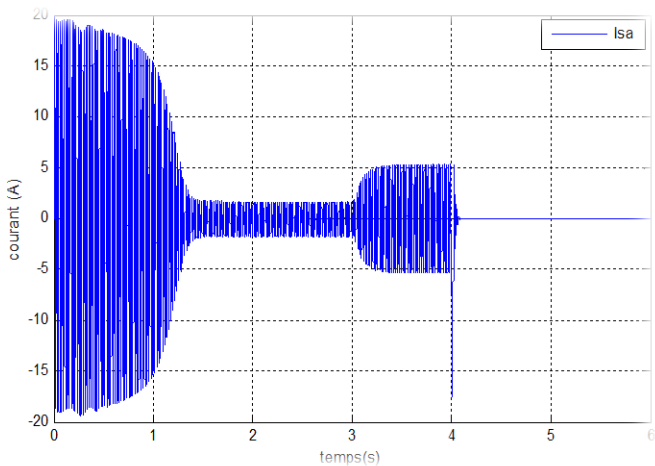


Figure IV. 16 Courant Isa en (A) (Cas d'une coupure d'une phase)

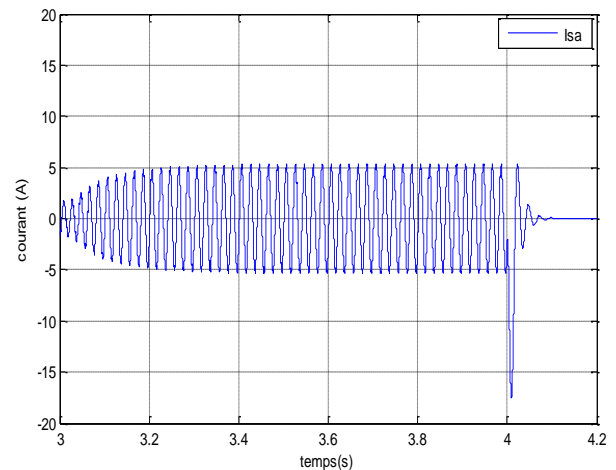


Figure IV. 17 Zoom Courant Isa en (A) (Cas d'une coupure d'une phase)

✚ Interprétation des résultats de simulation

Dans cette deuxième application, un défaut de coupure de trois phases successives est considéré c à d ($V_a=0$), ($V_b=0$) et ($V_c=0$), les caractéristiques de la machine sous groupés dans les figures ci-dessus.

Pour l'allure de la vitesse, on remarque que cette dernière suit parfaitement sa référence avant de l'application du couple de charge, après l'application d'un couple de charge de $C_r = 5$ Nm, elle diminue légèrement, à l'instant de coupure des trois tensions, la vitesse chute directement vers zéro figure VI.14.

D'après la figure VI.15 qui représente le couple électromagnétique de la machine, on observe bien que ce dernier est fort au démarrage, puis il se stabilise à zéro avant l'application du couple résistant, une augmentation de ce dernier est observable, après la coupure des trois phases logiquement il s'annule.

Cas de déséquilibre de tension
1^{ère} application déséquilibre monophasé

Une autre application sera illustrée dans cette partie de ce mémoire, où on considère une phase d'alimentation de la machine est déséquilibrée c à d, on considère en premier lieu que la machine est alimentée par une tension de (220 V) au début, puis ont diminué cette tension jusqu'à (100V) après un temps considéré ($t= 4s$), les caractéristiques de la machine sont présentés par les résultats de simulation suivantes :

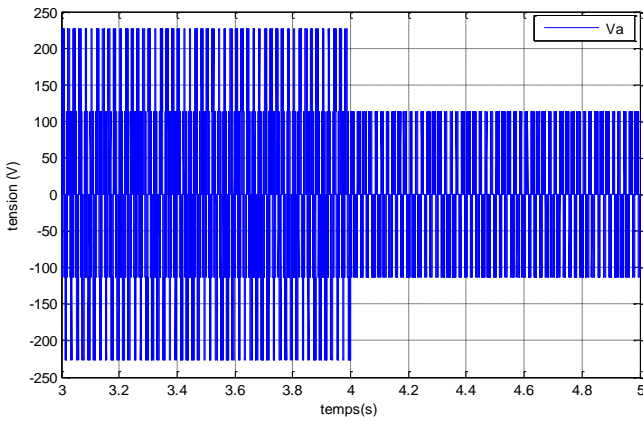


Figure IV. 18 Déséquilibre de la tension d'alimentation (V) (cas d'une phase A)

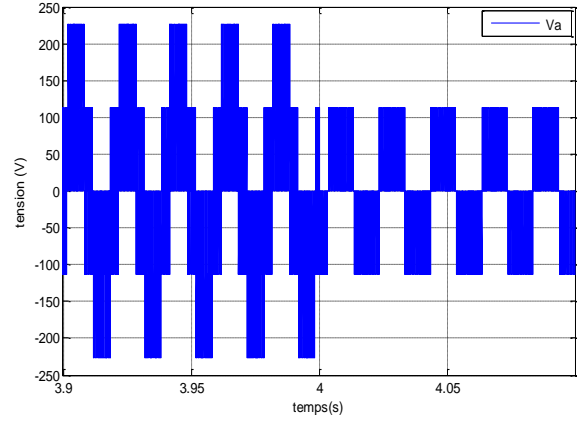


Figure IV. 19 Zoom déséquilibre de la tension d'alimentation (V) (cas d'une phase A)

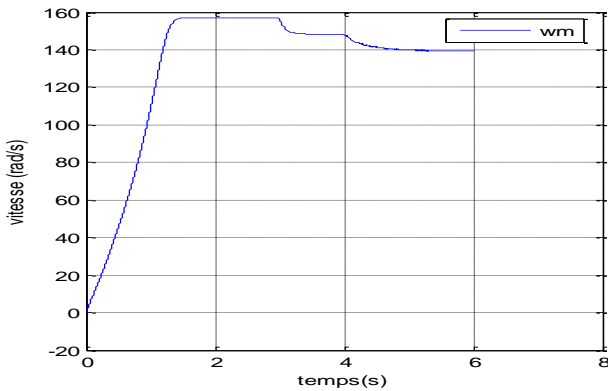


Figure IV. 20 Vitesse en (rad/s) (cas déséquilibre d'une phase)

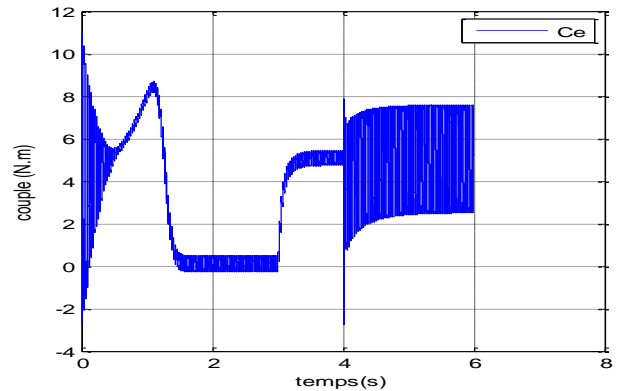


Figure IV. 21 Couple en (Nm) (cas déséquilibre d'une phase)

La figure VI.18, montre l'allure de la phase déséquilibrée, on commence par l'alimentation de machine par une tension de 220 V, pour les trois phases, après un certain temps en diminué la tension de la phase A jusqu'à 100 V et on garde les deux autres phases alimentées par 220V, comme l'indique la figure IV.18, la figure VI.19, montre le zoom de la tension déséquilibrée.

Sur la figure VI.20, on présente l'allure de la vitesse, on constate que la vitesse suit parfaitement sa référence pendant un temps ($t=3s$), après, on exerce un couple résistant de $C_r=5$ N.m, on remarque

une diminution de cette vitesse, après la décroissance de la tension, la vitesse diminuée est stabilisée à cette valeur.

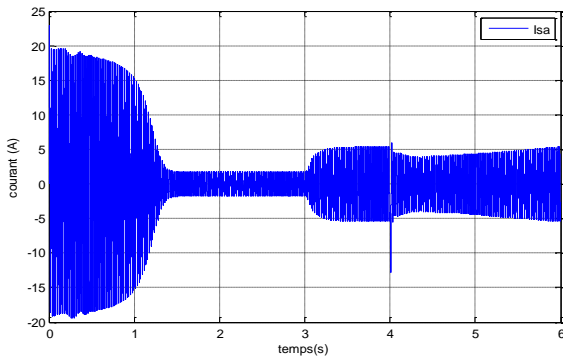


Figure IV. 22 Courant $I_{s\alpha}$ en (A) (Cas d'un déséquilibre d'une phase)

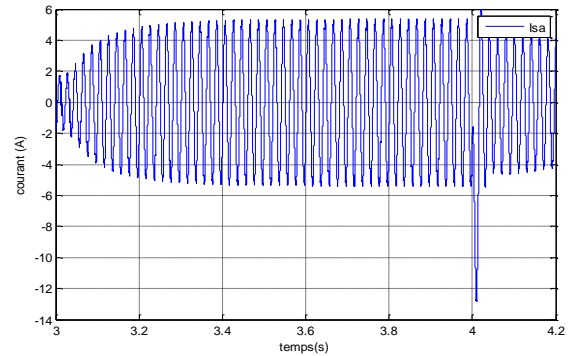


Figure IV. 23 Zoom Courant $I_{s\alpha}$ en (A) (Cas d'un déséquilibre d'une phase)

L'allure du courant statorique, au démarrage est très important, puis dans le régime permanent il se stabilise est suis sa référence, après l'application de couple de charge ($C_e = 5 \text{ Nm}$) une augmentation de ce dernier est concevable, mais à l'instant de déséquilibre d'une phase une perturbation de ce dernier est remarquable traduite par une diminution de ce dernier mais la machine continué sa fonctionnement avec des perturbations (vibrations).(voir figure VI. 21).

2^{eme} application : déséquilibre biphasé

Dans cette, on considère les phases de l'alimentation de la machine sont déséquilibré après un temps considéré ($t= 4\text{s}$), les caractéristiques de la machine sont présentés par les résultats de simulation suivantes :

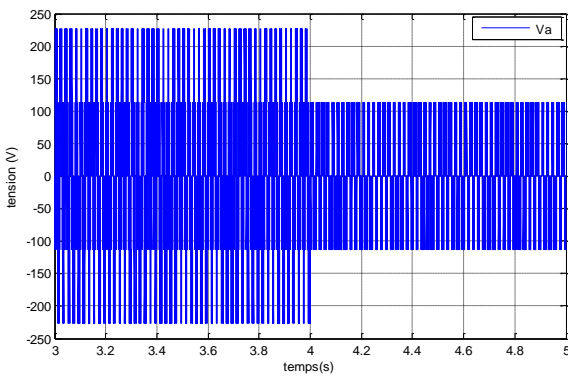


Figure IV. 24 Déséquilibre de la tension d'alimentation (V) (cas d'une phase A)

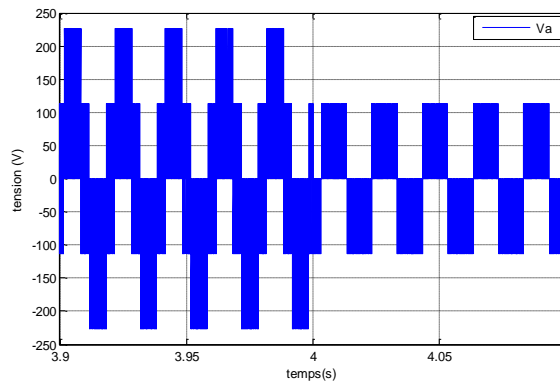


Figure IV. 25 Zoom déséquilibre de la tension d'alimentation (V) (cas d'une phase A)

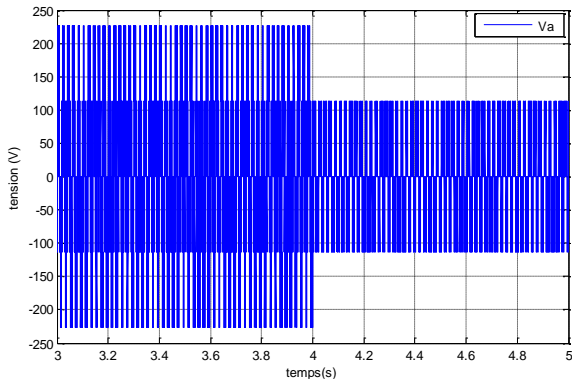


Figure IV. 26 Déséquilibre de la tension d'alimentation (V) (cas d'une phase B)

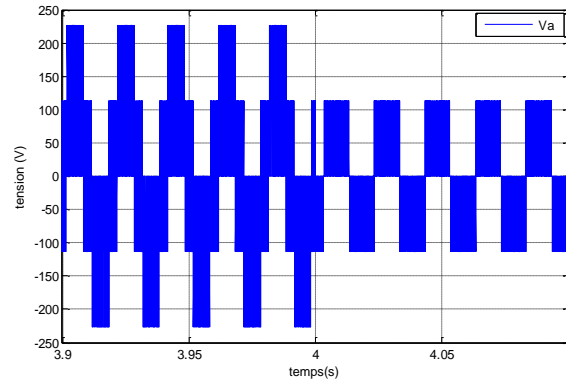


Figure IV. 27 Zoom déséquilibre de la tension d'alimentation (V) (cas d'une phase B)

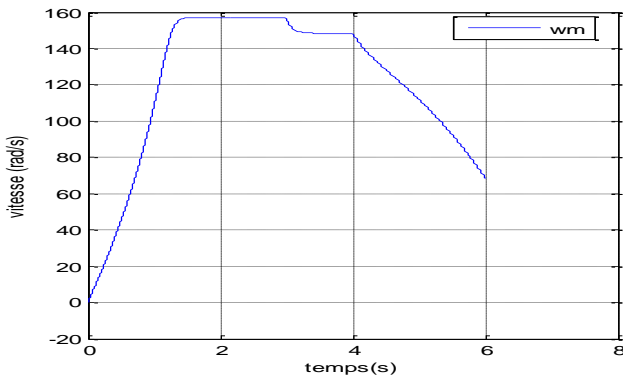


Figure IV. 28 Courant Isa en (A) (Cas d'un déséquilibre d'une phase)

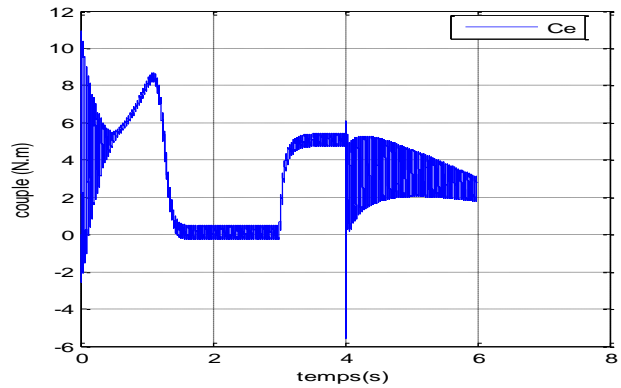


Figure IV. 29 Zoom Courant Isa en (A) (Cas d'un déséquilibre d'une phase)

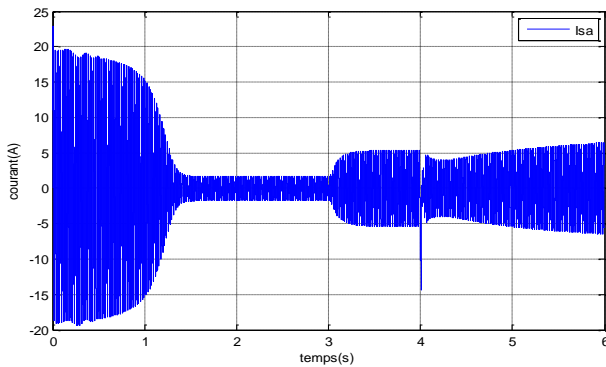


Figure IV. 30 Courant Isa en (A) (Cas d'un déséquilibre deux phases)

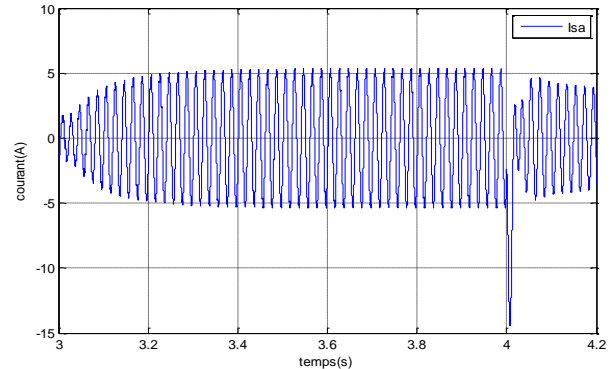


Figure IV. 31 Zoom Courant Isa en (A) (Cas d'un déséquilibre deux phases)

Les deux **Figures VI.23** et **VI.25**, montrent les signatures de tension d'alimentation avant et après le déséquilibre.

Et les deux **Figures VI.24** et **VI.26** représentent le zoom de ces tensions.

On remarque sur la **Figure VI.27**, l'allure de la vitesse de la machine avant le déséquilibre la vitesse atteint son référence sans aucun problème, après l'application du couple résistant la vitesse

diminuée légèrement, à l'instant de diminution de la tension à $V= 100V$, la vitesse chute rapidement à des valeurs très basses, mais comme même reste en fonctionnement, mais elle peut s'arrêter à n'importe quel moment.

Un fort couple est remarqué au démarrage de la machine **Figure VI.28**, puis se stabilise à une valeur avant l'application du couple résistant, après l'application de la charge il s'augmente, puis quand on diminue la tension une perturbation de ce dernier qui est suivi par l'instabilité de la machine (vibrations par exemple, probabilité de s'arrêter, cassure de certains éléments de machine).

Un courant de forme sinusoïdale et de forte amplitude au démarrage est observé sur la **Figure VI.29**, une augmentation de ce dernier est visualisé après l'application de la charge, ainsi un pic est remarqué après déséquilibre est ça peut engendre des problèmes nocifs à la machine (malle fonctionnalité de la machine).

IV.4 Conclusion

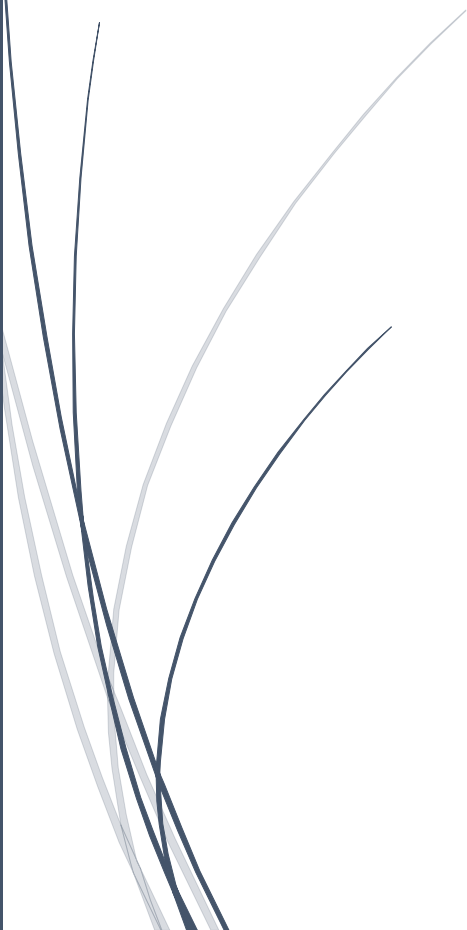
Les défauts dans les machines électriques présente un problème major à cause des conséquences qui peuvent engendrent (diminution du rendement, arrêt de la production, pertes du temps, de l'argent, retard,...), dans ce chapitre de ce mémoire, on a essayé de donner un aperçu sur ce problème dont il existe une infinité de genre de défauts, nous avons limités se travail à deux types de défauts tels que la coupure d'une ou de trois phases et au déséquilibre d'une ou de deux phases, les résultats obtenus montrent la négligence de ce genre de défaut peut conduire à l'arrêt de la machine, ce qui conduits à des conséquences catastrophiques.

A la fin de ce mémoire une conclusion générale a été présentée dont on a fait une synthèse sur le problème des défauts ainsi que leurs types.



2018/2019

Conclusion général



Conclusion générale

L'assurance de la continuité de fonctionnement des moteurs asynchrones nécessite la mise en place des programmes de maintenance. Pour cela nous avons traité plusieurs formes de maintenance et nous avons mis l'accent sur la maintenance préventive conditionnelle de quatrième niveau qui implique la maîtrise d'une technique ou technologie particulière.

Le diagnostic des moteurs asynchrones nécessite la connaissance des éléments constitutifs de ce type de machine qui nous facilite la compréhension des différents types de défauts qui peuvent apparaître dans les moteurs asynchrones.

Au début de ce travail, nous avons rappelé les différents défauts qui peuvent affectés le bon fonctionnement de la machine asynchrone; Les méthodes du diagnostic et les approches utilisés pour la modélisation sont aussi montrés.

Afin de représenter le comportement de la machine, lors d'un fonctionnement normal (sans défaut) et dégradé (avec défaut). Ensuite, nous avons construit un programme de simulation à l'aide du MATLAB/SIMILINK. Ceci, nous a permis de visualiser le courant statorique, le couple, la vitesse et les courants dans le cas de coupure des phases et le déséquilibre de tension à la sortie de l'onduleur triphasé, en considérant les différentes conditions de fonctionnement de la machine (sans et avec défaut).

Il existe plusieurs types de défauts (électrique, électromagnétiques ou mécanique), qui peuvent engendre des conséquences catastrophiques, soit dans la machine elle-même, soit dans la machine avec le convertisseur qu'il a associé, soit dans la chaine de production en générale. Donc l'étude des défauts est axe très important dans pratiquement tous les domaines industriel, et c'est ce qui motivé plusieurs chercheurs de travailler dans ce domaine, la connaissance de la nature et le genre d'un défaut, conduit à éviter des conséquences désastreuses (décroissance du facteur de puissance, rendement de la machine, échauffement des enroulements, présence d'ondulation dans le couple, augmentation non désirable dans le courant statorique et rotorique. Finalement la négligence de ce genre de défaut peut conduire à un écart significatif entre les résultats théories et celles de l'expérience.

Comme perspectives pour la continuité de ce travail :

- ✓ Elargir l'étude à d'autres défauts, (cassure de barres, court-circuit dans une spire ou plusieurs spires d'enroulement statorique.
- ✓ Excentré de l'arbre de la machine par rapport à celui de la charge.
- ✓ Cassure par exemple d'une bille dans le roulement.
- ✓ De faire des essais pratiques pour comprendre bien les différents phénomènes.

Annexe (A)

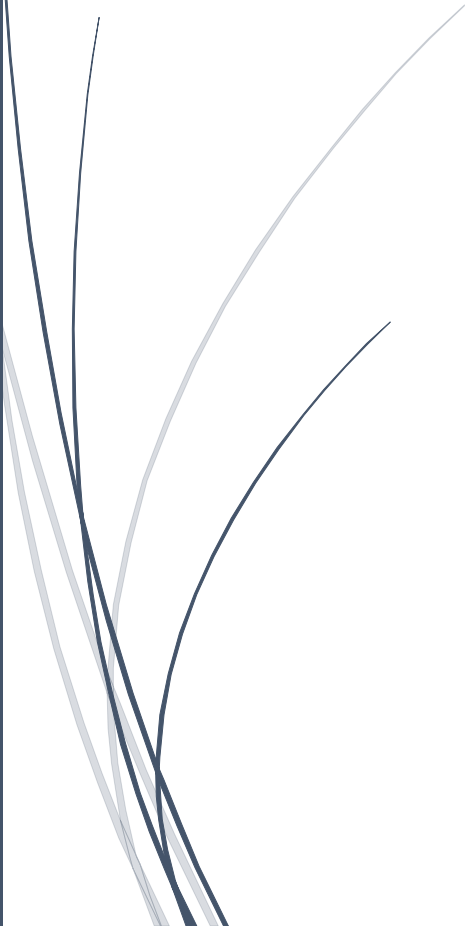
Paramètres de la machine MAS utilisés

Résistance du stator	$R_r = 6.3 \Omega$
Résistance du rotor	$R_s = 7.828 \Omega$
Inductance de stator	$L_s = 0.155 \text{ H}$
Inductance de rotor	$L_r = 0.1544 \text{ H}$
Mutuelle inductance	$M = 0.15 \text{ H}$
Moment d'inertie	$J = 0.006093 \text{ kg m}^2$
Coefficient de frottement	$f = 0.001 \text{ SI}$
Nombre de pair de pole	$P = 2$
Inductance mutuelle	$L_m = 0.15 \text{ H}$
Vitesse angulaire	$\omega_s = 2 * 50 * \pi$
La vitesse de référence	$\omega_{ref} = 157 \text{ rad/s}$
La tension nominal	$V_n = 220 * \sqrt{2}$
La couple de charge	$C_r = 5 \text{ N.m}$



2018/2019

Bibliographie



Bibliographie

- [1] Ali IBRAHIM. Contribution au diagnostic de machines électromécaniques : Exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée. Thèse de doctorat, laboratoire d'Analyse des Signaux et des Processus Industriels, université Jean Monnet .Lyon, Mars 2009.
- [2] Gaëtan DIDIER. Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances. Thèse de doctorat, université Henri Poincaré, Nancy-I. Octobre 2004.
- [3] Baptiste TRAJIN. Analyse et traitement de grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défauts mécaniques dans les entraînements asynchrones. Thèse de doctorat, l'Institut National Polytechnique de Toulouse. Toulouse, Décembre 2009.
- [4] Jérôme Antoni, Menad Sidahmed. Contrôle et diagnostic à partir des signaux acoustiques et vibratoires. Université de Technologie de Compiègne. Article spécial congrès surveillance 5.
- [5] Abba Bouguerne. Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones. Université Mentouri Constantine Faculté des sciences de l'ingénieur département d'électrotechnique. Juin 2009.
- [6] M. BOUMAHDJ, J.P. DRON, S. RECHAK et O. COUSINARD. Utilisation de l'arbre de décision pour la détection des défauts de roulement. Université de Médéa, LBMPT, Médéa, Algérie. Mars 2009.
- [7] R. Chemseddine. Analyse et traitement du courant statorique pour la détection des défauts dans les systèmes électromécaniques. Université M'HAMED BOUGARA - BOUMERDES faculté des sciences de l'ingénieur. Juin 2011.
- [8] C. MACHADO, Khaled BOURBATACHE, Mohamed GUESSASMA Emmanuel BELLENGER, Valéry BOURNY, Jérôme FORTIN. Simulation électromécanique par la MED: Application au diagnostic des défauts dans les roulements à billes. Colloque National en Calcul des Structures Mai 2013.
- [9] C. Pachaud. Diagnostic des systèmes dynamiques par analyse vibratoire.
- [10] M. EL BADAOUI. Contribution au Diagnostic Vibratoire des Réducteurs Complexes à Engrenages par l'Analyse Cepstrale.
- [11] A. Boulenger, Christian Pachaud. Surveillance des machines par analyse des vibrations.
- [12] A. Boulenger, Christian Pachaud. Analyse vibratoire en maintenance : Surveillance et diagnostic des machines.

- [13] R. TOSCANO. Commande et diagnostic des systèmes dynamiques : Application au diagnostic.
- [14] A. Bouguerne. Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones. Université Mentouri Constantine Faculté des sciences de l'ingénieur département d'électrotechnique. Juin 2009.
- [15] M. EL BADAoui. Contribution au Diagnostic Vibratoire des Réducteurs Complexes à Engrenages par l'Analyse Cepstrale.
- [16] A. Kamel, " Commande directe du couple (DTC) d'une machine asynchrone ", Thèse de magister, Université Annaba.
- [17] Chekima Djamel, " Commande d'une machine asynchrone par logique floue", Thèse de master, Université de El-Oued 2014.
- [18] G. Brahim, " Commande non linéaire de la machine à induction " Thèse de master, Université de Batna, 2012.
- [19] BouakazOuahid "contribution à l'analyse des onduleurs multi niveaux " Thèse de magistère, Batna année 2005.
- [20] Lamine M, Traoré.A, "Modélisation et simulation d'une machine asynchrone à cage à l'aide du logiciel Matlab/Simulink ", msas_pp038_45
- [21] L. Baghli, "Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de LF, RN, AG". Thèse de doctorat, université Henri poicaré, Nancy-1,1999.
- [22] Hamadi Safi Allah, " Commande par retour d'état linéarisation d'une machine asynchrone et sans défaut ", Thèse de master, Université –Msila.
- [23] Abdelli, R " Perturbations singulières appliquées au modèle de machine asynchrone avec défauts au stator et au rotor ", mémoire de magister, école nationale polytechnique d'Alger, 2007.
- [24] TamrabetHanene" Robustesse d'un Control Vectoriel de Structure Minimal d'une Machine Asynchrone " Thèse de magistère, Batna, 20.05.2006.
- [25] DissaAbdennour,"Contrôle direct du couple du moteur à induction sans capteur de vitesse associée à un observateur non linéaire ", thèse de magister, Université de Batna.

- [26] Guy Strutzer, Eddie Samigil, "Modélisation et Commande des Moteurs Triphasés. Commande vectorielle des moteurs synchrones, commande numérique par contrôleurs".
- [27] Abed Khoudir, "Techniques de commande avancées appliquées aux machines de type asynchrone", Thèse de doctorat, Université Mentouri de Constantine, 22/06/2010.
DSP''. Ellipses, Mars 2000.
- [28] Tchiali Fouad, Maghraoui Noura " Modélisation et Commande des Onduleurs Multi niveaux Asymétriques ", PFE. Dép. d'électrotechnique, U.S.T.H.B 2004.
- [29] Benyahia. M, "commande non linéaire et prédictive application à la machine asynchrone " thèse de magister, Université de Batna 2001.
- [30] R.Mohamed, "Simulation et réalisation d'un onduleur de tension monophasé à trois niveau". Mémoire de fin d'étude, institut d'électrotechnique, université de Batna 2002.
- [31] "Application de la technique de linéarisation par retour d'état à la commande d'une machine asynchrone ". PFE, Université M'sila, 2003.
- [32] Messai Med Brahim et Redouani Med Mokhtar," Contrôle direct du couple d'une machine asynchrone ", Thèse de master, Université d'El-Oued, 2014.
- [33] Zaidi Saida," Commande non linéaire du moteur à induction ", thèse de magister, Université de Batna.
- [34] Paul-Etienne Vidal, "Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation", Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2004.