



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة العربي التبسي - تبسة  
Université Larbi Tebessi – Tébessa  
معهد المناجم  
Institut des mines  
قسم الكتروميكانيك منجمية  
Département électromécanique minière



## MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention d'un diplôme de Master académique

Filière : Electromécanique

Option : électromécanique minière

# Détection des défauts dans les machines tournantes

« Cas d'une machine asynchrone triphasée »

Présenté et soutenu par

HASSANI Oumeima ET MOUSSAOUI Hadjer

Devant le jury:

		Grade	Etablissement
Président :	MELKIA Chaouki	MAA	Université Larbi Tebessi – Tébessa
Encadreur :	FARES Noureddine	MAA	Université Larbi Tebessi – Tébessa
Examinatrice :	TALEB Monia	MCB	Université Larbi Tebessi – Tébessa

Promotion 2019-2020



Année universitaire : 2019-2020

Tébessa le : 29/09/2020

## Lettre de soutenabilité

Noms et prénoms des étudiants :

1- **HASSANI Oumeima**2- **MOUSSAOUI Hadjer**

Niveau : Master II

Option : Electromécanique Minière

### Thème : Détection des défauts dans les machines tournantes « Cas d'une machine asynchrone triphasée »

Nom et prénom de l'encadreur : **FARES Noureddine**

Chapitres réalisés	Signature de l'encadreur
Chapitre I : Maintenance et diagnostic	
Chapitre II : diagnostic industriel des machines tournantes	
Chapitre III : Modélisation et simulation de la MAS à l'état sain	
Chapitre IV : Modélisation et simulation de la MAS dédié au diagnostic des défauts	

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وقل زدني علماً

# *Remerciement*

*Nous tenons tout d'abord à remercier **الله** le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.*

*Nos remerciements et notre reconnaissance vont à notre encadreur monsieur **FARES Nouredine** qui a accepté de nous encadrer et qui nous a guidé pendant l'élaboration de ce mémoire pour sa disponibilité et ses conseils précieux.*

*Nous adressons nos sincères salutations et nos vifs remerciements à tous ceux qui nous en encouragés et donnés les mains d'aides de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail a fin qui il soit présentable.*

*Nos vifs remerciements vont à monsieur le président de jury pour l'honneur qu'il nous fait et aux membres du jury pour avoir accepté de corriger et d'évaluer ce travail.*

*Nous remercions également tous les responsables de SAEK pour leur soutien qu'ils ont su nos 'apporter pour l'accomplissement de ce projet de fin d'études.*

*Nous tenons à saisir cette occasion pour adresser nos profonds remerciements et nos profondes reconnaissances à nos familles et nos amis.*

*En fin nous exprimons notre reconnaissance à tous les enseignants du département génie minier qui ont contribué à notre formation.*

# Dédicace :

Je dédie ce mémoire à :

-Mes parents qui m'ont beaucoup aidé durant mes études, et m'ont tellement encouragé moralement et psychologiquement, ils se sont sacrifiés pour moi durant toute la période de mes études, que DIEU les protègent HASSANI Abd elrahman et Khallil nacira

A mon frère Abd elhalim et à mes très chères sœurs Khadidja et Aicha et Rihab et Sanea

-A mes amies Mebarka et El batoul , Chaimaa , Bouchra , Samira , fouzia et Khadidja et Assala .....

A mon binôme et mon intime Hadjer

-A toute ma famille sans exception,

-A tous ceux qui m'ont aidé durant ma vie universitaire.

-A tous mes amis de la promotion génie mécanique sans citer les noms



# Dédicace

*Je dédie ce mémoire à:*

*- Mes parents qui m'ont beaucoup aidé durant mes études, et m'ont tellement encouragé moralement et psychologiquement, ils se sont sacrifiés pour moi durant toute la période de mes études, que DIEU les protègent* MOUSSAOUI Ali et DEJALOUILLI Fatima

*À mon frère* Oussama *et à mes très chères sœurs* Aida et Fatna et Israa et Yara

*- À mes amies* Mebarka et El batoul et Chaimaa, Bouchra, Samira, fouzia, Khadidja et Assala .....

*A mon binôme et mon intime* Oumiema

*À quelqu'un qui m'a beaucoup aidé et qui a été le meilleur soutien pour moi* MESBAH Amar

*- À toute ma famille sans exception,*

*À mes grands-pères.* ba hadje ahmed et ma zajaia et ma fatna et ba belmachri

*A mes plus chères personnes* Malika et Anfel

*- À tous ceux qui m'ont aidé durant ma vie universitaire.*

*- À tous mes amis de la promotion génie minière sans citer les nom .*

## Résumé :

Le travail présenté s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts dans les machines tournantes « cas d'une machine asynchrone triphasée ».

L'utilisation de la machine asynchrone dans les entraînements électriques occupe une place très importante. Donc, le diagnostic de défauts éventuels dans ces machines est de nos jours une priorité majeure pour les industriels en particulier et pour les scientifiques en générale.

Ce travail est consacré à l'étude par simulation des cassures de barres dans la cage rotorique de la machine asynchrone triphasée en utilisant la technique d'analyse spectrale du courant statorique (MCSA). La simulation des barres cassées dans la machine asynchrone a le but de vérifier l'effet de cassure de barres rotoriques sur le comportement électrique de la machine asynchrone.

## Abstract:

The work presented is a part of the diagnosis of defects in rotating machines "in the case of a three-phase asynchronous machine".

The use of the asynchronous machine in electrical drives occupies a very important place. Therefore, the diagnosis of possible defects in these machines is nowadays represents a major priority for the manufacturers in particular and a general for the scientists.

This work is devoted to the simulation of broken rotor bars in the rotor cage of the three-phase asynchronous machine using the spectral analysis technique of the stator current (MCSA). The simulation of the broken rotor bars in the asynchronous machine has the purpose of verifying the effect of rotor bar breaking on the electrical behavior of the asynchronous machine.

## ملخص:

العمل المعروض هو جزء من تشخيص العيوب في الآلات الدوارة "في حالة آلة ثلاثية المراحل غير المتزامنة". يحتل استخدام الماكينة غير المتزامنة في المحركات الكهربائية مكاناً مهماً جداً. وبالتالي فإن تشخيص العيوب المحتملة في هذه الآلات أصبح اليوم يشكل أولوية كبرى بالنسبة للمنتجين بشكل خاص، وبالنسبة للعلماء بشكل عام. يضمن هذا العمل دراسة تكسر القضبان في القفص الدوار في الماكينة الكهربائية اللامتزامنة، وذلك باستخدام تقنية التحليل الطيفي للتيار الكهربائي في الساكن (MCSA)، محاكاة تكسر القضبان في المحرك الحثي تهدف أساساً إلى التحقق من تأثير تكسر القضبان على السلوك الكهربائي للماكينة.

### Notations et Symboles :

$f_{exc}$ : Fréquence "d'excentricité",

$g$ : Le glissement,

$p$ : Nombre de paires de pôles,

$f_s$ : Fréquence d'alimentation.

$N_r$ : Nombre d'encoches au rotor,

$f$ : Fréquence d'alimentation [Hz]

$f_x$ : Fréquence des courants rotoriques [Hz]

$F_e$ : Fréquence d'échantillonnage [Hz]

$\Delta f$ : Fréquence de résolution spectrale [Hz]

$f_{cc}$ : Fréquence " de court-circuit ",

$n_b$ : Nombre de billes,

$D_b$ : Diamètre des billes,

$D_c$ : Distance du centre des billes,

$\Omega(t) = \frac{d\theta}{dt}$ : Vitesse angulaire mécanique du rotor.

$\theta$ : L'angle de contact de la bille avec la cage

$\theta_r$ : Position angulaire du rotor.

$\theta_s$ : Position angulaire du stator.

$f_1$ : La fréquence du réseau d'alimentation du moteur à induction

$f_r$ : La fréquence de rotation de l'arbre rotorique. Le balourd entraîne l'émergence de raies aux fréquences définies par pour  $m = k=1$  et avec des amplitudes de moindre importance aux fréquences du courant pour  $m=1$  et  $k =2$

$f_b$ : Fréquence de défaut rupture de barre.

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

## Notations et Symboles

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

$i_{sq}$  : Composante du courant rotorique suivant l'axe q.

$i_{rq}$  : Composante du courant statorique suivant l'axe q.

$L_s$  : Inductance propre statorique.

$L_r$  : Inductance propre rotorique.

$L_m$  : Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

$M_r$  : Inductance mutuelle entre deux phases du rotor.

$M_s$  : Inductance mutuelle entre deux phases du stator.

$v_{sd}$  : Composante de la tension suivant l'axe d.

$v_{sq}$  : Composante de la tension suivant l'axe q.

$B$  : Induction magnétique.

$\alpha$  : Angle de contact de la bille avec les bagues.

$C_{charge}$  : Couple de charge totale.

$C_0$  : Couple résistant constant.

$\omega_c$  : Pulsation de l'oscillation et du défaut de roulement.

$C_c$  : L'amplitude de l'oscillation liée à la sévérité du défaut.

$f_c$  : Fréquence caractéristique du défaut de roulement.

$C_e$  : Le couple électromagnétique de la machine.

$C_O$  : Couple résistante de la charge (constant).

$C_{charge}$  : Le couple de la charge y compris le couple résistant et le couple modélisant le défaut.

$J$  : Le moment de l'inertie de la machine.

$\Omega_m$  : La vitesse de rotation de l'arbre de la machine.

$\omega$  : Pulsation mécanique.

## Notations et Symboles

$p$  : nombre de paires de pôles.

$K_m$  : Coefficient de bobinages globaux.

$I_m$  : Courant maximal qui circule dans un enroulement.

$R$  : rayant moyen de l'entrefer

$R_e$  : Résistance totale de l'anneau de court-circuit [ $\Omega$ ]

$R_r$  : Résistance de l'enroulement rotorique [ $\Omega$ ]

$R_s$  : Résistance de l'enroulement statorique [ $\Omega$ ]

$R_{bk}$  : Résistance de la barre [ $\Omega$ ]

$R_{bfk}$  : Résistance de la barre défailante [ $\Omega$ ]

$R_b$  : Résistance d'une barre rotorique à l'état sain [ $\Omega$ ]

$r_s$  : Résistance d'une phase statorique [ $\Omega$ ]

$d, q$  : indices pour les composantes de PARK directe et quadrature, respectivement.

$M_{sr}$  : Mutuelle cyclique entre le stator [H]

$\Psi_s$  : Flux des enroulements statoriques.

$\Psi_r$  : Flux des différentes mailles rotoriques.

$B_s$  : Induction magnétique créée dans l'entrefer par le courant statorique [T]

$e$  : Entrefer [m]

$L_p$  : Inductance d'une barre rotorique [H]

$L_e$  : Inductance totale de l'anneau de court-circuit [H]

$L_{rr}$  : Inductance cyclique rotorique [H]

$L_{sc}$  : Inductance cyclique statorique [H]

$L_{sf}$  : Inductance de fuite statorique [H]

$L_{sp}$  : Inductance propre statorique [H]

## Notations et Symboles

$l$  : Longueur active du circuit magnétique [m]

$M_{sc}$  : Mutuelle cyclique entre le stator- rotor [H]

$n$  : Entier naturel.

$P$  : Puissance [W]

$R_r$  : Résistance de l'enroulement rotorique par phase [ $\Omega$ ]

$R_e$  : Résistance totale de l'anneau de court-circuit [ $\Omega$ ]

$s, r$  : Indices stator et rotor, respectivement

$i_e$  : Courant dans l'anneau de court-circuit [A]

$i_{bk}$  : Courant dans la barre [A]

$i_{rk}$  : Courant dans la boucle [A],  $k=1, \dots, N_r$

$i_{ek}$  : Courant dans une portion d'anneau [A]

$i_{ds}, i_{qs}$  : Composantes biphasées du courant statorique direct et en quadrature [A]

$i_a, i_b, i_c$  : Courants des phases statoriques [A]

$V_{abc}$  : Les tensions statoriques [V]

$\mu_0$  : Perméabilité magnétique du vide [ $H.m^{-1}$ ]

$\Phi_{rk}$  : Flux magnétique créé par une maille rotorique [Wb]

$\Phi_s$  : Flux magnétique par pôle créé par le courant statorique [Wb]

$\Phi_{abc}$  : Les flux statoriques [Wb]

$\Delta$  : Angle électrique entre deux mailles rotoriques [rd]

$X$  : Variable d'entrée.

$X_{\alpha s}, X_{\beta s}$  : Grandeurs statoriques dans le repère  $(\alpha, \beta)$ .

$X_{ref}$  : Grandeurs de consigne ou de référence.

$X_{dr}$  : Grandeurs rotorique d'axe d (repère d).

## Notations et Symboles

$X_{qr}$  : Grandeurs rotorique d'axe q (repère q).

$X_{ds}$  : Grandeurs statorique d'axe d (repère d).

$X_{qs}$  : Grandeurs statorique d'axe q (repère q).

Liste des figures :

<b>Figures</b>	<b>Page</b>
<b>Figure 1.1</b> : Organigramme de différentes méthodes de la maintenance	<b>8</b>
<b>Figure 1.2</b> : Objectif de la maintenance	<b>16</b>
<b>Figure 1.3</b> : Evolution du taux de défaillance en fonction du temps	<b>20</b>
<b>Figure 2.1</b> : Eléments de constitution d'une MAS a cage d'écureuil	<b>23</b>
<b>Figure 2.2</b> : Vue schématique des constituants du stator	<b>24</b>
<b>Figure 2.3</b> : Vues schématiques de rotors	<b>25</b>
<b>Figure 2.4</b> : Répartition des pannes des machines de faible et moyenne puissance	<b>28</b>
<b>Figure 2.5</b> : Répartition des pannes des machines de fortes puissances	<b>29</b>
<b>Figure 2.6</b> : pourcentage des défauts 2008	<b>29</b>
<b>Figure 2.7</b> : Défaut d'une barre cassée	<b>31</b>
<b>Figure 2.8</b> : Rupture d'une et deux portions adjacentes d'anneau de court-circuit.	<b>32</b>
<b>Figure 2.9</b> : modélisations schématiques de l'excentricité statique et dynamique	<b>33</b>
<b>Figure 2.10</b> : Court-circuit entre spires	<b>36</b>
<b>Figure 2.11</b> : Dimension du roulement à billes	<b>38</b>
<b>Figure 2.12</b> : Désalignement des arbres	<b>40</b>
<b>Figure 2.13</b> : Image de désalignement parallèle	<b>41</b>
<b>Figure 2.14</b> : Image de désalignement angulaire	<b>41</b>
<b>Figure 2.15</b> : Différents types d'engrenage	<b>42</b>
<b>Figure 2.16</b> : Défauts réels d'engrenage localisé	<b>43</b>
<b>Figure 3.1</b> : Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée	<b>51</b>
<b>Figure 3.2</b> : Représentation spatiale de la transformation triphasée / biphasée (Park et Concordia)	<b>55</b>
<b>Figure 3.3</b> : Schéma bloc de simulation de la MAS	<b>63</b>
<b>Figure 3.4</b> : Alimentation de la machine asynchrone	<b>64</b>
<b>Figure 3.5</b> : La transformation de PARK	<b>64</b>
<b>Figure 3.6</b> : La vitesse mécanique (rad/s)	<b>65</b>
<b>Figure 3.7</b> : Les courants statoriques $I_{abc}$ (A)	<b>65</b>
<b>Figure 3.8</b> : Couple électromagnétique (Nm)	<b>65</b>
<b>Figure 3.9</b> : Tension triphasée $V_{abc}$ alimentant la MAS en (V)	<b>66</b>
<b>Figure 3.10</b> : Tension triphasée $V_{dq0}$ alimentant la MAS en (V)	<b>66</b>
<b>Figure 3.11</b> : Courants $I_{dsdrqsqr}$ (A)	<b>66</b>
<b>Figure 3.12</b> : Tension $V_{dq}$ (A)	<b>67</b>
<b>Figure 3.13</b> : Flux magnétique $F_{ds}$ (web)	<b>67</b>
<b>Figure 3.14</b> : Flux magnétique $F_{dr}$ (web)	<b>67</b>
<b>Figure 3.15</b> : La vitesse mécanique (rad/s)	<b>68</b>
<b>Figure 3.16</b> : Les courants statoriques $I_{abc}$ (A)	<b>68</b>
<b>Figure 3.17</b> : Couple électromagnétique (Nm)	<b>68</b>
<b>Figure 3.18</b> : Courants $I_{dsdrqsqr}$ (A)	<b>69</b>
<b>Figure 3.19</b> : Flux magnétique $F_{ds}$ (web)	<b>69</b>
<b>Figure 3.20</b> : Flux magnétique $F_{dr}$ (web)	<b>69</b>
<b>Figure 4.1</b> : Induction magnétique produite par une mille du rotor	<b>76</b>
<b>Figure 4.2</b> : Structure de la cage du rotor	<b>77</b>
<b>Figure 4.3</b> : Flux mutuel – phase statorique – boucle rotorique	<b>79</b>
<b>Figure 4.4</b> : Schéma électrique équivalent des mailles rotoriques	<b>81</b>
<b>Figure 4.5</b> : la Vitesse mécanique (rad/s)	<b>92</b>
<b>Figure 4.6</b> : Couple électromagnétique (N.m)	<b>92</b>
<b>Figure 4.7</b> : Courants $I_{dsqsdrqr}$ (A)	<b>92</b>

## Liste des figures

<b>Figure 4.8:</b> Courant $I_{ds}$ (A)	<b>93</b>
<b>Figure 4.9:</b> Courant $I_{dr}$ (A)	<b>93</b>
<b>Figure 4.10:</b> FFT du courant $I_{dr}$ (A)	<b>93</b>
<b>Figure 4.11:</b> FFT du courant $I_{qs}$ (A)	<b>94</b>
<b>Figure 4.12:</b> La vitesse mécanique (rad/s)	<b>94</b>
<b>Figure 4.13:</b> Couple électromagnétique (N.m)	<b>94</b>
<b>Figure 4.14:</b> Courants $I_{ds}$ et $I_{dr}$ (A)	<b>95</b>
<b>Figure 4.15:</b> Courant $I_{ds}$ (A)	<b>95</b>
<b>Figure 4.16:</b> Courant $I_{dr}$ (A)	<b>95</b>
<b>Figure 4.17:</b> FFT du courant $I_{dr}$ (A)	<b>96</b>
<b>Figure 4.18:</b> FFT du courant $I_{qs}$ (A)	<b>96</b>
<b>Figure 4.19:</b> Tension triphasée ( $V_{abc}$ avec $V_c=0$ )	<b>96</b>
<b>Figure 4.20:</b> La vitesse mécanique (rad/s)	<b>97</b>
<b>Figure 4.21:</b> Couple électromagnétique (N.m)	<b>97</b>
<b>Figure 4.22:</b> Courant $I_{ds}$ (A)	<b>97</b>
<b>Figure 4.23:</b> FFT du courant $I_{ds}$ (A)	<b>98</b>

**LISTE DES TABLEAUX:**

<b>Tableau I .1</b> : Niveaux de maintenance	12
<b>Tableau I . 2</b> : Prise de décisions pour les stratégies de maintenance	17
<b>Tableau II.1</b> : Défauts des machines électriques selon leurs origines	27

# Sommaire

## Sommaire :

Remerciements

Dédicaces

Résumé

Notations et symboles

Introduction générale.

### Chapitre I : Maintenance et diagnostic.

I .1. Introduction.....	5
I .2. Terminologie relative à la maintenance et le diagnostic.....	5
I .2.1. La maintenance.....	5
I .2.1.1. Définition de la maintenance (norme NF EN 13306).....	5
I .2.2. Maintenabilité.....	5
I .2.3. La maintenance et la vie des matériels.....	6
I .3. Les différentes formes de maintenance.....	6
I .3.1. Les concepts.....	6
I .3.2. Les méthodes de maintenance.....	7
I .3.2.1 Maintenance corrective.....	9
I .3.2.2. Maintenance préventive.....	9
I .3.2.3. Maintenance préventive systématique.....	9
I .3.2.4. Maintenance préventive conditionnelle.....	10
I .4. Niveaux de maintenance.....	10
I .4.1. 1 <sup>er</sup> niveau de maintenance.....	11
I .4.2. 2 <sup>ème</sup> niveau de maintenance.....	11
I .4.3. 3 <sup>ème</sup> niveau de maintenance.....	11
I .4.4. 4 <sup>ème</sup> niveau de maintenance.....	11
I .4.5. 5 <sup>ème</sup> niveau de maintenance.....	11

I .5. Les opérations de maintenance.....	13
I .5.1. Les opérations de maintenance corrective.....	13
I .5.1.1. Le dépannage.....	13
I .5.1.2. La réparation.....	13
I .5.2. Les opérations de maintenance préventive.....	13
I .5.2.1. Entretien.....	14
I .5.2.2. Surveillance.....	14
I 5.2.3. Révision.....	14
I .5.2.4. Préservation.....	15
I .6. L'importance de la maintenance.....	15
I .7. Objectif de la maintenance.....	15
I .8. Les stratégies et les décisions associées.....	16
I .9. Diagnostic et surveillance.....	17
I .9.1. Diagnostic.....	17
I .9.2. Défaut (panne, défaillance).....	18
I .9.3. Disponibilité.....	18
I .9.4. Sécurité.....	18
I .9.5. Qualité.....	18
I .9.6. Fiabilité.....	19
I .9.6.1 Définition.....	19
I .9.6.2. Types de Fiabilité.....	19
I .9.7. Défaillance.....	19
I .9.7.1. Définition.....	19
I .9.7.2. Classification de la défaillance.....	19
I .10. Conclusion.....	21

**Chapitre II : Diagnostic industriel des machines tournantes**

II .1. Introduction.....	23
II .2. Constitution de la machine asynchrone.....	23
II .2.1. Construction de la machine asynchrone.....	23
II .2.1.1. Stator.....	24
II .2.1.2. Rotor.....	24
II .2.1.3. Organes mécaniques.....	25
II .3. Définitions de quelques termes liés au diagnostic.....	26
II .4. Les causes des défauts.....	27
II .5. Étude statistique des différents défauts de la machine asynchrone.....	27
II .5.1. Défaillances d'ordre électrique.....	30
II .5.1.1. Défaillances des circuits électriques rotoriques.....	30
II .5.1.1.1. Ruptures de barres.....	30
II .5.1.1.2. Ruptures des anneaux.....	31
II .5.1.1.3. Excentricité statique et dynamique.....	32
II .5.1.2. Défaillances des circuits électriques statorique.....	34
II .5.1.2.1. Défauts d'isolant dans un enroulement.....	35
II .5.1.2.2. Court-circuit entre spires.....	35
II .5.1.2.3. Court-circuit entre phases.....	36
II .5.2. Défauts de circuit magnétique.....	37
II .5.2.1. Défaillances d'ordre mécanique.....	37
II .5.2.2. Défaillances des roulements.....	37
II .5.2.3. Défaillances des flasques.....	39
II .5.2.4. Défaillances de l'arbre mécanique.....	39
II .5.2.5. Défauts de déséquilibre massique ou « Balourd ».....	40
II .5.2.6. Défaut de désalignement.....	40

II .5.2.7 Défauts dans les engrenages.....	42
II .6. Les Méthodes de diagnostic. ....	43
II .6.1. Diagnostic par les méthodes internes.....	44
II .6.2. Diagnostic par les méthodes externes.....	45
II .6.3. Diagnostic par les Méthodes inductives.....	46
II .6.4. Diagnostic par les Méthodes déductives.....	46
II. 7. Modèle de la machine asynchrone à cage.....	46
II. 7.1. Approche analytique.....	46
II.7.2 Approche numérique.....	47
II .8. Conclusions.....	47
<b>Chapitre III : Modélisation et simulation de la MAS à l'état sain</b>	
III.1. Introduction.....	49
III.2. Les Hypothèses.....	50
III.3. Les équations générales de la machine asynchrone sur 3 axes.....	51
III.3.1. Les équations électriques de la machine asynchrone sur axes.....	51
III.3.1.1. Les équations électriques.....	51
III.3.1.1.1. Les relations des tensions. ....	51
III. 3.1.1.2. Relations entre flux et courants.....	53
III.4. Les équations générales de la machine asynchrone sur 2 axes.....	54
III.4.1. La transformation de Park appliquée aux équations électriques.....	55
III.4.2. Les équations mécaniques de la machine asynchrone.....	60
III.5 Outils de simulation MATLAB/SIMULINK.....	61
III.5.1 Matlab.....	61
III.5.2. Simulink.....	62
III.6.. Elaboration du modèle de la machine asynchrone à l'état sain sous l'environnement Matlab/SIMULINK .....	63
III.6.1. Simulation à vide.....	65
III.6.2. Simulation en charge.....	68
III.6.3. Interprétation des résultats.....	70

III.7 Conclusion.....	70
-----------------------	----

## **CHAPITRE IV: Modélisation et simulation de la MAS dédiée au diagnostic des défauts**

IV.1.Introduction.....	72
IV.2 Modèle multi enroulements de la machine asynchrone.....	72
IV.2.1 Calcul des inductances.....	73
IV.2.1.1 Partie Statorique.....	73
IV.2.1.2 Partie rotorique.....	75
IV.2.1.3 Mutuelle inductance entre stator et rotor.....	78
IV.3 Mise en équations.....	80
IV.3.1Equations statoriques.....	80
IV.3.2Equations rotoriques.....	81
IV.3.3 Equation d'état de la machine.....	83
IV.3.4Transformation de Park.....	84
IV.3.5 Equation mécanique.....	87
IV.4 Modèle de taille réduit.....	88
IV.5. Simulation du modèle de la machine asynchrone.....	91
IV.5.1. Résultats de simulation.....	91
IV.5.2. Interprétation des résultats.....	98
IV.6 Conclusion.....	99
Conclusion générale .....	101
Bibliographie	

# **Introduction générale**

### Introduction générale :

Les machines électriques tournantes occupent une place prépondérante dans tous les secteurs industriels. Les machines asynchrones triphasées à cage d'écurueil sont les plus fréquemment utilisées grâce à leur robustesse, leur simplicité de construction et leur coût bas. Néanmoins, celles-ci subissent au cours de leur durée de vie un certain nombre de sollicitations externes ou internes qui peuvent les rendre défaillantes. Les contraintes industrielles en fiabilité, maintenabilité, disponibilité et sécurité des équipements sont par ailleurs très fortes. C'est pourquoi le monde industriel est fortement intéressé par un ensemble de techniques permettant de déterminer l'état de santé de ces machines.

Le travail présenté dans ce mémoire est consacré à la détection des défauts dans les machines tournantes « cas d'une machine asynchrone triphasée », exactement sur le diagnostic du défaut de cassure de barres dans la machine asynchrone à cage d'écurueil en utilisant la méthode d'analyse spectrale du courant statorique (MCSA-FFT). Cette technique est connue sous l'abréviation Anglaise MCSA (Motor Current Signature Analysis). Par ailleurs, les défauts ont un effet cumulatif, la rupture d'une barre se traduit par l'augmentation de la résistance équivalente de l'enroulement rotorique. Le courant qui traversait la barre cassée se répartit sur les barres adjacentes. Ces barres à leurs tours seront surchargées, ce qui conduit à leurs futures ruptures jusqu'à l'arrêt de la machine.

Dans ce contexte, le mémoire comporte quatre chapitres qui sont organisés comme suit :

Le premier chapitre, présente les différentes méthodes de maintenance, et les termes liés au diagnostic des défauts.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des différents défauts des machines électriques, et les différentes méthodes de diagnostic des défauts appliqué à la machine asynchrone.

Pour le troisième chapitre nous présentons la modélisation mathématique de notre système et l'implanté ensuite sous l'environnement MATLAB/ SIMULINK qui nous a permis de construire une référence pour la surveillance et le diagnostic de la machine asynchrone.

Sur le quatrième chapitre, une analyse du courant statorique par l'analyse spectrale au lieu de l'analyse temporelle car une faible variation d'une grandeur de la machine entre l'état sain et l'état défectueux ne donne pas des bons indices pour détecter le type du défaut

## **Introduction générale**

Nous terminerons par une conclusion générale sur l'ensemble de cette étude et la proposition des perspectives relatives à ce travail.

# **Chapitre I : Maintenance et diagnostic**

### **I .1. Introduction :**

Ce chapitre apporte une description de la fonction maintenance, ses différentes formes et ses différents niveaux qui nous permettra une compréhension exhaustive de ce concept. L'objectif de notre étude consiste à la définition d'une forme de maintenance traitant les aspects de surveillance et le diagnostic des machines asynchrones. Actuellement, les impératifs de fiabilité et de productivité des installations nécessitent l'intégration d'un système de détection et de diagnostic des défaillances pour éviter et prévenir les pannes et les arrêts intempestifs. L'entreprise est condamnée à s'adapter aux progrès technologiques et à se doter de nouvelles technologies pour qu'elle reste compétitive sur le marché. L'acquisition de ces technologies nécessite de nouveaux matériels et des investissements importants dont l'amortissement doit être assuré. Tout arrêt de production dû à une défaillance imprévue du matériel devient donc trop onéreux pour l'entreprise. L'entreprise doit donc adopter une stratégie de maintenance ayant pour objectif le maintien du matériel dans un état assurant la production voulue au coût optimal.[1]

### **I .2. Terminologie relative à la maintenance et le diagnostic :**

#### **I .2.1. La maintenance :**

##### **I .2.1.1. Définition de la maintenance (norme NF EN 13306) :**

La maintenance est l'ensemble des actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise.

Bien maintenir, c'est assurer l'ensemble de ces opérations au coût optimal.

#### **I .2.2. Maintenabilité :**

La maintenabilité est une caractéristique précisant la facilité et la rapidité avec lesquelles un système peut être remis en un état de fonctionnement total avec une fiabilité correspondant à son âge.

La rapidité de remise en état d'un système peut être mesurée par la durée active du dépannage. Par active, on entend qu'on ne comptera pas les temps morts non imputables à la conception du système, tels que les délais de réponse des dépanneurs, les durées d'attente des pièces de rechange

ou les temps passés à la rédaction des pièces administratives, car ces temps dépendent de l'organisation et de l'efficacité du service de maintenance et non de la conception du système.

### I .2.3. La maintenance et la vie des matériels :

Les actions de maintenance commencent bien avant le jour de la première défaillance d'un matériel. En fait, elles commencent dès la conception du matériel pour permettre :

- ✓ De faciliter les interventions de maintenance (améliorer la maintenabilité).
- ✓ D'avoir une bonne fiabilité (aptitude à accomplir une fonction requise dans des conditions données pendant un temps donné) et assurer la disponibilité du matériel (aptitude à être opérationnel).[1]

### I .3. Les différentes formes de maintenance :

#### I .3.1. Les concepts :

L'analyse des différentes formes de maintenance repose sur 4 concepts :

- ✓ **Les évènements qui sont à l'origine de l'action** : Les événements qui sont à l'origine de l'action : référence à un échancier, la subordination à un type d'événement (auto-diagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure, etc..), l'apparition d'une défaillance.

- ✓ **Les méthodes de maintenance qui seront respectivement associées** : maintenance préventive systématique, maintenance préventive conditionnelle, maintenance corrective.

- ✓ **Les opérations de maintenance proprement dites** : inspection, contrôle, dépannage, réparation, etc.

- ✓ **Les activités connexes** : maintenance d'amélioration, rénovation reconstruction, modernisation, travaux neufs sécurité, etc.

Cette réflexion terminologique et conceptuelle représente une base de référence pour :

- ✓ L'utilisation d'un langage commun pour toutes les parties (conception, production, prestataires de service, etc....)
- ✓ La mise en place de systèmes informatisés de gestion de la maintenance.[1]

### I .3.2. Les méthodes de maintenance :

Le choix entre les méthodes de maintenance s'effectue dans le cadre de la politique de la maintenance et doit s'opérer en accord avec la direction de l'entreprise.

Pour choisir, il faut être informé des objectifs de la direction, des décisions politiques de maintenance, mais il faut aussi connaître le fonctionnement et les caractéristiques des matériels ; le comportement du matériel en exploitation ; les conditions d'application de chaque méthode ; les coûts de maintenance et les coûts de perte de production.

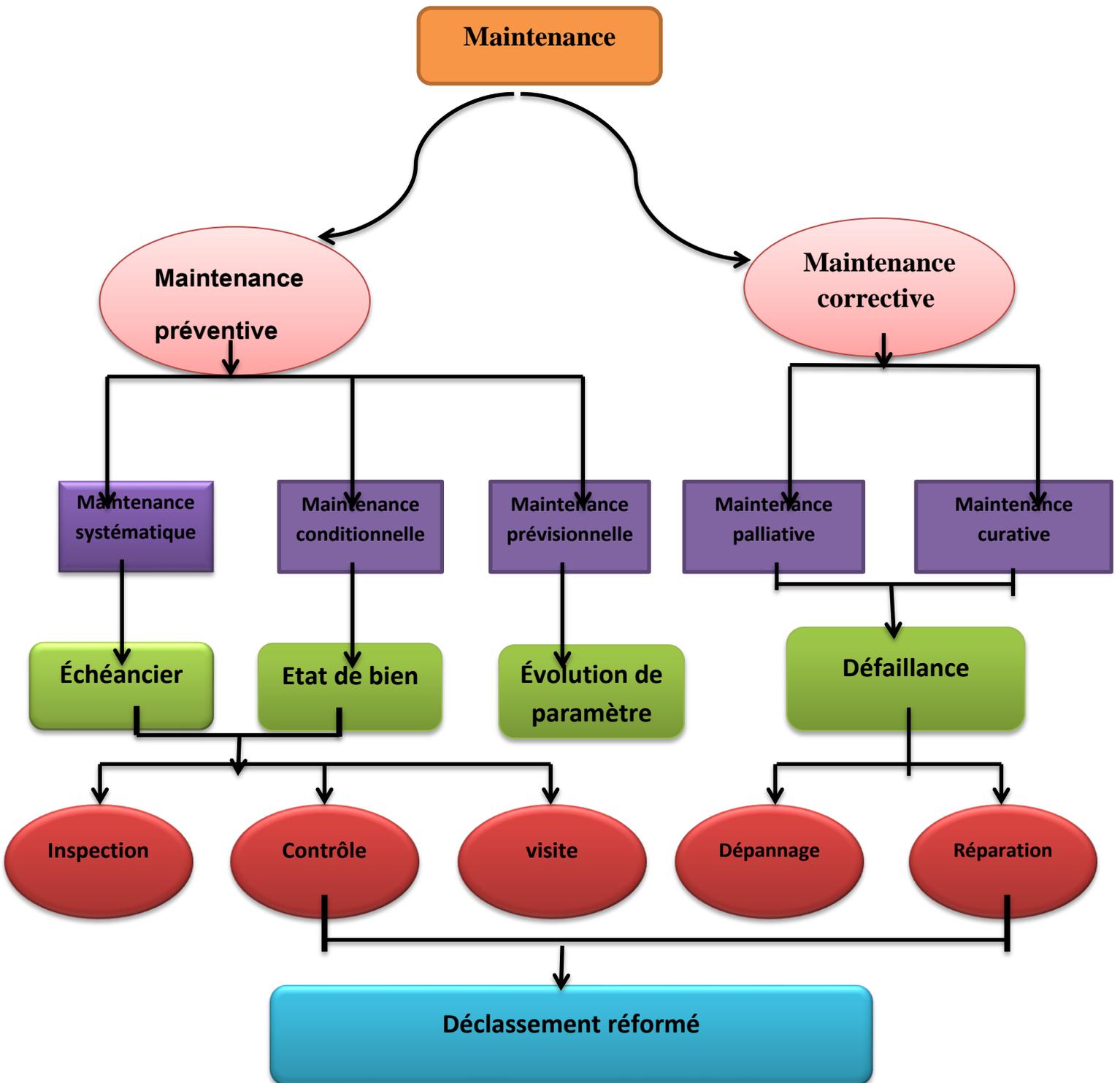


Figure 1.1 : Organigramme de différentes méthodes de la maintenance [5].

### I .3.2.1 Maintenance corrective :

C'est une maintenance après la défaillance. La maintenance corrective a pour objet de redonner au matériel des qualités perdues nécessaires à son utilisation.

Les défauts, pannes ou avaries diverses exigeant une maintenance corrective entraîne une indisponibilité immédiate ou à très brève échéance des matériels affectés ou / et une dépréciation en quantité ou / et en qualité des services rendus. [2]

### I .3.2.2. Maintenance préventive :

La maintenance préventive effectuée selon des critères prédéterminés, dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation service rendu.

Elle doit permettre d'éviter des défaillances des matériels en cours d'utilisation.

L'analyse des coûts doit mettre en évidence un gain par rapport aux défaillances qu'elle permet d'éviter.

Le but de la maintenance préventive est de :

- Augmenter la durée de vie des matériels ;
- Diminuer la probabilité des défaillances en service ;
- Diminuer le temps d'arrêt en cas de révision ou de panne ;
- Prévenir et aussi prévoir les interventions de la maintenance corrective coûteuse ;
- Permettre de décider la maintenance corrective dans de bonnes conditions ;
- Éviter les consommations anormales d'énergie, de lubrifiant, etc. ;
- Diminuer le budget de la maintenance ;
- Supprimer les causes d'accidents graves. [2]

### I .3.2.3. Maintenance préventive systématique :

La maintenance préventive effectuée selon un échancier établi selon le temps ou le nombre d'unités d'usage.

Cette périodicité d'intervention est déterminée à partir de la mise en service ou après une révision partielle ou complète.

Cette méthode nécessite de connaître le comportement du matériel ; les usures ; les modes de dégradations ; le temps moyen de bon fonctionnement entre deux avaries (MTBF).

La maintenance systématique peut être appliquée dans les cas suivants :

- Équipements soumis à la législation en vigueur (sécurité réglementée) ;

- Équipements dont la panne risque de provoquer des accidents graves ;
- Équipements ayant un coût de défaillance élevé ;
- Équipements dont les dépenses de fonctionnement deviennent anormalement élevées au cours de leur temps de service. [2]

### I .3.2.4. Maintenance préventive conditionnelle :

La maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé, (Autodiagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure, ...), révélateur de l'état de dégradation du bien. La maintenance conditionnelle est donc une maintenance dépendant de l'expérience et faisant intervenir des informations recueillies en temps réel.

Cette surveillance de la dégradation permet de fixer un seuil d'alarme avant un seuil d'admissibilité. Le principal intérêt d'une telle stratégie est de pouvoir utiliser les entités au maximum de leur possibilité mais aussi de diminuer le nombre des opérations de maintenance corrective.

La maintenance préventive conditionnelle se caractérise par la mise en évidence des points faibles. Suivant les cas, il est souhaitable de les mettre sous surveillance et à partir de là, nous pouvons décider d'une intervention lorsqu'un certain seuil est atteint, mais les contrôles demeurent systématiques et font partie des moyens de contrôle non destructifs.

La maintenance préventive conditionnelle se fait par des mesures pertinentes sur le matériel en fonctionnement.

Ils peuvent porter par exemple sur :

- Le niveau et la qualité d'une huile ;
- Les températures et les pressions ;
- La tension et l'intensité du matériel électrique ;
- Les vibrations et les jeux mécaniques.

De tous les paramètres énumérés, l'analyse vibratoire est de loin la plus riche quant aux informations recueillies. Sa compréhension autorise la prise à bon en pleine connaissance de cause des décisions qui sont à la base d'une maintenance préventive conditionnelle.

La surveillance peut être soit périodique, soit continue.[2]

### I .4. Niveaux de maintenance :

Les opérations à réaliser sont classées, selon leur complexité, en cinq niveaux. Les niveaux prise en considération sont ceux de la norme NF X-60-010. [3]

### **I .4.1. 1<sup>er</sup> niveau de maintenance :**

Actions simples nécessaires à l'exploitation et réalisées sur des éléments facilement accessibles en toute sécurité à l'aide d'équipement de soutien intégré au bien. Ce type d'opération peut être effectué par l'utilisateur du bien avec, le cas échéant, les équipements de soutien intégrés au bien et à l'aide des instructions d'utilisation. [3]

### **I .4.2. 2<sup>ème</sup> niveau de maintenance :**

Actions qui nécessitent des procédures simples et des équipements de soutien (intégrés au bien ou extérieurs) d'utilisation ou de mise en œuvre simple. Ce type d'actions de maintenance est effectué par un personnel qualifié avec les procédures détaillées et les équipements de soutien définis dans les instructions de maintenance. Un personnel est qualifié lorsqu'il a reçu une formation lui permettant de travailler en sécurité sur un bien présentant certains risques potentiels, et est reconnu apte pour l'exécution des travaux qui lui sont confiés, compte tenu de ses connaissances et de ses aptitudes [3]

### **I .4.3. 3<sup>ème</sup> niveau de maintenance :**

Opérations qui nécessitent des procédures complexes et des équipements de soutien portatifs, par un technicien qualifié, à l'aide de procédures détaillées et des équipements de soutien prévus dans les instructions de maintenance d'utilisation ou de mise en œuvre complexes. Ce type d'opération de maintenance peut être effectué [3]

### **I .4.4. 4<sup>ème</sup> niveau de maintenance :**

Opérations dont les procédures impliquent la maîtrise d'une technique ou technologie particulière et la mise en œuvre d'équipements de soutien spécialisés. Ce type d'opération de maintenance est effectué par un technicien ou une équipe spécialisée à l'aide de toutes instructions de maintenance générales ou particulières [3]

### **I .4.5. 5<sup>ème</sup> niveau de maintenance :**

Opérations dont les procédures impliquent un savoir-faire, faisant appel à des techniques ou technologies particulières, des processus et des équipements de soutien industriels, Par définition, ce type d'opérations de maintenance (rénovation, reconstruction, etc.) est effectué par le constructeur ou par un service ou société spécialisée avec des équipements de soutien définis par le constructeur et donc proches de la fabrication du bien concerné. [5]

Ces niveaux de maintenance font référence à la complexité des tâches à effectuer et aux ressources humaines et matérielles nécessaires à la réalisation de chacune des tâches. Le système de maintenance ainsi situé permet de préciser, de limiter et de dégager les responsabilités et les attentes

## Chapitre I : Maintenance et diagnostic

envers ce système. Cependant, ceci constitue une condition nécessaire mais malheureusement non suffisante pour réussir l'implantation d'un système de maintenance dans une entreprise. [6]

Niveaux	Type des travaux	Personne d'intervention	Moyens
1 <sup>er</sup> niveau	Réglages simples prévus par le constructeur au moyen d'organes accessibles sans aucun démontage d'équipement ou échange d'éléments accessibles en toute sécurité.	Pilote ou conducteur du système	Outillage léger défini dans les instructions d'utilisation.
2 <sup>ème</sup> niveau	Dépannage par échange standard d'éléments prévus à cet effet, ou d'opérations mineures de maintenance préventive (rondes)	Technicien habilité	Outillage léger défini dans les instructions d'utilisation et pièces de rechange disponibles
3 <sup>ème</sup> Niveau	Identification et diagnostic de pannes, réparation par échange de composants fonctionnels, réparations mécaniques mineures.	Technicien spécialisé	Outillage prévu et appareils de mesure, banc d'essai, contrôle...
4 <sup>ème</sup> niveau	Travaux importants de maintenance corrective ou préventive	Equipe encadrée par un technicien spécialisé	Outillage général et spécialisé, matériels d'essais, de contrôle
5 <sup>ème</sup> niveau	Travaux de rénovation, de reconstruction ou réparation importantes confiées à un atelier central	Equipe complète et Polyvalente	Moyens proches de la fabrication

**Tableau 01 : Niveaux de maintenance. [7]**

## **I .5. Les opérations de maintenance :**

### **I .5.1. Les opérations de maintenance corrective :**

#### **I .5.1.1. Le dépannage :**

Action sur un matériel en panne, en vue de le remettre en état de fonctionnement. Compte tenu de l'objectif, une action de dépannage peut s'accommoder des résultats provisoires avec des conditions de réalisation hors règles de procédures, de coûts et de qualité, et dans ce cas, elle sera suivie de la réparation. Le dépannage n'a pas de conditions d'applications particulières. La connaissance du comportement du matériel et des modes de dégradation est à la base d'un bon diagnostic et permettent souvent de gagner du temps.

Souvent, les opérations de dépannage sont de courtes durées mais peuvent être nombreuses.

De ce fait, les services de maintenance soucieux d'abaisser leurs dépenses tentent d'organiser les actions de dépannage. Ainsi, le dépannage peut être appliqué par exemple sur des équipements fonctionnant en continu dont les impératifs de production interdisent toute visite ou intervention à l'arrêt. [8]

#### **I .5.1.2. La réparation :**

Intervention définitive et limitée de maintenance corrective après une panne ou une défaillance. L'application de la réparation peut être décidée soit immédiatement à la suite d'un incident ou d'une défaillance soit après une visite de maintenance préventive conditionnelle ou systématique.

[8]

### **I .5.2. Les opérations de maintenance préventive :**

Ces opérations peuvent être classées en quatre groupes d'actions :

- ✓ Le premier groupe concerne l'entretien ; il comprend les opérations suivantes : le nettoyage, la dépollution et le retraitement de surface.
- ✓ Le deuxième groupe concerne la surveillance ; il comprend l'opération suivante : L'inspection le contrôle et la visite.
- ✓ Le troisième groupe concerne la révision ; il comprend l'opération suivante : la révision partielle et la révision générale.
- ✓ Le quatrième groupe concerne la préservation ; il comprend l'opération suivante : la mise en conservation, la mise en survie et la mise en service. [8]

### I .5.2.1. Entretien :

L'entretien comprend les opérations courantes et régulières de la maintenance préventive telle que le nettoyage, la dépollution et le retraitement de surface qu'ils soient externes ou internes. Par exemple, on peut signaler pour le nettoyage extérieur l'existence de divers types de nettoyage en fonction de la structure et de l'état d'un bien, des produits utilisés et de la méthode employée (les solutions alcalines aqueuses, les solvants organiques, le soufflage aux abrasifs, ...). Il faut aussi préciser que le retraitement de surface inclut les opérations suivantes de la lubrification et de graissage. [8]

### I .5.2.2. Surveillance :

Les termes définis ci-après sont représentatifs des opérations nécessaires pour maîtriser l'évolution de l'état réel du bien, effectuées de manière continue ou à des intervalles prédéterminés ou non, calculés sur le temps ou le nombre d'unités d'usage. [8]

- ❖ **Inspection** : c'est une activité de surveillance s'exerçant dans le cadre d'une mission définie. Elle n'est pas obligatoirement limitée à la comparaison avec des données préétablies. Cette activité peut s'exercer notamment au moyen de ronde.
- ❖ **Contrôle** : c'est une vérification de la conformité à des données préétablies, suivie d'un jugement. Le contrôle peut :
  - Comporter une activité d'information,
  - Inclure une décision : acceptation, rejet, ajournement,
  - Déboucher sur des actions correctives.
- ❖ **Visite** : c'est une opération consistant en un examen détaillé et prédéterminé de tout (visite générale) ou partie (visite limitée) des différents éléments du bien et pouvant impliquer des opérations de maintenance du 1er niveau. [8]

### I .5.2.3. Révision :

C'est l'ensemble des actions d'examen, de contrôles et des interventions effectuées en vue d'assurer le bien contre toute défaillance majeure ou critique pendant un temps ou pour un nombre d'unités d'usage donné. Il est d'usage de distinguer suivant l'étendue de cette opération les révisions partielles des révisions générales. Dans les deux cas, cette opération implique la dépose de différents sous-ensembles. Ainsi le terme de révision ne doit en aucun cas être confondu avec les termes visites, contrôles, inspections, etc. Les deux types d'opération définis (révision partielle ou générale) relèvent du 4<sup>ème</sup> niveau de la maintenance[2]

### I .5.2.4. Préservation :

Elle comprend les opérations suivantes :

- ✓ Mise en conservation : c'est l'ensemble des opérations devant être effectuées pour assurer l'intégrité du bien durant les périodes de non-utilisation.
- ✓ Mise en survie : c'est l'ensemble des opérations devant être effectuées pour assurer l'intégrité du bien durant les périodes de manifestations de phénomènes d'agressivité de l'environnement à un niveau supérieur à celui défini par l'usage de référence.
- ✓ Mise en service : c'est l'ensemble des opérations nécessaires, après l'installation du bien à sa réception, dont la vérification de la conformité aux performances contractuelles. [2]

### I .6. L'importance de la maintenance :

La maintenance est importante pour l'industrie, ce qui paraît clair lors de l'occurrence des pannes provoquant des arrêts non planifiés. [9] Par conséquent, toute interruption au cours du fonctionnement cause, comme entre autres :

- Augmentation du coût de productions ;
- Diminution de la marge du profit ;
- Rupture du stock ;
- Retard des livraisons ;
- Ajout des heures supplémentaires ;
- Absence des sécurités des opérateurs.

Donc, si on planifie et on prévoit des entretiens planifiés avant l'occurrence des pannes, on pourra surmonter ces conséquences.

Pour ce faire, la partie suivante comprend des stratégies de maintenances. [4]

### I .7. Objectif de la maintenance :

Les objectifs de la maintenance, schématisés dans la figure 1.1 sont nombreux :

- Assurer la qualité et la quantité des produits fabriqués, tout en respectant les délais ;
- Optimiser les actions de maintenance (exemple : réduire la fréquence des pannes) ;
- Contribuer à la création et au maintien de la sécurité au travail ;
- Consolider la compétitivité de l'entreprise (exemple : améliorer la productivité). [10]

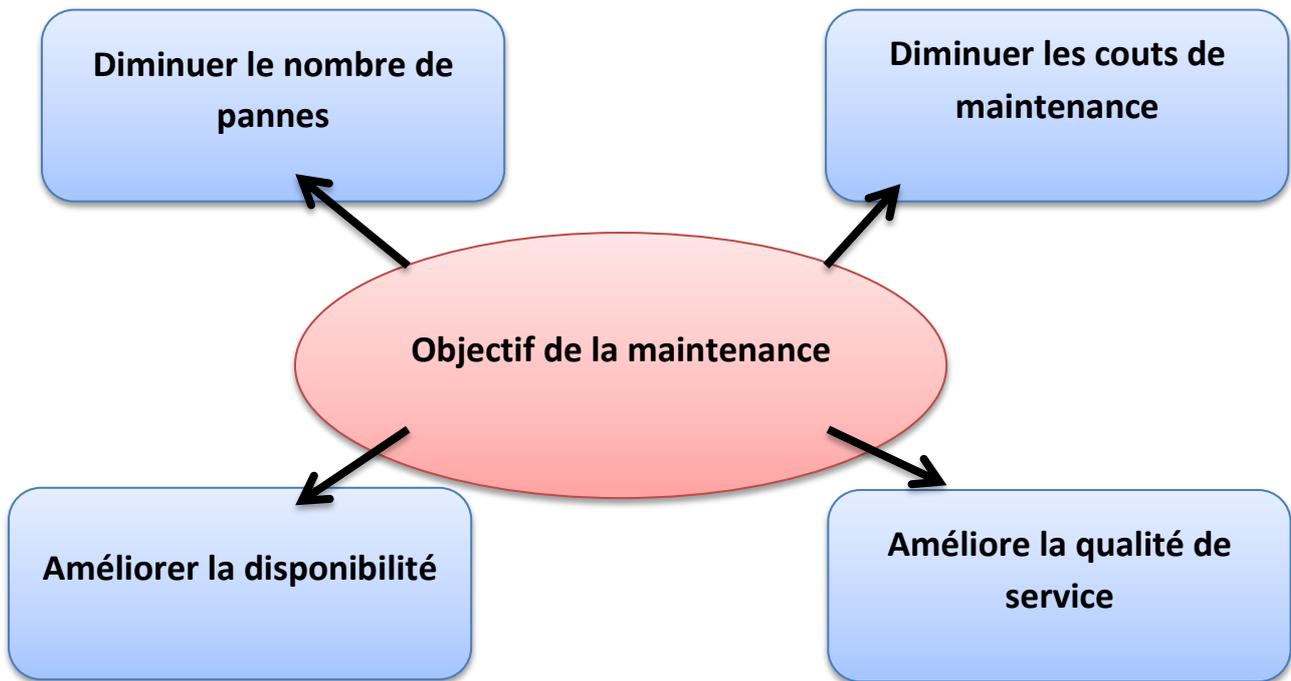


Figure 1.2 : Objectif de la maintenance [4]

### I .8. Les stratégies et les décisions associées :

Les stratégies de maintenance permettent de définir des règles de décision et de déterminer le contexte informationnel qui détermine un espace de décision de maintenance. [11]

Les questions POURQUOI, QUAND, QUOI et OÙ sont les questions essentielles auxquelles une décision de maintenance doit répondre.

	<b>POURQUOI ?</b>	<b>QUAND ?</b>	<b>OÙ ?</b>	<b>QUOI ?</b>
<b>Maintenance corrective</b>	Corriger une défaillance	Après le constat de la défaillance	Composant défaillant (résultat du diagnostic)	Dépannage ou Réparation
<b>Maintenance préventive</b>	Eviter une défaillance	Avant la défaillance qui est déterminée par le franchissement (présent ou	Composant associé à un indicateur ou résultat d'un diagnostic	Défini par le Plan de maintenance ou par l'expert

		futur) d'un seuil représentatif de la défaillance par un indicateur		
<b>Maintenance systématique</b>	Eviter une défaillance	Un indicateur d'usage	Composant associé	Défini par le plan de maintenance
<b>Maintenance Conditionnelle</b>	Eviter une défaillance en optimisant le risque d'action superflue	Un indicateur surveillé atteint un seuil représentatif d'un niveau de dégradation	Composant associé à l'indicateur surveillé ou résultat d'un diagnostic	Défini par le plan de maintenance
<b>Maintenance prévisionnelle</b>	Eviter une défaillance en agissant au meilleur moment vis-à-vis de la dégradation et des performances du composant ou système	Un indicateur prédit de dégradation atteint un seuil	Composant associé à l'indicateur prédit ou résultat d'un diagnostic	Issue d'un processus d'aide à la décision rationalisant les performances du composant ou système

**Tableau 02 : Prise de décisions pour les stratégies de maintenance [4]**

## **I .9. Diagnostic et surveillance :**

### **I .9.1. Diagnostic :**

Le diagnostic est l'ensemble d'actions visant à évaluer l'état d'un procédé à partir de la connaissance de son fonctionnement. A partir de l'observation du procédé on détermine, par

comparaison avec les divers états de fonctionnement connus, le degré de défaillance du système, l'origine de ces défaillances et leurs causes.

Donc le diagnostic consiste à détecter, à localiser et éventuellement à identifier la défaillance et/ou les défauts qui affectent un système. Il permet d'améliorer la qualité et de réduire les coûts en intervenant au cours de certaine phase du cycle de vie d'un produit [12].

### **I .9.2. Défaut (panne, défaillance) :**

Évènement engendrant une modification du fonctionnement du procédé. L'état du système ne correspond plus à un fonctionnement normal. Le système n'est plus apte à assurer totalement sa fonction. [1]

### **I .9.3. Disponibilité :**

Faculté d'un matériel ou d'un système à pouvoir fonctionner chaque fois que cela est nécessaire, chaque fois que l'on le sollicite, c'est-à-dire que l'on assure une fiabilité totale pendant les phases de fonctionnement. La disponibilité nécessite des opérations de maintenance préventive afin de prévenir tout vieillissement ou défaillance. [1]

### **I .9.4. Sécurité :**

La sécurité est l'ensemble des méthodes ayant pour objet, sinon de supprimer, au moins de minimiser les conséquences qui ont un effet destructif sur le personnel, ou l'environnement de l'un et de l'autre. Sachant qu'un incident mécanique, une panne, peuvent provoquer un accident, sachant aussi que la maintenance doit maintenir en état le matériel de protection ou même que certaines opérations de maintenance sont elles-mêmes dangereuses, il apparait que la relation entre la maintenance et la sécurité est particulièrement étroite. [1]

### **I .9.5. Qualité :**

Degré (ou mesure) avec lequel un produit convient aux besoins du client. La qualité totale est une fonction de la qualité du projet, qui mesure la valeur intrinsèque du projet par rapport aux besoins du client, et de la qualité de fabrication, qui mesure la fidélité avec laquelle le produit fabriqué est conforme au projet. [1]

### I .9.6. Fiabilité :

#### I .9.6.1 Définition :

La fiabilité est une caractéristique d'un système mesurée par la probabilité qu'il accomplisse les fonctions requises dans des conditions données pendant une durée spécifiée.

Elle est donc concernée par un fonctionnement sans défaillance du système pendant une durée donnée et est caractérisée par la fonction de répartition  $R(t)$  des durées jusqu'à défaillance (fonction fiabilité). [1]

#### I .9.6.2. Types de Fiabilité :

➤ **Fiabilité opérationnelle :**

Fiabilité obtenue après une durée de fonctionnement d'un dispositif et par suite de défaillances potentielles.

➤ **Fiabilité prévisionnelle :**

Fiabilité estimée avant le fonctionnement d'un dispositif, de façon théorique (banques de données, calculs de durée de vie) ou de façon expérimentale (essais). [1]

### I .9.7. Défaillance :

#### I .9.7.1. Définition :

Une défaillance est une « altération ou cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise ».

Des synonymes de « défaillance » sont également utilisés dans certains secteurs industriels ou suivant des habitudes corporatives : dommage, anomalie, avarie, défaut, panne, incident, dégradation. [1]

#### I .9.7.2. Classification de la défaillance :

➤ **Défaillance progressive :**

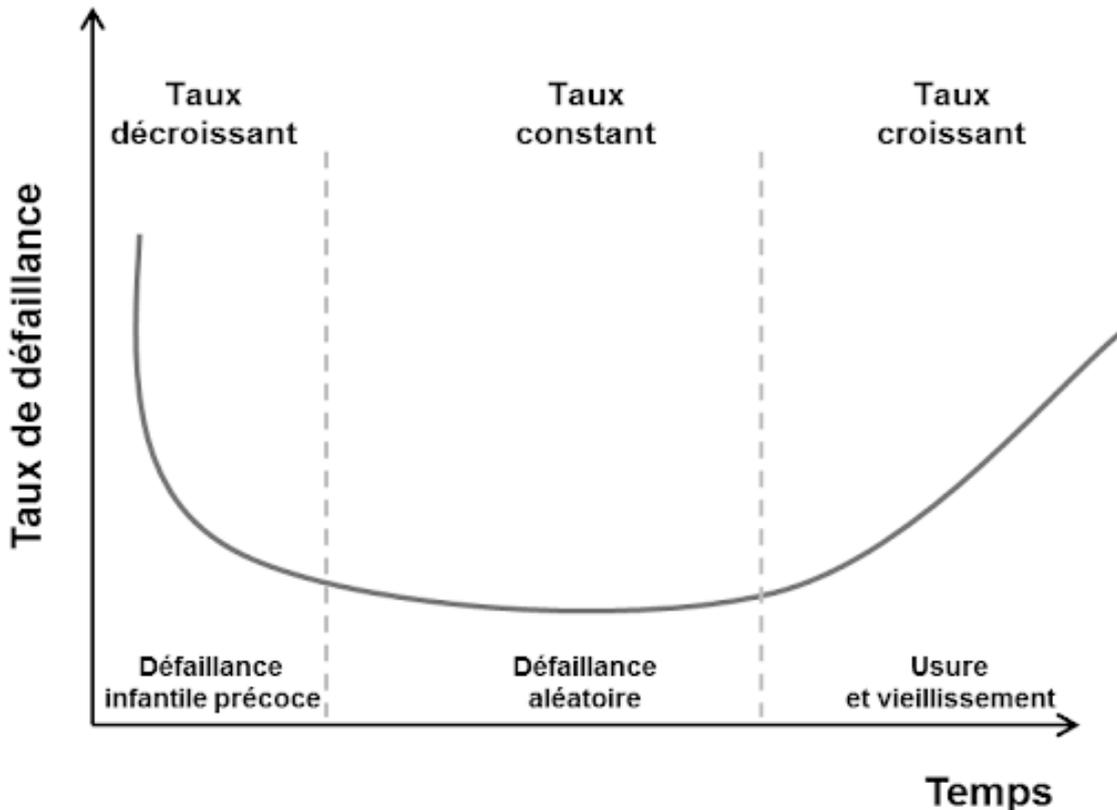
C'est une défaillance due à une évolution dans le temps des caractéristiques d'une entité. Il y a donc possibilité de prévoir une telle défaillance par un examen ou une surveillance antérieure (exemple : usure des bagues d'un roulement à billes,...etc.). [1]

### ➤ Défaillance soudaine :

Elle ne se manifeste pas par une perte progressive des performances et ne peut donc pas être prévue par un examen ou une surveillance antérieure (exemple : claquage d'un composant électronique).

La figure (1. 3) montre que l'évolution du taux de défaillance en fonction du temps présente trois domaines :

- **Domaine (I)** : apparition de défaillances dues à des défauts de fabrication et à des contrôles insuffisants. Les essais de rodage (matériel mécanique) ou de déverminage (équipements électroniques) ont pour but d'éliminer la période (I).
- **Domaine (II)** : apparition de défaillances aléatoires sans cause systématique. Cette période est très longue pour les composants électroniques et courts pour les composants mécaniques et les mécanismes.
- **Domaine (III)** : dégradations progressives et irréversibles. C'est le cas de composants mécaniques / mécanismes. [1]



**Figure 1.3** : Evolution du taux de défaillance en fonction du temps. [1]

### I .10. Conclusion :

Nous avons traité les différentes formes de maintenance ce qui nous a permis de dégager le type de maintenance qui nous intéresse en l'occurrence la maintenance préventive conditionnelle du quatrième niveau, cette dernière implique la maîtrise d'une technique ou technologie particulière et/ou la mise en œuvre d'équipement de soutien spécialisé afin d'assurer le suivi du matériel pendant son fonctionnement.

L'assurance de la continuité de fonctionnement des moteurs asynchrones nécessite la mise en place des programmes de maintenance. Celle-ci qui était principalement corrective dans les applications standard et préventive dans les applications critiques.

Le diagnostic, partie intégrante de la fonction maintenance, nécessite la connaissance des éléments constitutifs de la machine asynchrone, cette dernière est présentée en détail dans le chapitre suivant

# **Chapitre II : Diagnostic industriel des machines tournantes**

### II .1. Introduction :

Dans le présent chapitre, nous allons énumérer les différents défauts qui peuvent affecter le moteur asynchrone et leurs méthodes de diagnostic et de montrer l'avantage de l'emploi l'une de ces méthodes, qui est la méthode de l'analyse spectrale du courant statorique comme une technique permettant la détection des défauts de barres et d'excentricité dans les moteurs asynchrones. [13]

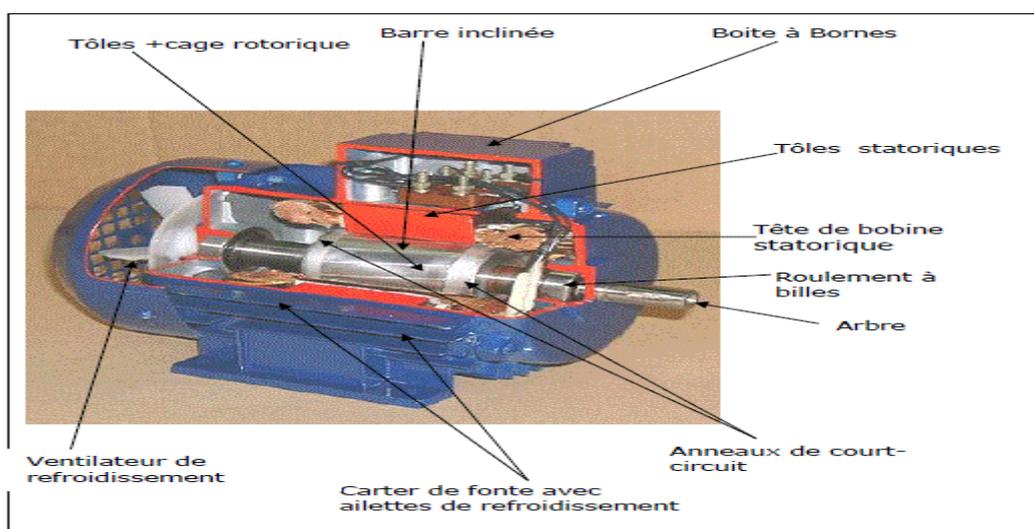
### II .2. Constitution de la machine asynchrone :

Cette première partie porte sur une brève présentation des machines asynchrones triphasées à cage de moyenne puissance. [14]

#### II .2.1. Construction de la machine asynchrone :

La machine asynchrone est constituée des principaux éléments suivants :

- Le stator (partie fixe) constitué de disques en tôles magnétiques portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer ;
- Le rotor (partie tournante) constitué de disques en tôles magnétiques empilés sur l'arbre de la machine portant un enroulement ;
- Les organes mécaniques permettent la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles ; [14]

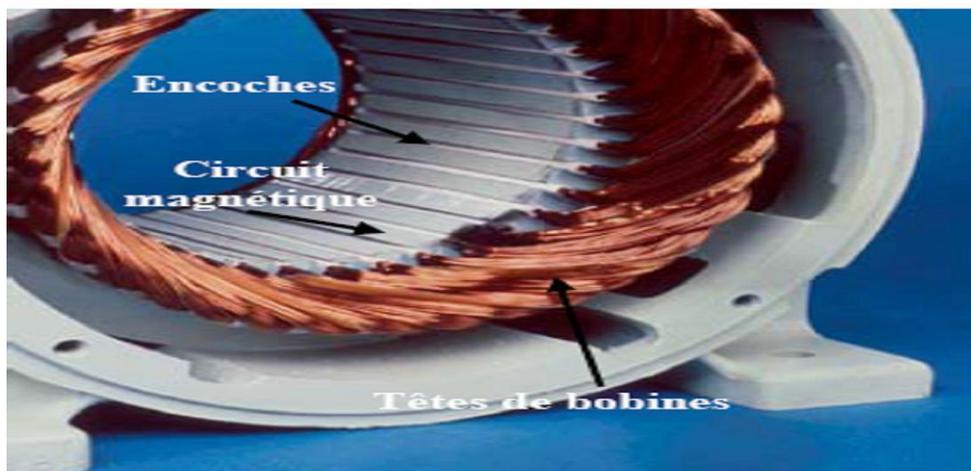


**Figure 2.1:** Eléments de constitution d'une MAS a cage d'écureuil. [20]

### II .2.1.1. Stator :

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique.

Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles sur lesquelles sont découpées des encoches parallèlement à l'axe de la machine (voir Figure 2.2). Le bobinage statorique peut être décomposé en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant une circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre pour obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, et ainsi limiter les ondulations du couple électromagnétique. [14]

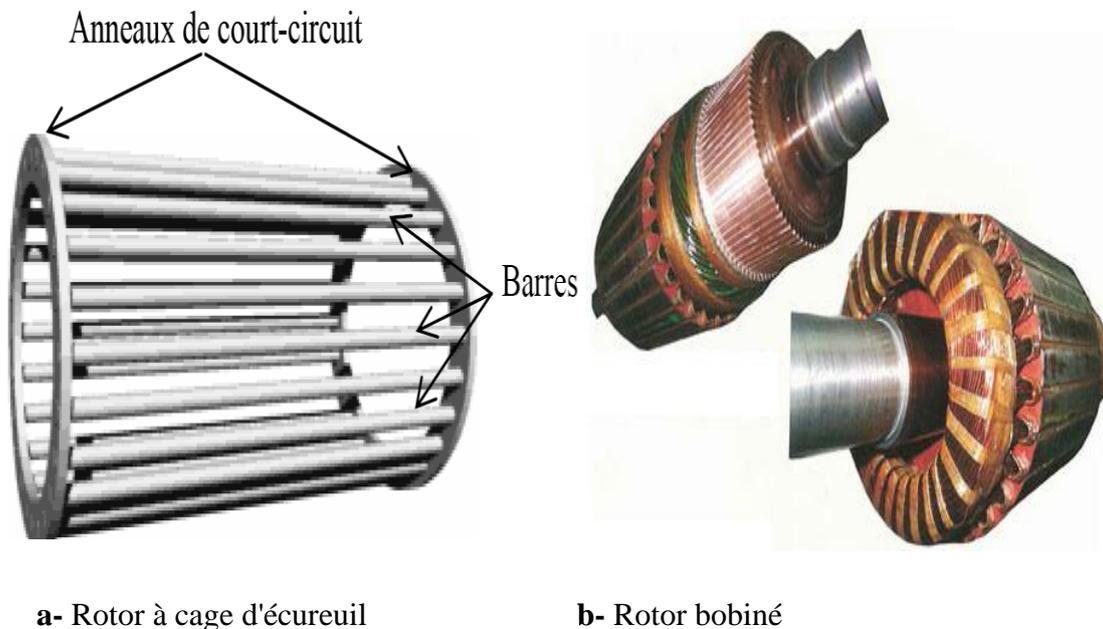


**Figure 2.2:** Vue schématique des constituants du stator. [14]

### II .2.1.2. Rotor :

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation du courant d'un conducteur d'encoche (barre rotorique) à l'autre. Ces barres conductrices régulièrement réparties, constituent la cage circuit du rotor (Figure 2.3.a). Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné (Figure 2.3.b). Dans le cas de rotors à cage d'écureuil, les barres conductrices sont réalisées par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre perforées et frettés dans les tôles du rotor. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre. Le moteur à cage d'écureuil est beaucoup plus simple à construire que le moteur à rotor bobiné et de ce

fait, son prix de revient se trouve réduit. De plus, il dispose d'une plus grande robustesse. Il constitue la plus grande partie du parc de moteurs asynchrones actuellement en service. [14]



**Figure 2.3:** Vues schématiques de rotors. [14]

### II .2.1.3. Organes mécaniques :

La carcasse servant de support joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi-accouplement.

Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement est fonction des efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale, etc...), des efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges, dépend de torsion (couple électromagnétique transmis en régime permanent, transitoire). Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et lui assurent une rotation libre. Le second palier assure les dilatations thermiques de l'arbre. Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dû aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Ils sont généralement à roulements pour les machines de petites et moyennes puissances.[14]

### II.3. Définitions de quelques termes liés au diagnostic :

**Diagnostic :** Le terme diagnostic en grec "diagnosis" (par connaissance), désigne l'identification d'une maladie par ses symptômes. Dans cette courte définition on retrouve les trois mots clés : [21]

➤ **Maladie :** il ne peut y avoir diagnostic que par rapport à une défaillance fonctionnelle (Nous dirons anomalie). Dans notre cas les défauts des machines tournantes, encore faut-il pour parler de maladie que la présence de ce défaut constitue une entrave pour le bon fonctionnement de la machine. [21]

➤ **Symptôme :** pour effectuer un diagnostic, il faut disposer d'informations significatives qui permettant de reconnaître le défaut si on veut être efficace. Il faut que l'information soit adoptée au besoin d'où la nécessité en général, de traiter celle-ci. [21]

➤ **Identification :** c'est la démarche par laquelle on effectue le tri des informations qui sont en notre disposition pour sélectionner un ou plusieurs défauts possibles[15]. Donc de la définition le diagnostic est l'identification de la cause probable de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection d'un contrôle ou d'un test. [21]

➤ **Maintenance :** toutes les activités destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. [21]

➤ **Fiabilité :** La fiabilité est l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise dans des conditions d'utilisation et pour une période de temps déterminée.

La fiabilité est destinée non seulement au concepteur et réalisateur mais aussi au responsable de la maintenance pour :

- Le choix judicieux de nouveaux équipements ;
- La définition de la politique de maintenance à appliquer ;
- En cas de besoin ; l'amélioration de leur disponibilité. [16]

➤ **Disponibilité :** Aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires soit assurée. [17]

➤ **Défaillance :** Evénement engendrant une modification du fonctionnement du procédé.

L'état du système ne correspond plus à un fonctionnement normal, le système n'est plus apte à assurer totalement sa fonction. [21]

- **Sécurité** : Ce terme regroupe les caractéristiques concernant l'utilisation du procédé et ses dangers potentiels pour l'utilisateur ou pour le matériel. [21]
- **Sûreté** : Sûreté regroupe les notions de disponibilité, fiabilité, maintenabilité et sécurité du système ; elle caractérise la confiance que l'on peut apporter au fonctionnement. [21]
- **Modèle** : Représentation formalisée d'un phénomène (reproduction d'un objet). [21]
- **Résidu** : Signal indicateur de défauts. Il reflète la cohérence des données mesurées vis-à-vis du modèle comportemental du système. [21]

### II.4. Les causes des défauts :

Pour le stator, les effets sont principalement dus à un problème :

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

Pour le rotor, les effets sont essentiellement dus à un problème :

- Thermique (surcharge) ;
- Électromagnétique (Force en fonction  $B^2(t)$ ) ;
- Résiduel (déformation) ;
- Dynamique (arbre de transmission) ;
- Mécanique (roulement) ;
- Environnemental (agression). [13]

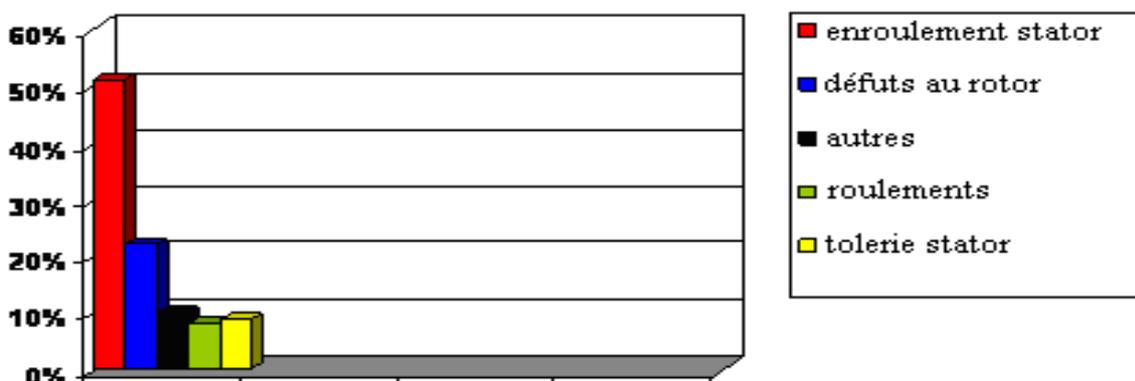
### II.5. Étude statistique des différents défauts de la machine asynchrone :

Les défauts peuvent être classés selon leurs origines en deux catégories : interne et externe. Défauts internes sont provoqués par les constituants de la machine (bobinages du stator et du rotor, circuits magnétiques, cage rotorique, entrefer mécanique, etc.). Les défauts externes sont causés par le type d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine. Une classification des défauts qui existent dans les machines électriques selon leurs origines est présentée dans le Tableau 2.1. [18]

Défaillances des Machine électriques	Interne	Mécanique	Contact entre le stator et rotor
			Défaut de roulements
			Excentricité
		Electrique	Mouvement des enroulements et des toles
			Défaillance au niveau de l'isolation
			Rupture de barre
	Externe	Mécanique	Défaillance au niveau du circuit magnétique
			Charge oscillante
			Surcharge de la machine
		Environnementale	Défaut de montage
			Humidité
			Température
		Electrique	Propreté
			Fluctuation de la tension
Sources de tension déséquilibrées			
			Réseau bruité

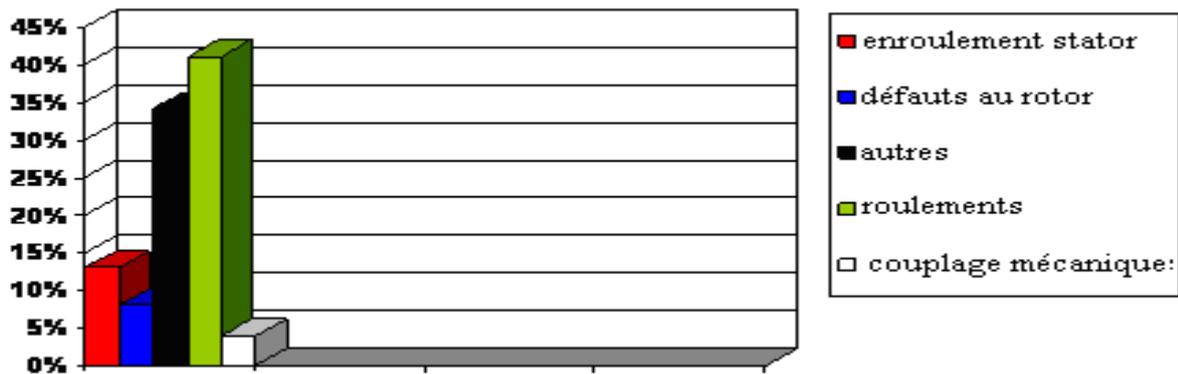
**Tableau 2.1** : Défautes des machines électriques selon leurs origines. [19]

Statistiquement, il est difficile de donner des informations exactes des défaillances de machines asynchrone parce que les défauts ne sont pas automatiques dans l'ensemble des parcs d'exploitations et des ateliers de maintenance. De multiples études statistiques sur des machines ont été effectuées depuis les années 80 jusqu'à nos jours. Toutes ces statistiques mentionnées concernent les machines asynchrones de moyenne et grande puissance exploitées dans l'industrie. Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50 kW à 200kW) a donné les résultats suivants (Figure II .4). [6]



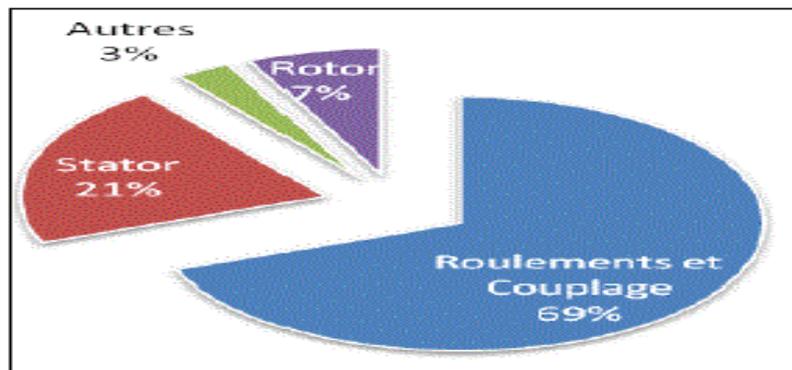
**Figure 2.4** : Répartition des pannes des machines de faible et moyenne puissance. [21]

Une autre étude statistique faite sur des machines de grande puissance (100 kW à 1 MW) donne des résultats qui sont présentés la figure (2.5).[6]



**Figure 2.5** : Répartition des pannes des machines de fortes puissances. [21]

De même, une étude statistique, effectuée en 2008 par A. H. Bonnett et all sur les défauts de la machine asynchrone a donné les résultats sur la figure (2.6). [6]



**Figure 2.6** : pourcentage des défauts 2008. [22]

D'après les études statistiques de 2008 ; 1995 et de 1988, il est clair que les contraintes mécaniques sont plus grandes pour ces types de machines et en particulier pour celles de gros calibres. Ceci peut justifier le taux élevé des pannes par suite des dégradations des roulements, par conséquent leur surveillance et leur maintenance s'avèrent indispensables sont plus grandes pour ces types de machines et en particulier pour celles de gros calibres. Ceci peut justifier le taux élevé des pannes à la suite des dégradations des roulements, par conséquent leur surveillance et leur maintenance s'avèrent indispensables. [19]

### II .5.1. Défaillances d'ordre électrique :

Les défaillances d'origine électrique peuvent, dans certain cas, être la cause d'un arrêt de la machine au même titre que celles d'ordre mécanique. Ces défaillances se séparent en deux catégories bien distinctes. Nous pouvons citer les défaillances qui apparaissent au niveau des circuits électriques statoriques et celles qui apparaissent au niveau des circuits électriques rotoriques. [19]

#### II .5.1.1. Défaillances des circuits électriques rotoriques : [23][24]

Pour le circuit rotorique, Les défaillances sont essentiellement dues à un problème :

- ✓ Thermique (surchage) ;
- ✓ Dynamique (arbre de transmission) ;
- ✓ Mécanique (roulement) ;
- ✓ Environnemental (agression...).

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

- ✓ Rupture de barres ;
- ✓ Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit ;
- ✓ Excentricité statique et dynamique.

##### II .5.1.1.1. Ruptures de barres :

Cassure ou la rupture de barre est l'une des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine. Ainsi le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croit rapidement avec le nombre de barres

Cassées. [25]



Figure 2.7 : Défaut d'une barre cassée. [19]

L'effet d'une cassure de barre croit rapidement avec le nombre de barres cassées. Le modèle diffère pour la simulation car le rang de la matrice afférent au rotor n'est plus constant. Néanmoins, les fréquences engendrées, autour de la fréquence fondamentale de l'alimentation, par un défaut de barre ou de portion d'anneau sont :

$$f_b = (1 \pm 2k.g)f_s \quad (2.1)$$

Avec :  $k = 1, 2, 3, \dots ; k \in \mathcal{N}$

Par contre, les harmoniques d'espaces génèrent eux aussi des fréquences dont la relation est :

$$f_b = \left\{ \left( \frac{k}{p} \right) (1 - g) \pm g \right\} f_s \uparrow \quad (2.2)$$

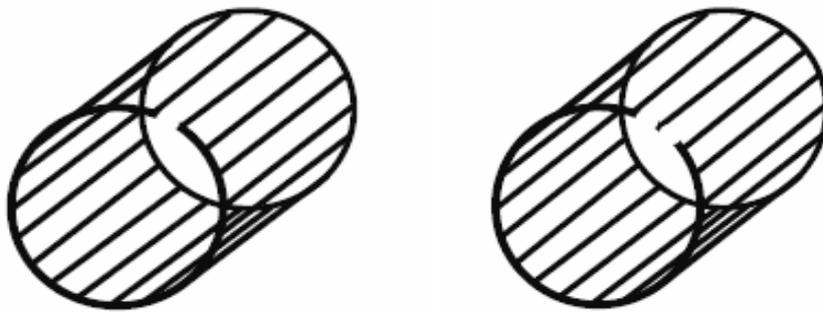
Avec :  $k = 1, 2, 3, \dots ; K \in \mathcal{N}, p$  étant le nombre de pair de pôles. [26]

### II .5.1.1.2. Ruptures des anneaux :

La rupture de portion d'anneau est un défaut qui apparait aussi fréquemment que celui de la cassure de barres. Les fissures sont dues aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. Comme il est difficile de détecter ce défaut car il est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques.

De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure.

La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, elle engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques, tout à fait similaire à celui provoqué par la cassure de barres. [27][28]

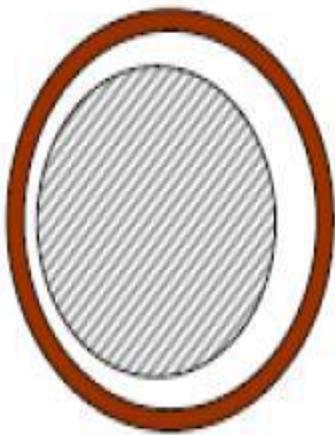


**Figure 2.8 :** Rupture d'une et deux portions adjacentes d'anneau de court-circuit. [14]

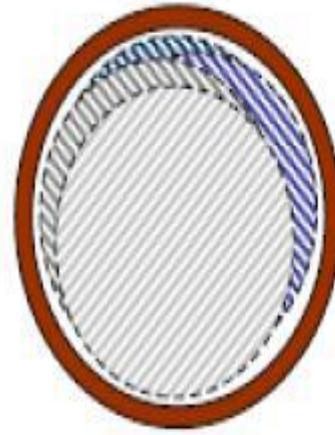
### II .5.1.1.3. Excentricité statique et dynamique :

Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple suite au décalage entre la rotation de l'arbre et le centre du rotor (figure 2.8). Ce phénomène, dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut de roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage). On distingue généralement trois cas d'excentricité :

- ✓ L'excentricité statique, c'est lorsque le rotor est déplacé du centre de l'alésage statorique mais tourne toujours autour de son axe ;
- ✓ L'excentricité dynamique, c'est lorsque le rotor est positionné au centre de l'alésage statorique mais, ne tourne plus autour de son axe ;
- ✓ L'excentricité qu'on pourrait qualifier de 'mixte', cette dernière associe les deux cas précédemment cités. [27][29][30][31]



Excentricité statique



Excentricité dynamique

**Figure 2.9:** modélisations schématiques de l'excentricité statique et dynamique. [26]

Ce défaut modifie aussi bien le comportement magnétique que celui mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur le noyau statorique ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation.

D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements. [19]

Les fréquences proches du fondamental sont données par la relation :

$$f_{exc} = \left\{ 1 \pm n \left( \frac{1-g}{p} \right) \right\} f_s \quad (2.3)$$

Où :

$f_{exc}$ : Fréquence "d'excentricité",

$n$ : 1, 2, 3, ...,  $n \in \mathbb{N}$ ,

$g$ : Le glissement,

$p$ : Nombre de paires de pôles,

$f_s$ : Fréquence d'alimentation.

Cette relation a l'avantage de ne pas nécessiter de connaissance précise de la machine asynchrone car elle ne fait pas apparaître de terme lié à sa conception. [26]

Une seconde approche consiste à utiliser une expression liant le défaut de barre cassée à celle de l'excentricité et des encoches au rotor.

C'est ainsi qu'une équation, sous forme compacte, fait apparaître les harmoniques de fréquences relatives à ces défauts, et qui dépendent pour beaucoup du nombre de paires de pôles.

$$f_{exc} = \left\{ (kN_r \pm n_d) \left( \frac{1-g}{p} \right) \pm nw_s f_s \right\} \quad (2.4)$$

Où :

$f_{exc}$ : Fréquence " d'excentricité "

$k$  : 1, 2, 3, . . . ,  $n \in N$ ,

$N_r$  : Nombre d'encoches au rotor,

$n_d \in N$ ,

$g$  : Le glissement,

$p$  : Nombre de paires de pôles,

$nw_s$ : 1, 3, 5, . . . ,

$nw_s \in N$ ,

$f_s$ : Fréquence d'alimentation. [26]

### II .5.1.2. Défaillances des circuits électriques statorique :

Pour le circuit statorique, les défaillances sont principalement dues à un problème: [28]

- ✓ Thermique (surcharge....) ;
- ✓ Électrique (diélectrique....) ;
- ✓ Mécanique (bobinage.....) ;
- ✓ Environnemental (agression.....).

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

- ✓ Défaut d'isolant ;
- ✓ Court-circuit entre spires ;
- ✓ Court-circuit entre phases ;
- ✓ Défaut de circuit magnétique.

### II .5.1.2.1. Défauts d'isolant dans un enroulement :

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique...) engendrent des phénomènes thermiques se traduisant par une augmentation de la température des différents organes du moteur. Cependant, les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et des contraintes mécaniques. De ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ces limites, ce matériau va se dégrader de manière prématurée ou accélérée et finira par ne plus assurer sa fonction. Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné.

Les différentes Causes pour ce type de défaut sont :

- ✓ La dégradation de l'isolant à la fabrication ;
- ✓ La tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation ;
- ✓ Le courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation ;
- ✓ Les vibrations mécaniques ;
- ✓ Le vieillissement naturel des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée ; même pendant une utilisation 'normale', l'isolant finit naturellement par se dégrader ;
- ✓ Fonctionnement dans un environnement sévère. [28]

### II .5.1.2.2. Court-circuit entre spires :

Un court-circuit entre spires d'une même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné[24][26]. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée. Une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau des enroulements et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne (apparition d'un 2<sup>ème</sup> court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique en dehors d'une augmentation des oscillations proportionnelles au défaut. [19]



Figure 2.10: Court-circuit entre spires. [19]

Il a été montré que le courant statorique avait un spectre enrichi suite à la création d'un court-circuit entre plusieurs spires au stator. Les fréquences sont données par la relation :

$$f_{cc} = \left\{ \frac{n}{p} (1 - g) \pm k \right\} f_s \quad (1.5)$$

Où :

$f_{cc}$  : Fréquence " de court-circuit ",

$f$  : Fréquence d'alimentation,

$n$ : 1, 2,3, . . . ,  $n \in N$ ,

$p$  : Nombre de paires de pôles,

$g$ : Le glissement,

$k$  : 1, 3, 5, . . . ,  $k \in N$ . [19]

### II .5.1.2.3. Court-circuit entre phases :

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système[28][24]. L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs. Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparait. Les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases. [19]

### II .5.2. Défauts de circuit magnétique :

Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer le problème par des phénomènes de surchauffe, de surtension, d'élévation importante du courant, etc... [28][24]

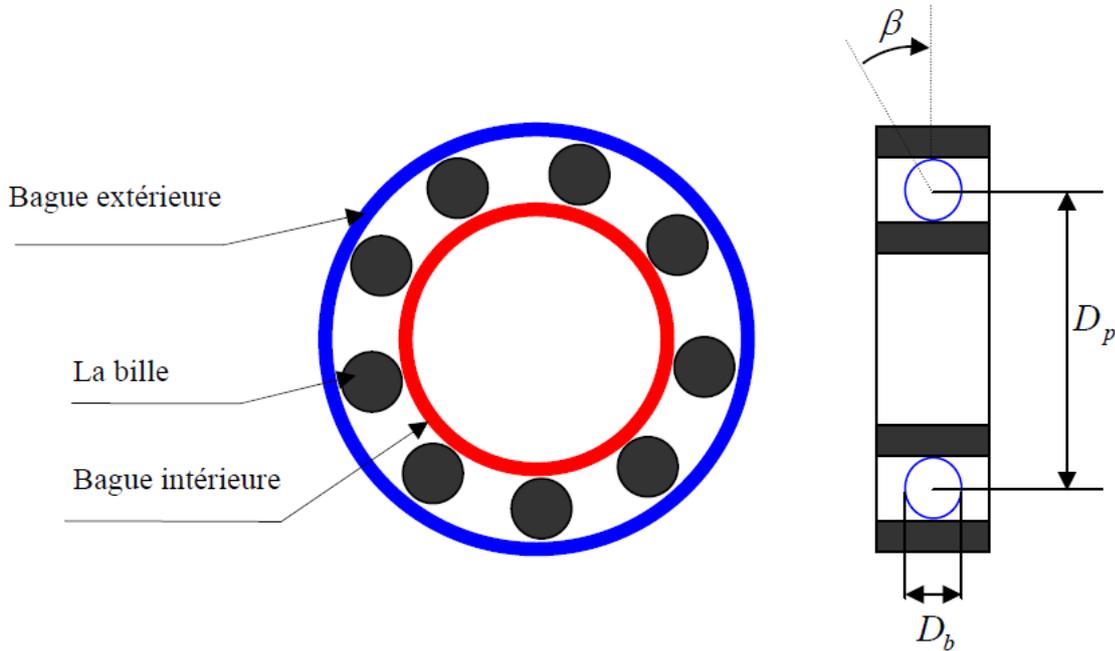
#### II .5.2.1. Défaillances d'ordre mécanique :

Les défaillances d'ordre mécaniques sont en général, les plus rencontrées parmi tous les défauts que rencontre la machine asynchrone. [28][24]

Ces défauts peuvent apparaître au niveau des roulements à billes, des flasques ou encore de l'arbre moteur tels que le défaut de balourd et de désalignement. [19]

#### II .5.2.2. Défaillances des roulements :

Les roulements à billes jouent un rôle très important dans le fonctionnement de tout type de machines électriques. Les défauts de roulements peuvent être causés par un mauvais choix de matériau dès l'étape de fabrication. Les problèmes de rotation au sein de la culasse du roulement, causés par un roulement abîmé, écaillé ou fissuré, peuvent créer des perturbations au sein de la machine. Nous savons que des courants électriques peuvent circuler au niveau des roulements d'une machine asynchrone ce qui peut provoquer la détérioration de ces derniers. La graisse, qui permet la lubrification et la bonne rotation des roulements peut, dans certaines applications, se solidifier et causer une résistance à la rotation. L'analyse vibratoire de la machine ou l'analyse harmonique des courants statoriques permet de détecter ce genre de défaillances. [28][24]



**Figure 2.11:** Dimension du roulement à billes. [19]

La relation entre les vibrations des roulements à billes et le spectre du courant statorique est basée sur le fait que toutes les excentricités interfèrent sur le champ dans l'entrefer de la machine asynchrone.

Un défaut de roulement à billes se manifeste par la répétition continue du contact défectueux avec la cage de roulement extérieur comme intérieur. [32]

La fréquence de répétition sera pour la cage intérieure et extérieure :

$$\left\{ f_{int} = \frac{n_b}{2} f_r \left\{ 1 + \frac{D_b}{D_c} \cos \theta \right\} \right\} \quad (2.6)$$

$$\left\{ f_{ext} = \frac{n_b}{2} f_r \left\{ 1 - \frac{D_b}{D_c} \cos \theta \right\} \right\} \quad (2.7)$$

Le spectre en courant est alors décrit par :

$$\left\{ f_{int,ext} = f_{s \pm n} \frac{n_b}{2} f_r \left\{ 1 \pm \frac{D_b}{D_c} \cos \theta \right\} \right\} \quad (2.8)$$

$g$ : Le glissement,

$f_s$ : Fréquence d'alimentation,

$f_r$  : Fréquence de rotation mécanique,

$n : 1, 2, 3, \dots, n \in \mathbb{N}$ ,

$n_b$  : Nombre de billes,

$D_b$  : Diamètre des billes,

$D_c$  : Distance du centre des billes,

$\theta$  : L'angle de contact de la bille avec la cage

En considérant que le nombre de billes est compris entre 6 et 12 habituellement, deux relations couramment rencontrées sont :

$$\{f_{ext} = 0.4 n_b f_r\} \quad (2.9)$$

$$\{f_{int} = 0.6 n_b f_r\} \quad (2.10)$$

Donc le spectre en courant sera enrichi de :

$$\{f_{int,ext} = f_s \pm n_f \{int, ext\}\} \quad (2.11)$$

### II .5.2.3. Défaillances des flasques :

Les défauts créés au niveau des flasques de la machine asynchrone sont le plus généralement causés à l'étape de fabrication. En effet, un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement des roulements à billes, ce qui induit une excentricité au niveau de l'arbre de la machine. Il est possible de détecter ce type de défaillance par une analyse vibratoire ou une analyse harmonique des courants absorbés par la machine. [28][24]

### II .5.2.4. Défaillances de l'arbre mécanique :

L'arbre de la machine peut laisser paraître une fissure due à l'utilisation d'un mauvais matériau lors de sa construction. A court ou long terme, cette fissure peut mener à une fracture nette de l'arbre provoquant ainsi un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone.

Les milieux corrosifs peuvent aussi affaiblir la robustesse de l'arbre de la machine.

Par exemple, l'humidité peut provoquer des microfissures et conduire à une destruction complète de la machine. [28][24]

Une excentricité statique, dynamique ou mixte peut induire des efforts considérables sur l'arbre moteur, amenant ainsi une fatigue supplémentaire. Une analyse vibratoire, une analyse par ultrason,

une analyse fréquentielle des courants absorbés ou simplement une analyse visuelle de l'arbre de la machine permet de détecter ce type de défaillance. [19]

### II .5.2.5. Défauts de déséquilibre massique ou « Balourd » :

La grande sensibilité du courant aux variations de couples, captées par le moteur asynchrone et par voie de conséquences, aux défauts mécaniques (balourd) induisant ces dernières, fait de l'analyse spectrale du courant (MCSA) un outil d'investigation extrêmement puissant[33][34]. Les défauts de déséquilibre massique ou (balourd) sont détectés par la surveillance des fréquences appropriées de la phase du courant statorique.

$$f_d = [kf_1 \pm mf_r] \quad (2.12)$$

Où

$f_1$ : La fréquence du réseau d'alimentation du moteur à induction

$f_r$ : La fréquence de rotation de l'arbre rotorique. Le balourd entraîne l'émergence de raies aux fréquences définies par pour  $m = k=1$  et avec des amplitudes de moindre importance aux fréquences du courant pour  $m=1$  et  $k =2$ . [19]

### II .5.2.6. Défaut de désalignement :

Le désalignement est un problème plus fréquent que le balourd, et la raison en est bien Simple. Malgré l'emploi de paliers auto-alignant, et d'accouplements flexibles, il est difficile d'aligner deux arbres, ainsi que leurs paliers afin d'assurer qu'il n'y existe aucune force qui puisse causer la vibration. [35]

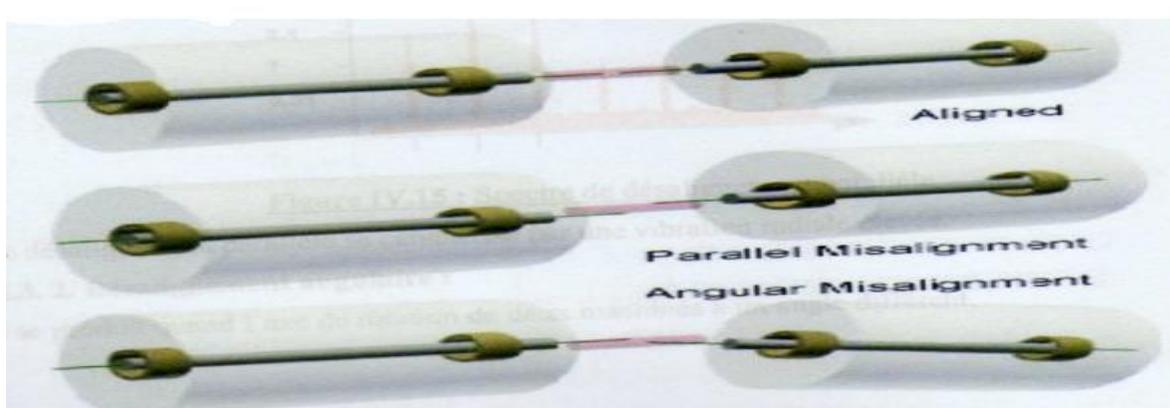
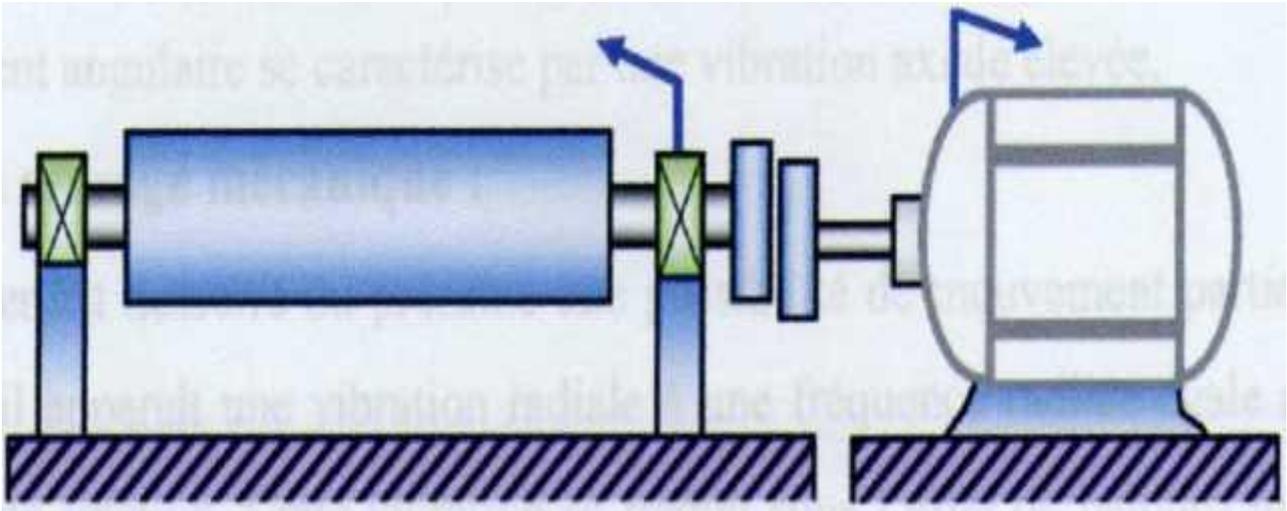


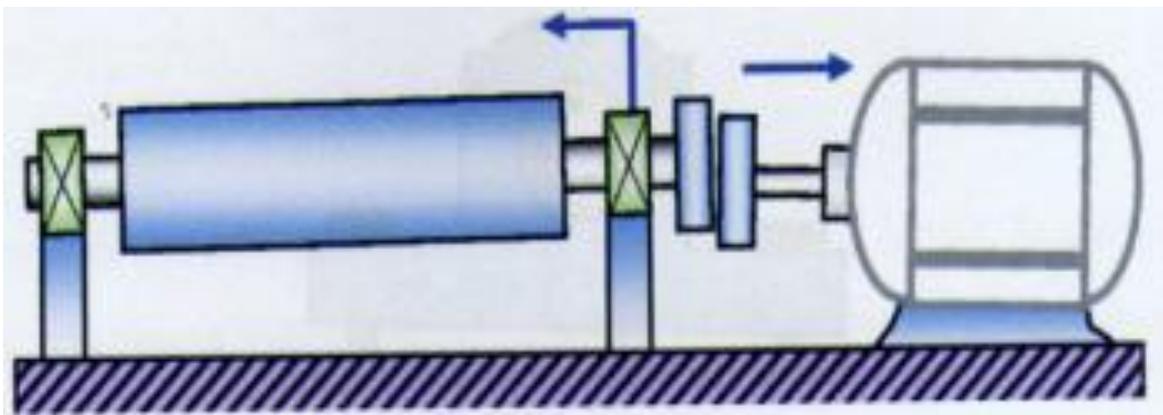
Figure 2.12 : Désalignement des arbres. [35]

On distingue deux types de désalignement « parallèle et angulaire ».



**Figure 2.13:** Image de désalignement parallèle [35]

Désalignement parallèle : Il se produit quand les axes de rotation des deux machines ont le même Angle d'orientation, mais ils sont séparés verticalement, chacun de l'autre. [35]



**Figure 2.14:** Image de désalignement angulaire. [35]

Désalignement angulaire : Il se produit quand l'axe de rotation de deux machines a un angle différent. [35]

### II .5.2.7 Défauts dans les engrenages :

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. Selon la position relative des deux arbres, on distingue trois classes d'engrenages (figure 2.14): [35]

- ✓ Les engrenages parallèles « les 2 arbres sont parallèles ».
- ✓ Les engrenages concourants « les 2 arbres sont tels que leurs prolongements se coupent ».
- ✓ Les engrenages gauches « les 2 arbres occupent une position relative quelconque ».

Les dentures d'engrenage peuvent être droites, hélicoïdales ou à chevrons. Les efforts, en conséquence, sont :

- ✓ Uniquement radiaux sur les engrenages parallèles, à denture droite ou à chevrons
- ✓ Mixtes « radiaux et axiaux » sur les engrenages à denture hélicoïdales, les engrenages coniques et les engrenages à roue et vis sans fin. [35]



**Figure 2.15** : Différents types d'engrenage. [35]

Les engrenages sont des éléments de transmissions de mouvement qui peuvent être touchés par des défauts tel que :

- ✓ Des piqûres pour les dents taillées ;
- ✓ Des écaillages de la denture ;
- ✓ Des fissures ;
- ✓ Des ruptures au terme de fissures ;
- ✓ Des grippages qui conduisent à d'importantes détériorations.

Les principaux défauts survenant sur un couple d'engrenages d'un réducteur simple sont les défauts répartis sur toute la denture et les défauts localisés sur une partie de la denture. [35]



**Figure 2.16** : Défauts réels d'engrenage localisé. [35]

Défauts réels d'engrenage localisé plus généralement, les détériorations superficielles d'engrenages sont le résultat de différents phénomènes pouvant intervenir au cours du fonctionnement du système. [35]

### **II .6. Les Méthodes de diagnostic :**

Les méthodes de diagnostic sont nombreuses mais on peut les classer suivant deux axes :

- Les méthodes mathématiques qui permettent de modéliser les systèmes, les causes et les symptômes de défaillance, pour faciliter les démarches inductives et déductives, qui relèvent du domaine des méthodes de diagnostic interne ;
- Les méthodes capables de reproduire sous forme informatique, les modes de raisonnement de l'homme. Ces derniers sont basés sur la discipline de l'intelligence artificielle et sont du domaine des méthodes de diagnostic externe.

On peut classer les méthodes de diagnostic en premier lieu dans les deux grandes Familles:  
[36][37][38]

- ❖ Les méthodes internes et externes ;
- ❖ Les méthodes inductives et déductives.

### II .6.1. Diagnostic par les méthodes internes :

Le diagnostic de défaillances par des méthodes internes requiert un modèle du système à surveiller, et s'il n'y en pas, on élabore un qui convienne (fiable et suffisamment précis). Ce modèle peut varier selon les objectifs. Il peut être plus ou moins agrégé, représentatif d'un modèle de bon fonctionnement ou de fonctionnement caractéristique d'une ou plusieurs défaillances. Habituellement un modèle est une description formelle (Mathématique) du système à surveiller. Mathématiquement on peut avoir plusieurs modèles du même système comme en automatique par exemple, peuvent être à temps continu ou discret, descriptibles au moyen d'équations différentielles ou d'équations aux différences. Un modèle peut aussi être très difficile à obtenir, de plus, il peut être plus ou moins approximatif. [36][37] [38]

Ces méthodes de diagnostic internes reposent sur la comparaison de mesures réelles sur le système à surveiller et des informations que fournit le modèle. Les écarts caractérisent le fonctionnement du système :

- ❖ À un écart nul, correspond un fonctionnement de type normal ;
- ❖ À un écart non nul, correspond un fonctionnement de type défaillant.

Ces méthodes internes se classent en deux grandes catégories ; les méthodes de redondance analytiques qui utilisent les techniques d'estimation d'état et les techniques d'estimations paramétriques qui ont pour but d'estimer les paramètres du modèle. Les méthodes internes de diagnostic se distinguent selon le modèle utilisé : [19]

- **Modèle de simulation** : c'est une description de la structure physique et du comportement du système. Les modèles analytiques utilisés dans ce mode de diagnostic sont représentés par des équations d'état ou des fonctions de transfert. Les perturbations sont prises en compte de manière additive à travers des matrices. Les défauts sont prisés en compte soit de la même manière soit en modifiant la structure même du modèle ; [19]
- **Equation de parité** : une relation ou équation qui génère un résidu est appelée relation ou équation de parité. Les équations de parité primaire peuvent être obtenues à partir des équations qui décrivent la structure et le comportement du système et les équations de parité additionnelles sont obtenues par l'intermédiaire de transformations afin d'améliorer la tâche de diagnostic; [19]

- **Observateur** : Un modèle capable d'engendrer une approximation du vecteur d'état est appelé estimateur d'état ou observateur d'état. Le modèle est décrit sous une représentation de variables d'état. L'analyse du comportement des estimations des états qui ont un sens physique permet la réalisation du diagnostic; [19]
- **Estimation paramétrique** : La détection et la localisation des défaillances par estimation paramétrique, consiste à déterminer les valeurs numériques des paramètres structuraux d'un modèle de connaissance qui gouverne le comportement dynamique du système. La première étape est donc, l'élaboration d'un modèle mathématique de complexité raisonnable pour caractériser la machine en fonctionnement sain et dégradé. Le type de défaut que l'on pourra détecter dépend du choix du modèle. En effet, les défauts statoriques ou rotoriques doivent être discriminés au niveau des paramètres physiques estimés, pour qu'on puisse les détecter et les localiser. Le modèle de Park est souvent utilisé en diagnostic pour l'estimation paramétrique. Les cassures de barres provoquent une augmentation dans la résistance rotorique apparente ; [39]
- **Modélisation des signaux** : Dans cette méthode, le contenu spectral, l'évolution temporelle des variables mesurées sont exploitées pour détecter et localiser les défauts. L'analyse spectrale plus particulièrement est utilisée depuis de très nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques. Ces cas se prêtent bien à cette approche dans la mesure où de nombreux défauts (rupture de barres, dégradations des roulements....) se traduisent par l'apparition de fréquences caractéristiques directement liées à la vitesse de la machine. [19]

### II .6.2. Diagnostic par les méthodes externes :

Les méthodes externes de diagnostic supposent qu'aucun modèle n'est disponible pour décrire les relations de cause à effet. La seule connaissance repose sur l'expertise humaine par apprentissage. Le module de reconnaissance utilise les observateurs issus du système, des entrées et des sorties, afin de trouver les relations de cause à effet. Dans ces méthodes de diagnostic le facteur déterminant est l'algorithme de classification. [19]

### II .6.3. Diagnostic par les Méthodes inductives :

Ces méthodes de diagnostic correspondent à une approche montante ou recherche en avant. Il s'agit de trouver le défaut à partir de ses effets sur le système. Ces méthodes utilisent un mécanisme de raisonnement en avant qui a pour objectif d'interpréter les symptômes ainsi que leurs combinaisons afin de trouver le défaut. [19]

### II .6.4. Diagnostic par les Méthodes déductives :

Le raisonnement en arrière est la principale caractéristique de ces méthodes. Les méthodes déductives doivent trouver quels sont les effets dans les systèmes. Une vérification des « effets trouvés par rapport aux effets possibles » permet de confirmer Ou d'infirmer l'existence du défaut. Ce qui justifie notre raisonnement. [28] [36][27]

Le diagnostic peut utiliser soit un seul type de raisonnement (avant ou Arrière) soit une combinaison de raisonnements (avant et arrière). Dans ce dernier cas, le raisonnement est appelé raisonnement mixte ou avant arrière. La connaissance "à priori" de la cause " défaut " implique la connaissance de certains effets. [36]

## II. 7. Modèle de la machine asynchrone à cage :

La modélisation et la simulation des machines constituent une étape primordiale en matière de diagnostic. Elles permettent la compréhension du fonctionnement defectueux, la vérification sur prototype virtuel de l'efficacité des algorithmes de détection de défaut et elles apportent également la possibilité de construire des bases de données sur les manifestations électriques et magnétiques de ces défauts. Parmi les approches de modélisations existantes, on cite : [41][43]

### II. 7.1. Approche analytique :

Les modélisations analytiques reposent sur le concept d'inductance, notion qui caractérise par une relation linéaire entre le flux et le courant.

Cette approche globale des phénomènes électromagnétiques permet d'établir un schéma électrique équivalent de la machine, la théorie des circuits permet de trouver les équations différentielles caractérisant le fonctionnement de la machine. [41][40]

### II.7.2 Approche numérique :

On cite deux méthodes :

❖ **La méthode des réseaux de perméance :**

Elle consiste à découper la machine en plusieurs tubes du flux, caractérisés par des perméance Le mouvement de la machine est pris en compte par l'intermédiaire de perméance d'entrefer variable selon la position du rotor. En considération la saturation magnétique. [42]

❖ **La méthode des éléments finis :**

Il s'agit de découper la machine en éléments de tailles suffisamment petites, pour que le matériau magnétique puisse être considéré comme linéaire sur les surfaces correspondantes, et à partir des équations de MAXWELL, il est possible d'exprimer le problème à résoudre.

La méthode des éléments finis permet de reproduire fidèlement le comportement électromagnétique de la machine, et de simuler les défauts d'une manière plus proche de la réalité. Cependant, les moyens et le temps de calcul freinent l'utilisation de telles méthodes en simulation des algorithmes de détection des défauts.

### II.8. Conclusions :

Dans ce deuxième chapitre nous avons rappelé brièvement les différents défauts et leurs méthodes de diagnostics appliqués à la machine asynchrone.

Comme nous avons mentionné précédemment, notre travail est consacré à l'étude et à la détection des défauts dans les machines tournantes cas des machines asynchrones triphasées par la méthode d'analyse des signatures du courant statorique ou analyse spectrale du courant statorique (MCSA).

Pour cela, il faut disposer d'un bon modèle mathématique, décrivant le comportement de la machine dans l'état sain et avec défaut. Ceci fait l'objet des chapitres suivants.

# **Chapitre III : Modélisation et simulation de la MAS à l'état sain**

### III.1. Introduction :

Le moteur asynchrone ou moteur d'induction est actuellement le moteur électrique dont l'usage est le plus répandu dans l'industrie. Son principal avantage réside dans l'absence de contacts électriques glissants, ce qui conduit à une structure simple et robuste facile à construire. Le domaine de puissance va de quelques watts à plusieurs mégawatts. Relié directement au réseau industriel à tension et fréquence constantes, il tourne à vitesse variable peu différente de la vitesse synchrone ; c'est lui qui est utilisé pour la réalisation de la quasi-totalité des entraînements à vitesse constante. Le moteur asynchrone permet aussi la réalisation d'entraînements à vitesse variable et la place qu'il prend dans ce domaine ne cesse de croître. Dans les pays industrialisés, plus de 60% de l'énergie électrique consommée est transformée en énergie mécanique par des entraînements utilisant les moteurs électriques. [44]

Modélisation de la machine asynchrone triphasée (MAS). Dans un premier lieu, on donnera de manière explicite le modèle mathématique de la machine asynchrone (Equations électriques et mécaniques) dans son référentiel triphasé. Puis, on réduira l'ordre du système par une transformation dite de PARK. Cette transformation modélise la MAS dans un nouveau référentiel, biphasé cette fois. Dans un dernier lieu, on donnera la simulation numérique des différentes grandeurs de la MAS. [45]

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 [47]. 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. [46]

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.

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)  $f_s$ . [51]

### III.2. Les Hypothèses :

L'étude de cette machine traduit les lois de l'électromagnétisme dans le contexte habituel des hypothèses simplificatrices : [48]

- L'effet d'encoche négligé ;
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer ;
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante ;
- Pertes ferromagnétiques négligeables ;
- L'entrefer constant ;
- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas prise en compte.

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses on peut citer :

- L'association du flux ;
- La constance des inductances propres ;
- L'invariance des résistances statoriques et rotoriques ;
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques. [48]

La représentation schématique de la MAS dans l'espace électrique est donnée sur la Figure (3.1). Elle est munie de six enroulements, [52]. Le stator de la machine est formé de trois enroulements fixes décalés de  $120^\circ$  dans l'espace et traversés par trois courants variables.

Le rotor peut être modélisé par trois enroulements identiques décalés dans l'espace de  $120^\circ$ . Ces enroulements sont en court-circuit et la tension à leurs bornes est nulle.

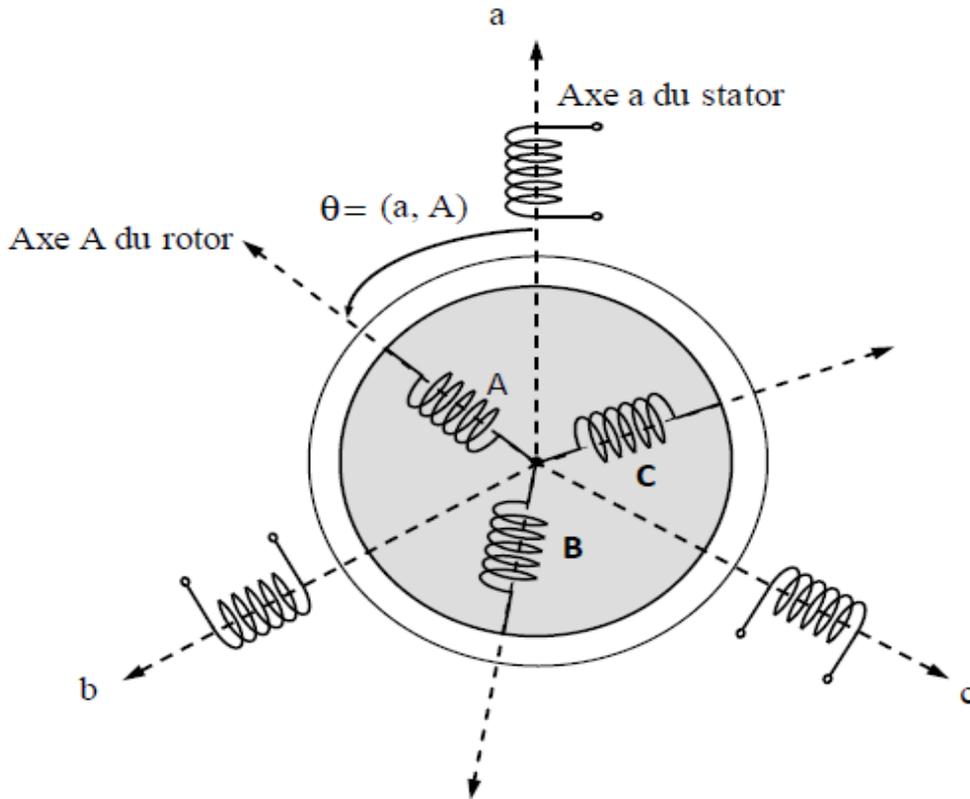


Figure 3.1 : Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée. [50]

$\theta$  : Caractérise la position angulaire du rotor par rapport au stator, d'où la vitesse angulaire :

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} .$$

### III.3. Les équations générales de la machine asynchrone sur 3 axes :

Après avoir posé les hypothèses nous développons les équations des circuits électriques statoriques et rotoriques et les équations mécaniques pour permettre la réalisation du modèle de la machine asynchrone à rotor bobiné et l'implantation sous l'environnement Matlab/SIMULINK.

#### III.3.1. Les équations électriques de la machine asynchrone sur 3 axes :

##### III.3.1.1. Les équations électriques : [49][51]

###### III.3.1.1.1. Les relations des tensions :

Selon la loi de Faraday la tension peut être décrite sous forme :

$$v = Ri + \frac{d\phi}{dt} \quad (3.1)$$

### Chapitre III : Modélisation et simulation de la MAS à l'état sain

Pour les 3 phases au stator et au rotor, on a donc :

Au stator :

$$\begin{aligned} v_{sa} &= R_s \cdot i_{sa} + \frac{d}{dt} \phi_{sa} \\ v_{sb} &= R_s \cdot i_{sb} + \frac{d}{dt} \phi_{sb} \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$v_{sc} = R_s \cdot i_{sc} + \frac{d}{dt} \phi_{sc}$$

Au rotor :

$$\begin{aligned} v_{ra} &= R_r \cdot i_{ra} + \frac{d}{dt} \phi_{ra} \\ v_{rb} &= R_r \cdot i_{rb} + \frac{d}{dt} \phi_{rb} \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$v_{rc} = R_r \cdot i_{rc} + \frac{d}{dt} \phi_{rc}$$

A noter que la tension aux bornes des trois enroulements rotoriques est nulle, parce que ces trois enroulements sont court-circuités. Pour faciliter la modélisation de la machine asynchrone, on fait appel à l'écriture matricielle des équations.

- **Forme matricielle :**

Pour les 3 phases statoriques et rotoriques on peut résumer cette écriture par l'écriture matricielle suivante :

Au stator :

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Au rotor :

$$\begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = R_r \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Avec :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$\text{et } [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

### III.3.1.1.2. Relations entre flux et courants :

Les mêmes hypothèses simplificatrices entraînent les relations matricielles suivantes entre les flux et les courants :

Au stator :

$$\begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} = [l_{ss}] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Au rotor :

$$\begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} = [l_{rr}] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + [M_{rs}] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Avec :

$$[l_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$[l_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Et

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = \begin{bmatrix} M_1 & M_3 & M_2 \\ M_2 & M_1 & M_3 \\ M_3 & M_2 & M_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\theta + \frac{2\pi}{3} & \cos\theta + \frac{4\pi}{3} \\ \cos\theta + \frac{4\pi}{3} & \cos\theta & \cos\theta + \frac{2\pi}{3} \\ \cos\theta + \frac{2\pi}{3} & \cos\theta + \frac{4\pi}{3} & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^t = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 \\ M_3 & M_1 & M_2 \\ M_2 & M_3 & M_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\theta + \frac{4\pi}{3} & \cos\theta + \frac{2\pi}{3} \\ \cos\theta + \frac{2\pi}{3} & \cos\theta & \cos\theta + \frac{4\pi}{3} \\ \cos\theta + \frac{4\pi}{3} & \cos\theta + \frac{2\pi}{3} & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$\begin{cases} M_1 = M_{sr} \cdot \cos\theta \\ M_2 = M_{sr} \cdot \cos\theta + \frac{4\pi}{3} \\ M_3 = M_{sr} \cdot \cos\theta + \frac{2\pi}{3} \end{cases} \quad (3.14)$$

Les équations (3.8), (3.9), (3.10), (3.11), (3.12) et (3.13) peuvent être écrites sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \emptyset_{sa} \\ \emptyset_{sb} \\ \emptyset_{sc} \\ \emptyset_{ra} \\ \emptyset_{rb} \\ \emptyset_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s & M_1 & M_3 & M_2 \\ M_s & L_s & M_s & M_2 & M_1 & M_3 \\ M_s & M_s & L_s & M_3 & M_2 & M_1 \\ M_1 & M_2 & M_3 & L_r & M_r & M_r \\ M_3 & M_1 & M_2 & M_r & L_r & M_r \\ M_2 & M_3 & M_1 & M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

**Remarque :**

- Les deux matrices  $[M_{sr}]$  et  $[M_{rs}]$  ((3.12), (3.13) dépendent du temps par l'intermédiaire  $\theta$  (position du rotor par rapport au stator)  $\theta(t)$  car :
- Comporte 36 éléments non nuls (matrice 6\*6) dont la moitié dépend du temps par l'intermédiaire  $\theta(t) = \int \Omega dt$  .ceci a pour conséquence de rendre le calcul de  $[L(t)]^{-1}$  plus délicat est très lent dans le cas où

$$[\emptyset] = [L(\theta)] [i] \Rightarrow [i] = [L(t)]^{-1} [\emptyset]$$

Pour cette raison, on fait appel à la modélisation sur deux axes au lieu de trois axes (ceci fera l'objectif qui reste de ce chapitre afin d'y pouvoir implanter le modèle sous l'environnement Matlab/SIMULINK.

**III.4. Les équations générales de la machine asynchrone sur 2 axes :**

Le modèle diphasé (2 axes) s'obtient du modèle triphasé par l'une des deux transformations suivantes :

- ✓ Transformation de PARK ;
- ✓ Transformation de CONCORDIA.

On peut travailler directement avec la transformation de PARK qui permet de passer de 3 axes fixes à 2 axes tournants notés  $d$  et  $q$ , ou passer par la transformation de CONCORDIA qui permet le passage de 3 axes fixes à 2 axes fixes notés  $\alpha$  et  $\beta$  puis faire une rotation d'angle  $\theta_s$  .[49]

La figure ci-dessous, montre le passage du repère triphasé en biphasé en utilisant les transformations Park et Concordia.

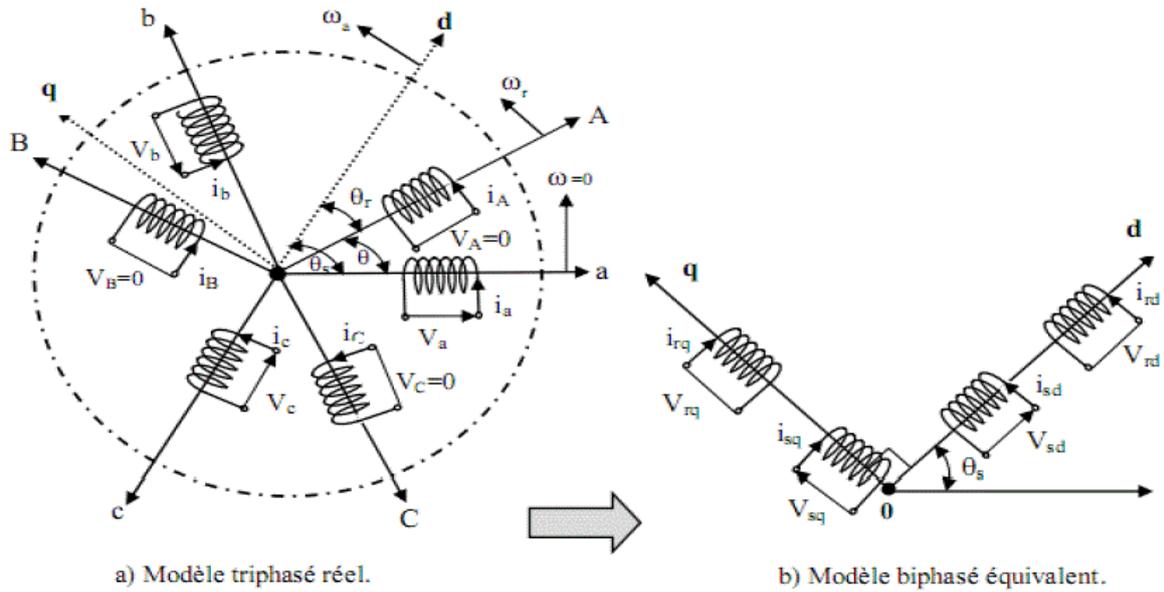


Figure 3.2: Représentation spatiale de la transformation triphasée / biphasée (Park et Concordia).[50]

### III.4.1. La transformation de Park appliquée aux équations électriques :

Au lieu de considérer  $s_a$  ;  $s_b$  et  $s_c$  fixes au stator, on considère l'enroulement équivalent formé de deux bobinages d'axes perpendiculaires  $s_d$  direct et  $s_q$  en quadrature tournant à  $\Omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$  par rapport au stator. C'est donc la transformation de Park dont l'objectif est de rendre la matrice impédance indépendante de la variable  $\theta$ .

D'après la figure (3.2) on a :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_d \\ \varepsilon_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_a \\ \varepsilon_b \\ \varepsilon_c \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Avec :  $\theta = (\overline{oa}, \overline{od}) = \theta_s$  car le repère ' $d, q$ ' est choisi fixe en champ statorique (c'est le cas le plus utilisé). Ce système d'équation n'est pas réversible, il faut lui adjoindre une équation supplémentaire pour rendre la matrice (3.16) carrée, pour cela, on introduit un  $\varepsilon_0$  proportionnelle à la composante homopolaire des forces magnétomotrices (f.m.m), quand les courants sont sinusoïdaux on a :  $\varepsilon_0 = K_0(\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c)$  . [49]

D'où le système matriciel des équations devient :

### Chapitre III : Modélisation et simulation de la MAS à l'état sain

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_d \\ \varepsilon_q \\ \varepsilon_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ K_0 & K_0 & K_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_a \\ \varepsilon_b \\ \varepsilon_c \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

**Remarque :** les systèmes des courants triphasés  $i_{a,b,c}$  et biphasés  $i_{d,q}$  sont déclarés équivalents lorsqu'ils créent la même *f. m. m* d'entrefer.

La composante homopolaire d'indice (0) ne participe pas à cette création de sorte que l'axe homopolaire peut être choisi orthogonal au plan (d, q).

Des coefficients de proportionnalité entre *f. m. m* et les courants (nombre de spires fictifs  $n_1$  et  $n_2$ ) Sont définis :

$$\varepsilon_1 = n_1 i_a, \varepsilon_2 = n_1 i_b, \varepsilon_3 = n_1 i_c \text{ Et } \varepsilon_d = n_2 i_d, \varepsilon_q = n_2 i_q, \varepsilon_0 = n_2 i_0$$

Par substitution, la matrice des courants vient :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{n_1}{n_2} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ K_0 & K_0 & K_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Il nous reste donc à calculer :  $\frac{n_1}{n_2}$  et  $K_0$

✓ **Calcul de :**  $\frac{n_1}{n_2}$  et  $K_0$

Pour cela, on fait appel à ce qu'on appelle la transformation de Park modifiée (conservation des puissances). Cette méthode repose sur l'invariance de la puissance instantanée :

$$P_e(t) = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = v_d i_d + v_q i_q + v_0 i_0 \quad (3.19)$$

Posons :

$$[x_{dq0}] = \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} \text{ et } [x_{abc}] = \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \text{ avec } x = (i, v, \phi)$$

Soit  $[P]$  la matrice de transformation directe (de Park) de tel sort que :

$$[x_{dq0}] = [P][x_{abc}] \quad (3.20)$$

### Chapitre III : Modélisation et simulation de la MAS à l'état sain

La puissance instantanée a donc pour expression :

$$[P_e] = [v_{abc}]^t \cdot [i_{abc}] = [v_{dq0}]^t \cdot [i_{dq0}] \quad (3.21)$$

En explicite les grandeurs  $[x_{dq0}]$  dans le référentiel d'origine, on obtient :

$$[v_{abc}]^t \cdot [i_{abc}] = [P] \cdot [v_{abc}]^t \cdot [P][i_{abc}] \quad (3.22)$$

$$[v_{abc}]^t \cdot [i_{abc}] = [v_{abc}]^t \cdot [P]^t [P][i_{abc}] \quad (3.23)$$

$[P]$  Doit satisfaire à la relation suivante :

$$[P]^t [P] = [I] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Ainsi, la matrice de transformation doit être orthogonale car :  $[P]^t = [P]^{-1}$

On a :

$$[P] = \frac{n_1}{n_2} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ K_0 & K_0 & K_0 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$[P]^t = \frac{n_1}{n_2} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & K_0 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & K_0 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & K_0 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Pour calculer  $\frac{n_1}{n_2}$  et  $K_0$  on pose :

$$[P] = [P]^t \Rightarrow \frac{n_1}{n_2} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ K_0 & K_0 & K_0 \end{bmatrix} =$$

$$= \frac{n_1}{n_2} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & K_0 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & K_0 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & K_0 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

### Chapitre III : Modélisation et simulation de la MAS à l'état sain

Après tout calcul on obtient :  $\frac{n_1}{n_2} = \sqrt{\frac{3}{2}}$  et  $K_0 = 1/\sqrt{2}$

D'où la matrice les équations (2.20) et (2.21) deviennent :

$$[P] = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

$$[P]^t = [P]^{-1} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 1/\sqrt{2} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1/\sqrt{2} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Cette relation permet de revenir aux grandeurs réelles de la machine.

#### ✓ Application de la transformation de PARK :

Au stator

$$[P]^{-1} \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ v_{s0} \end{bmatrix} = R_s [P]^{-1} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{s0} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \left[ [P]^{-1} \begin{bmatrix} \phi_{sd} \\ \phi_{sq} \\ \phi_{s0} \end{bmatrix} \right] \quad (3.30)$$

Au rotor

$$[P]^{-1} \begin{bmatrix} v_{rd} \\ v_{rq} \\ v_{r0} \end{bmatrix} = R_r [P]^{-1} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \\ i_{r0} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \left[ [P]^{-1} \begin{bmatrix} \phi_{rd} \\ \phi_{rq} \\ \phi_{r0} \end{bmatrix} \right] \quad (3.31)$$

Soit en multiplie à gauche par  $[P]$  :

$$[P]^{-1} \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ v_{s0} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{s0} \end{bmatrix} + [P][P]^{-1} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sd} \\ \phi_{sq} \\ \phi_{s0} \end{bmatrix} + [P] \cdot \frac{d}{dt} [P]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \phi_{sd} \\ \phi_{sq} \\ \phi_{s0} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Calculons maintenant  $[P] \cdot \frac{d}{dt} [P]^{-1}$  :

### Chapitre III : Modélisation et simulation de la MAS à l'état sain

$$[P] = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

$$[P]^t = [P]^{-1} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 1/\sqrt{2} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1/\sqrt{2} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} [P]^{-1} &= \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} -\sin\theta & -\cos\theta & 0 \\ -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 0 \\ -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 0 \end{bmatrix} \frac{d\theta}{dt} \\ &\Rightarrow [P] \cdot \frac{d}{dt} [P]^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{d\theta}{dt} \end{aligned} \quad (3.35)$$

Avec  $\theta = \begin{cases} \theta_s & \text{pour le stator} \\ \theta_r & \text{pour le rotor} \end{cases}$

D'où :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ v_{s0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{s0} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sd} \\ \phi_{sq} \\ \phi_{s0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sd} \\ \phi_{sq} \\ \phi_{s0} \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

**Remarque :** quand les composantes a, b et c sont nulles, la troisième équation est toujours vérifiée car identiquement nulle, devient inutile.

Il reste donc :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} \phi_{sd} \\ \frac{d}{dt} \phi_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} \phi_{sd} \\ \frac{d}{dt} \phi_{sq} \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

### Chapitre III : Modélisation et simulation de la MAS à l'état sain

En appliquant la même chose au rotor on obtient :

$$\begin{bmatrix} v_{rd} \\ v_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} \phi_{rd} \\ \frac{d}{dt} \phi_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} \phi_{rd} \\ \frac{d}{dt} \phi_{rq} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

D'où, le système d'équations de PARK qui constitue aussi le modèle électrique de la machine asynchrone en régime transitoire pour un enroulement diphasé équivalent :

Au stator :

Au rotor :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \phi_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} - \omega_s \phi_{sd} \end{cases} \quad \text{Et} \quad \begin{cases} v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \phi_{rq} = 0 \\ v_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} - \omega_r \phi_{rd} = 0 \end{cases} \quad (3.39)$$

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \end{cases} \quad \begin{cases} \phi_{dr} = L_s i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_s i_{qr} + L_m i_{qs} \end{cases} \quad (3.40)$$

Avec :

$$\begin{cases} \omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \\ \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \\ \theta_s = (s a, \hat{od}) \\ \theta_r = (r a, \hat{od}) \end{cases} \quad (3.41)$$

$$\begin{cases} L_s = l_s - l_{ss} \\ L_r = l_r - l_{rr} \\ L_m = 3l_m/2 \end{cases} \quad (3.42)$$

#### III.4.2. Les équations mécaniques de la machine asynchrone :

L'expression du couple  $C_{em}$  dans le repère de Park s'écrit :

$$C_{em} = \frac{3}{2} L_m (i_{dr} i_{qs} - i_{ds} i_{qr}) \quad (3.43)$$

En appliquant le principe fondamental de la dynamique :

$$\sum M_{\vec{F}_{ex}} = J \frac{d\overline{\Omega}(t)}{dt} \quad (3.44)$$

### Chapitre III : Modélisation et simulation de la MAS à l'état sain

On obtient la relation suivante :

$$C_{em}(t) - f_v \Omega(t) - C_r = J \frac{d\Omega(t)}{dt} \quad (3.45)$$

Avec :

$$\Omega(t) = \frac{d\theta}{dt} \quad (3.46)$$

✓ Pour la suite on se basera sur un référentiel fixe par rapport au stator :  $\omega_s = 0$ .

## III.5. Outils de simulation MATLAB/SIMULINK :

### III.5.1. Matlab :

Un système interactif et convivial de calcul numérique et de visualisation graphique, destiné aux ingénieurs et scientifiques. Il possède un langage de programmation à la fois puissant et simple d'utilisation. Il permet d'exprimer les problèmes et solutions d'une façon aisée, contrairement à d'autres langages de programmation. Il intègre des fonctions d'analyse numérique, de calcul matriciel, de traitement de signal, de visualisation graphique 2D et 3D, etc. Il peut être utilisé de façon interactive ou en mode programmation. En mode interactif, l'utilisateur a la possibilité de réaliser rapidement des calculs sophistiqués et d'en présenter les résultats sous forme numérique ou graphique. En mode programmation, il est possible d'écrire des scripts (programmes) comme avec d'autres langages. L'utilisateur peut aussi créer ses propres fonctions pouvant être appelées de façon interactive ou par des scripts. Ces fonctions fournissent à MATLAB un atout inégalable : son extensibilité. Ainsi, l'environnement MATLAB peut facilement être étendu. Dans MATLAB, l'élément de base est la matrice. L'utilisateur ne s'occupe pas des allocations de mémoire ou de redimensionnement comme dans les langages classiques. Les problèmes numériques peuvent être résolus en un temps record, qui ne représente qu'une infime partie du temps à passer avec d'autres langages comme le Basic, C, C++ ou le Fortran. MATLAB s'est imposé dans les milieux universitaire et industriel comme un outil puissant de modélisation, de simulation et de visualisation de problèmes numériques. Dans le monde universitaire, MATLAB est utilisé pour l'enseignement de l'algèbre linéaire, le traitement du signal, l'automatique, etc., ainsi que dans la recherche scientifique. Dans le domaine industriel, il est utilisé pour la résolution et la simulation de problèmes d'ingénierie et de prototypage. MATLAB est une abréviation de 'MATrix LABoratory'. Écrit à l'origine, en Fortran, par 'Cleve Moler', MATLAB était destiné à faciliter l'accès au logiciel matriciel développé dans les projets LINPACK et EISPACK. La version actuelle est écrite en C. Sa

### **Chapitre III : Modélisation et simulation de la MAS à l'état sain**

disponibilité est assurée sur plusieurs plates-formes : Sun, Bull, HP, IBM, Compatibles PC, Macintosh, et plusieurs machines parallèles. MATLAB est conforté par une multitude de boîtes à outils (Toolboxes) spécifiques à des domaines variés. Un autre atout de MATLAB, est sa portabilité ; la même portion de code peut être utilisée sur différentes plates-formes sans la moindre modification.[16]

#### **III.5.2. Simulink :**

SIMULINK est un programme pour la simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires ; une extension de MATLAB, dans laquelle la définition des modèles se fait par schémas blocs (diagramme structurel). Le diagramme structurel permet la représentation graphique d'un système d'équations linéaires et non linéaires. Il met en évidence la structure du système et permet de visualiser les interactions entre les différentes grandeurs internes et externes. On distingue alors particulièrement bien les contre-réactions, les couplages réciproques, les non-linéarités, etc. Les éléments qui composent le diagramme structurel représentent des opérations mathématiques, à savoir addition, soustraction, multiplication avec un coefficient, intégration et différentiation, ainsi que la multiplication et la division de deux variables et la fonction non linéaire d'une variable. SIMULINK possède une interface graphique pour visualiser les résultats sous forme de graphiques ou de valeurs numériques en cours de simulation. Les paramètres régissant le fonctionnement des systèmes peuvent être modifiés en ligne, c'est à dire en cours de simulation, et l'on peut observer leur effet immédiatement. [16]



### Chapitre III : Modélisation et simulation de la MAS à l'état sain

$$\begin{cases} V_a = 220 \cos(\omega t) \\ V_b = 220 \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ V_c = 220 \cos(\omega t - 4\pi/3) \end{cases} \quad (3.47)$$

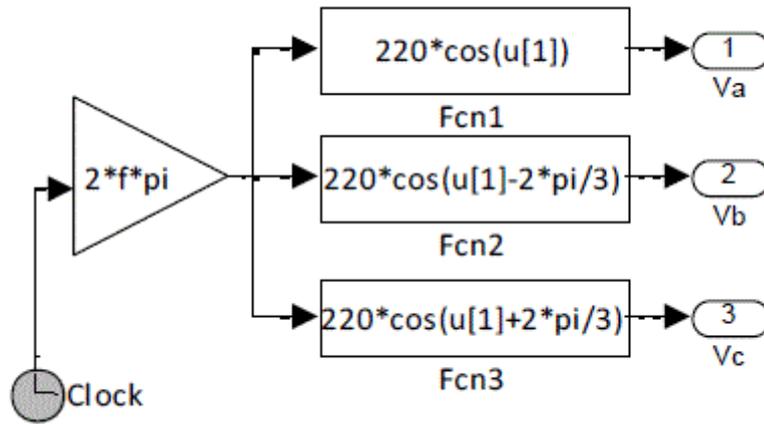


Figure 3.4 : Alimentation de la machine asynchrone.

#### ➤ Le bloc de la transformation de Park :

Les fonctions f(u) contiennent les paramètres de la matrice de PARK

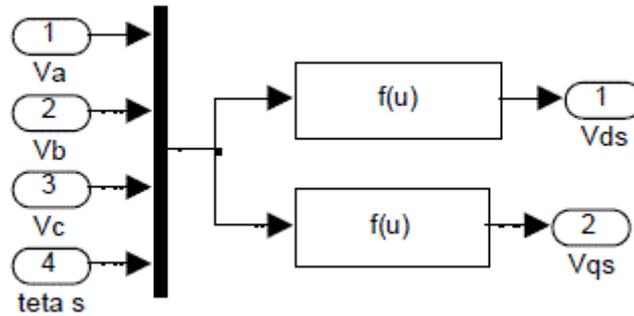


Figure 3.5 : La transformation de PARK

III.6.1. Simulation à vide :  $C_r=0$  ; [Nm].

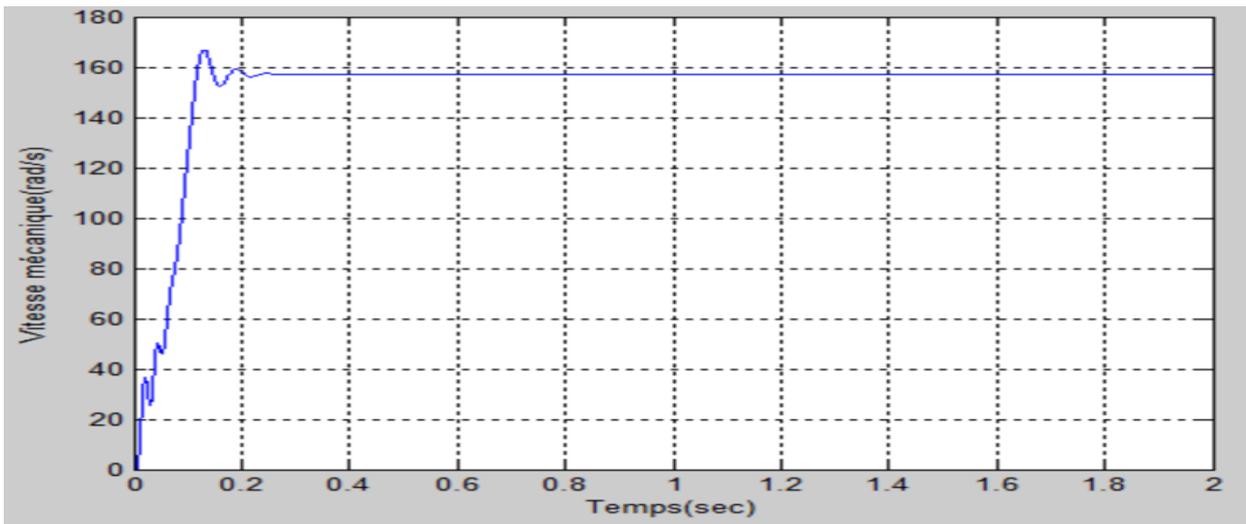


Figure 3.6 : la Vitesse mécanique (rad/s)

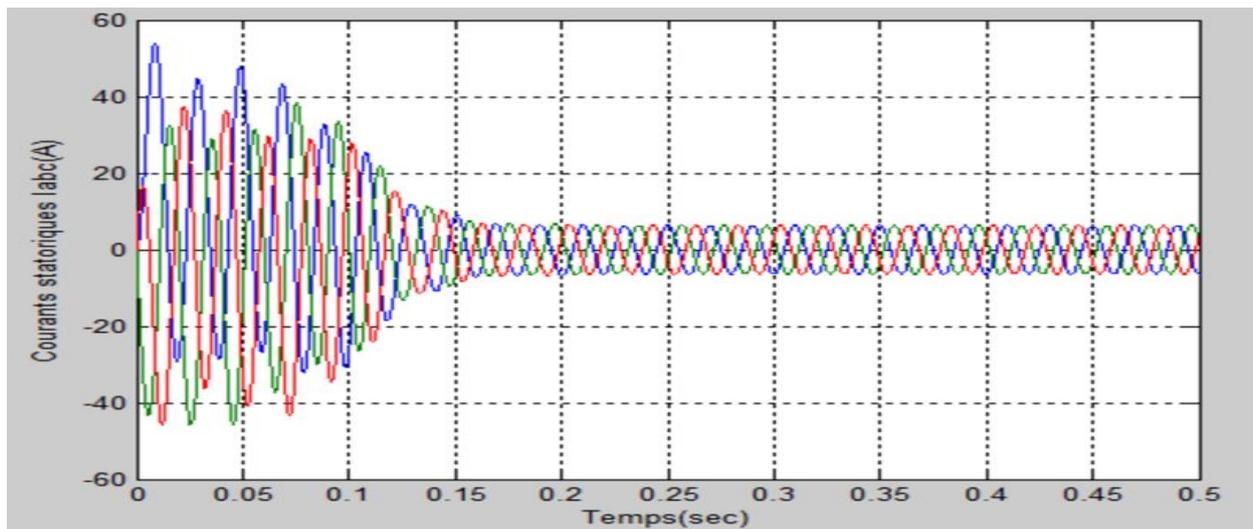


Figure 3.7 : les courants statoriques  $I_{abc}(A)$

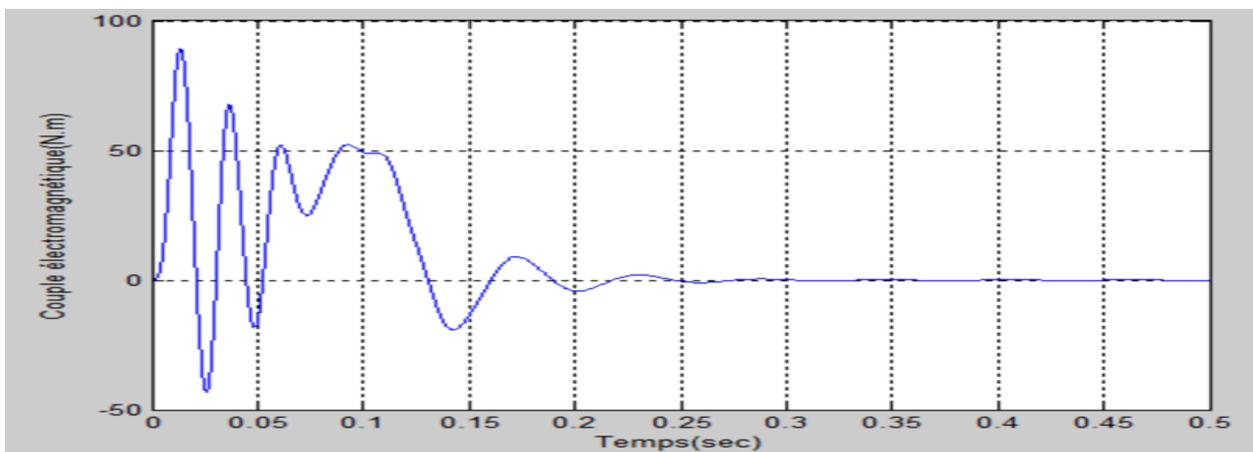


Figure 3.8: Couple électromagnétique (N.m)

### Chapitre III : Modélisation et simulation de la MAS à l'état sain

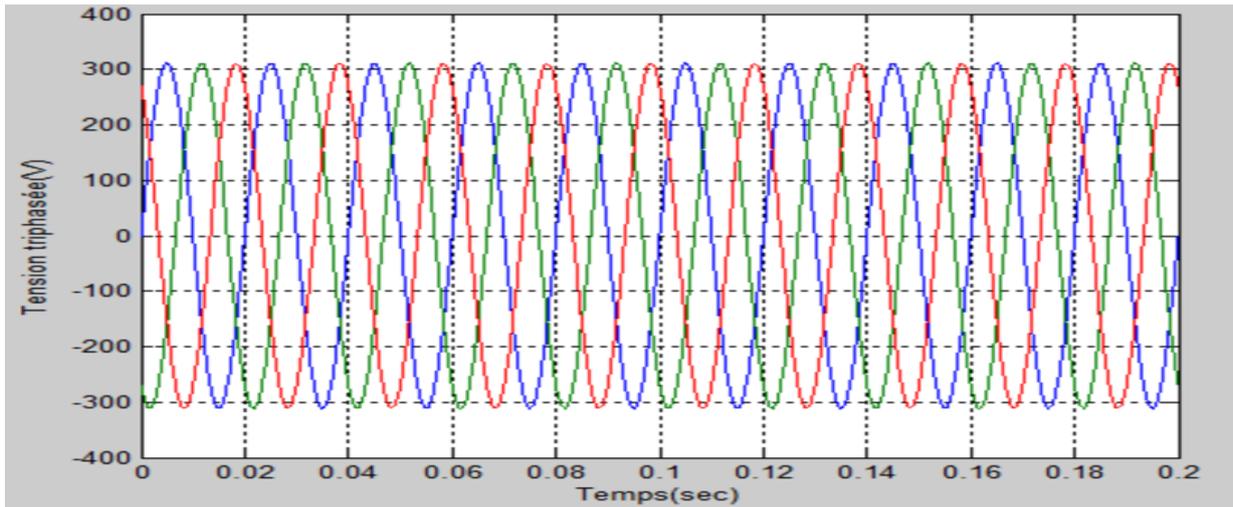


Figure 3.9 : Tension triphasée  $V_{abc}$  alimentant la MAS en (V)

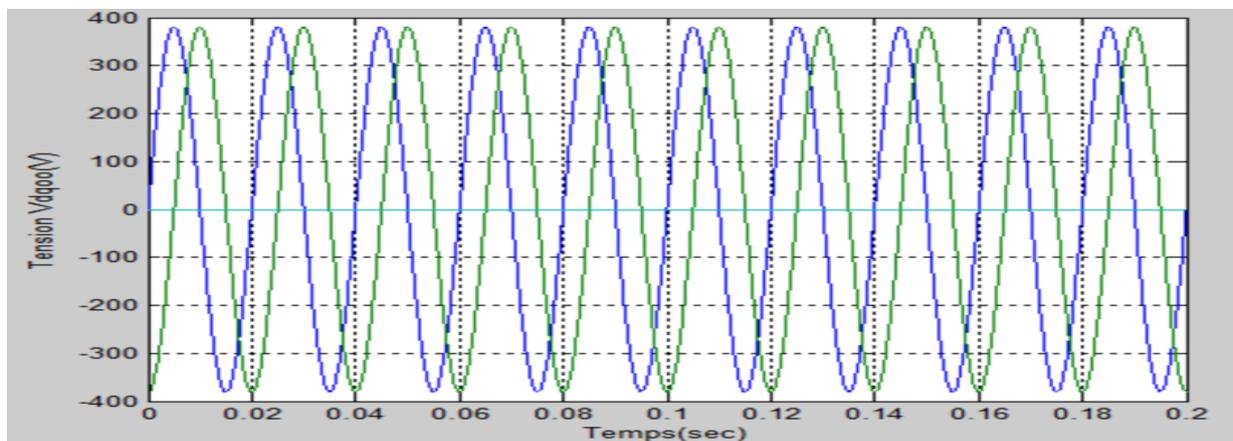


Figure 3.10 : Tension  $V_{dq00}$  alimentant la MAS en (V)

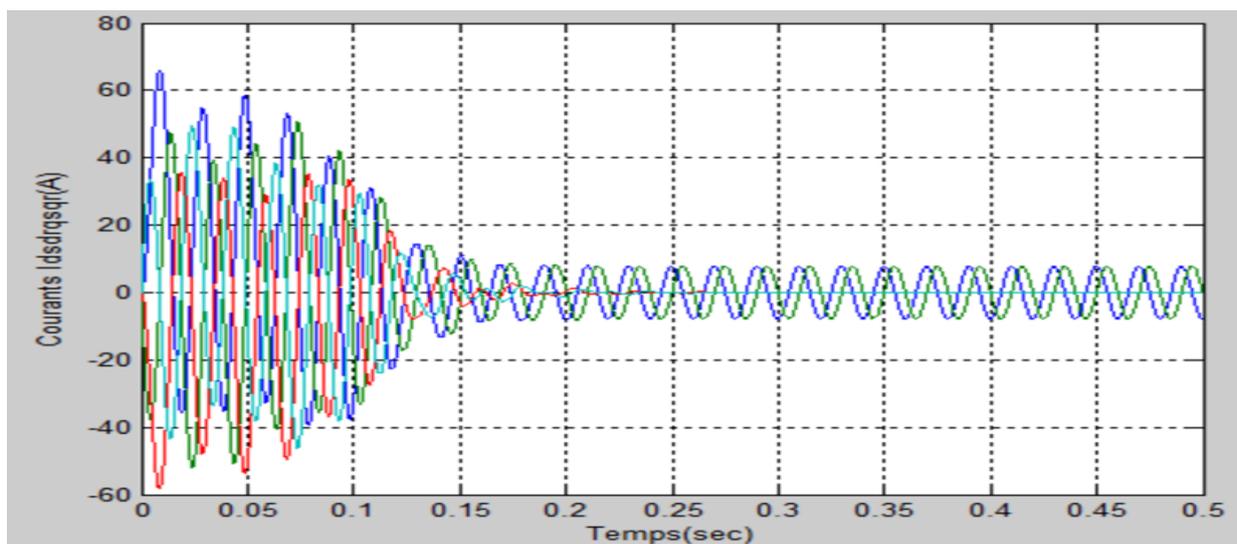


Figure 3.11 : courants  $I_{dsdrqsqr}$  (A)

### Chapitre III : Modélisation et simulation de la MAS à l'état sain

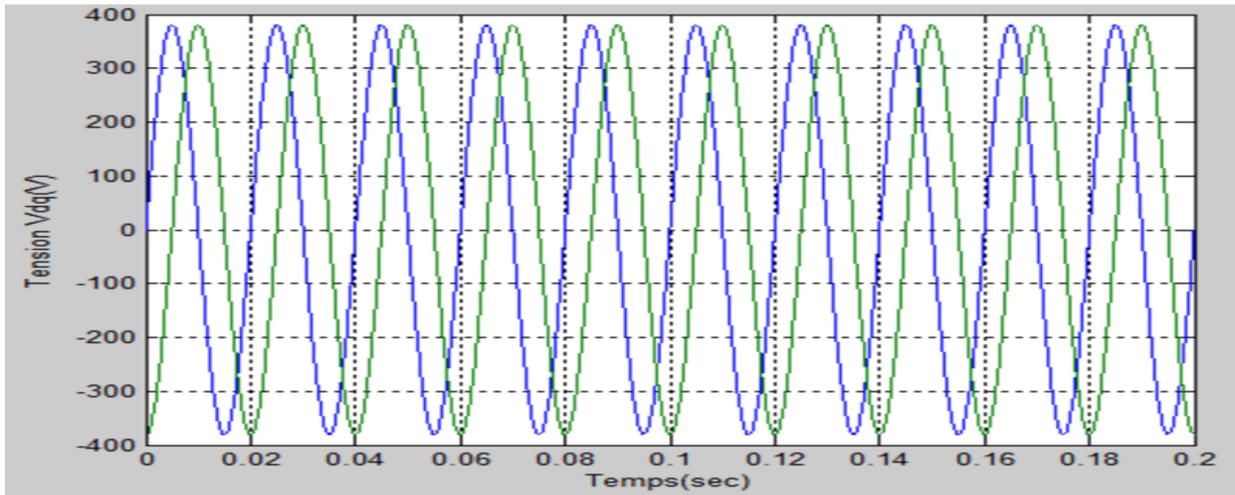


Figure 3.12 : Tension  $V_{dq}$ (V)

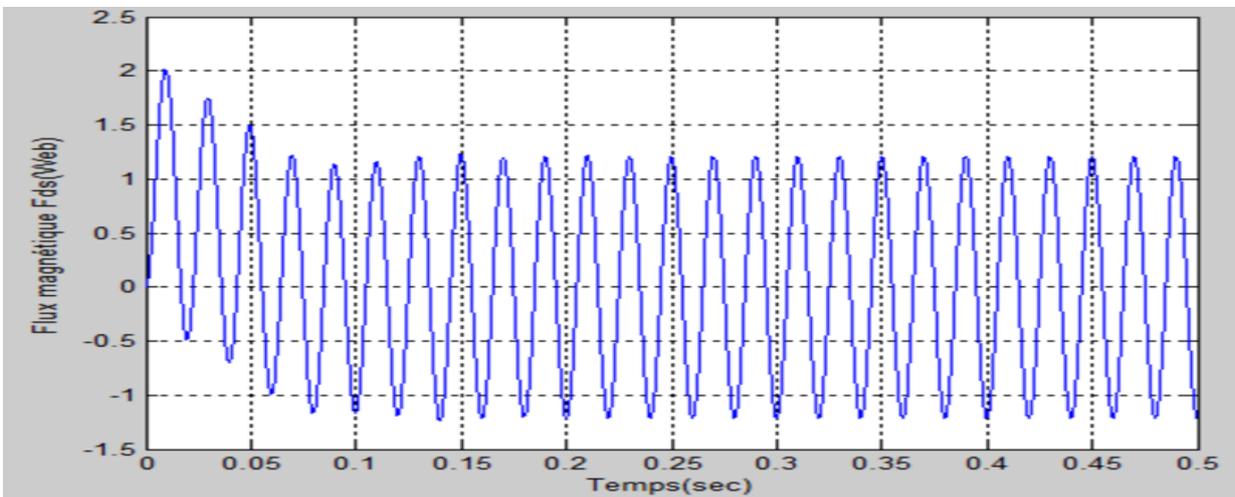


Figure 3.13 : Flux magnétique  $F_{as}$  (Web)

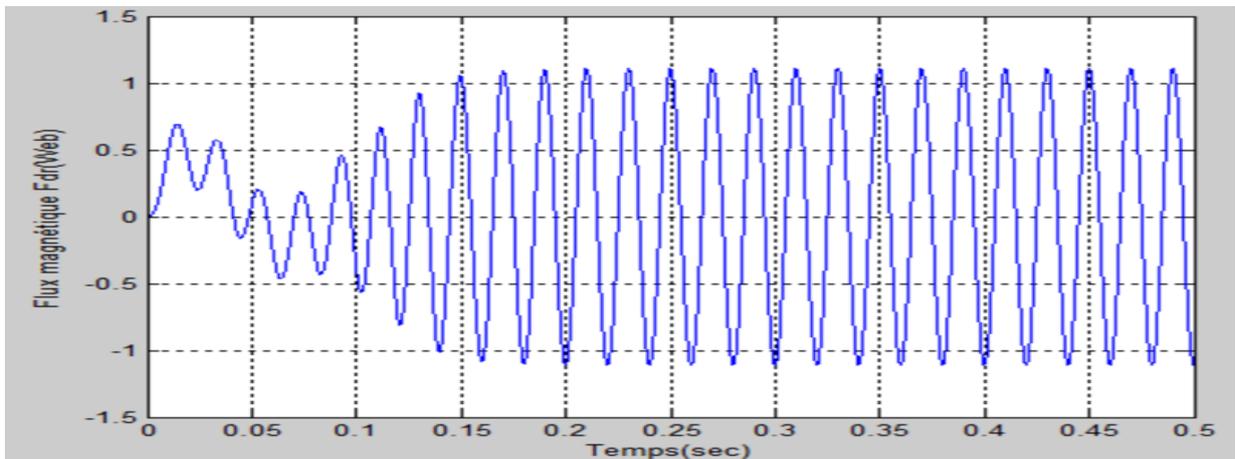


Figure 3.14 : Flux magnétique  $F_{ar}$ (Web)

III.6.2. Simulation en charge :  $C_r=10$  ; [N.m]

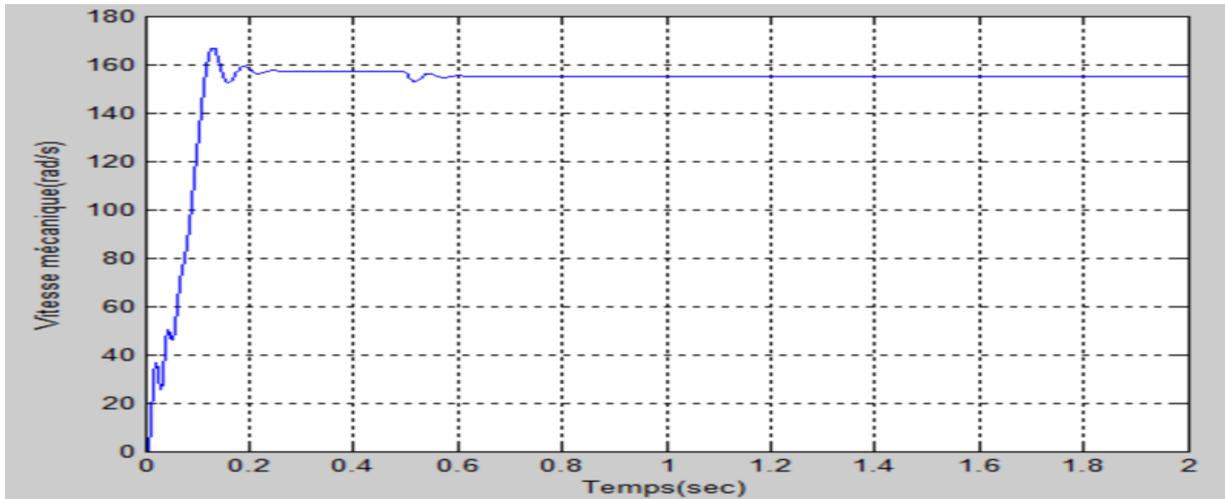


Figure 3.15: la Vitesse mécanique (rad/s)

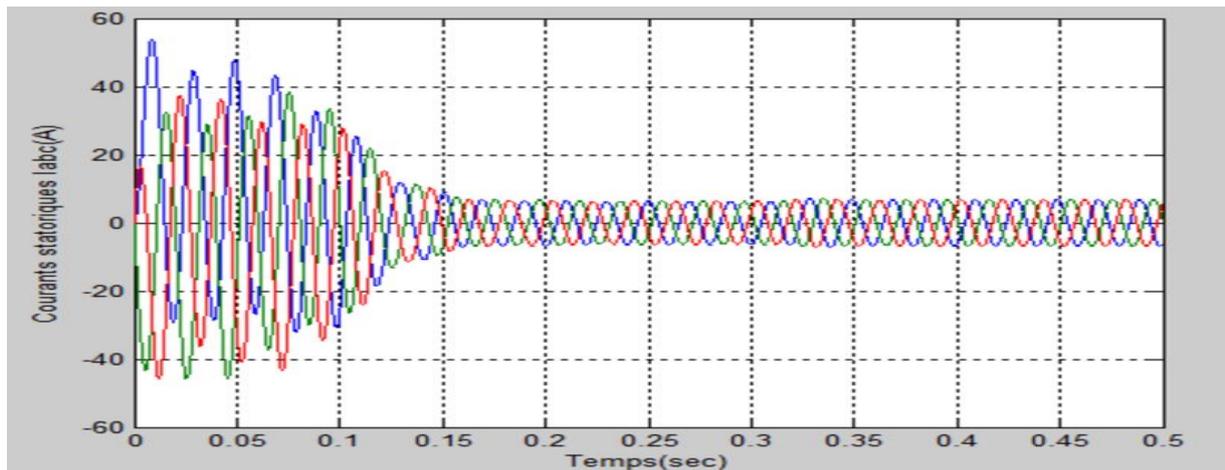


Figure 3.16 : les courants statoriques  $I_{abc}$  (A)

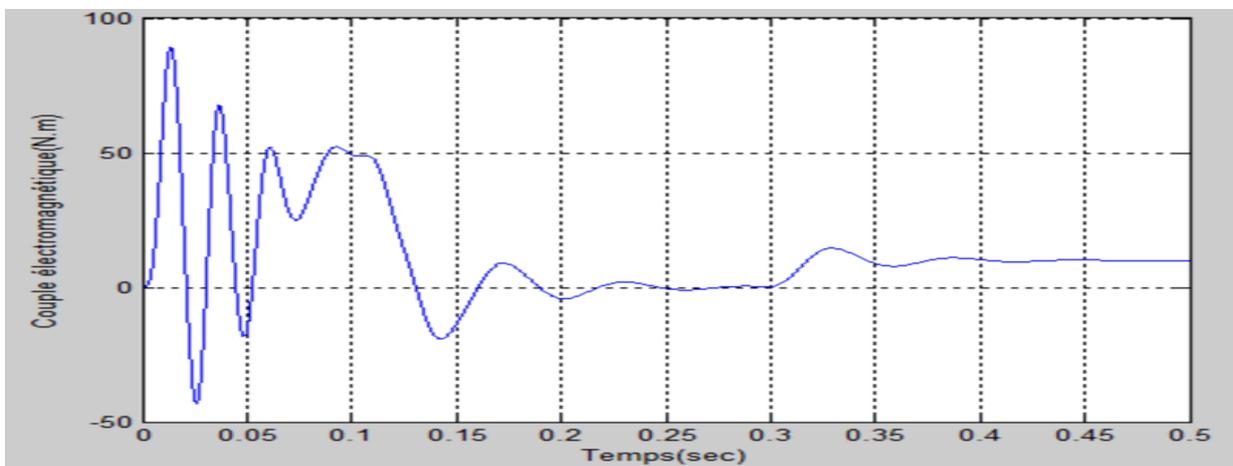


Figure 3.17: Couple électromagnétique (N.m)

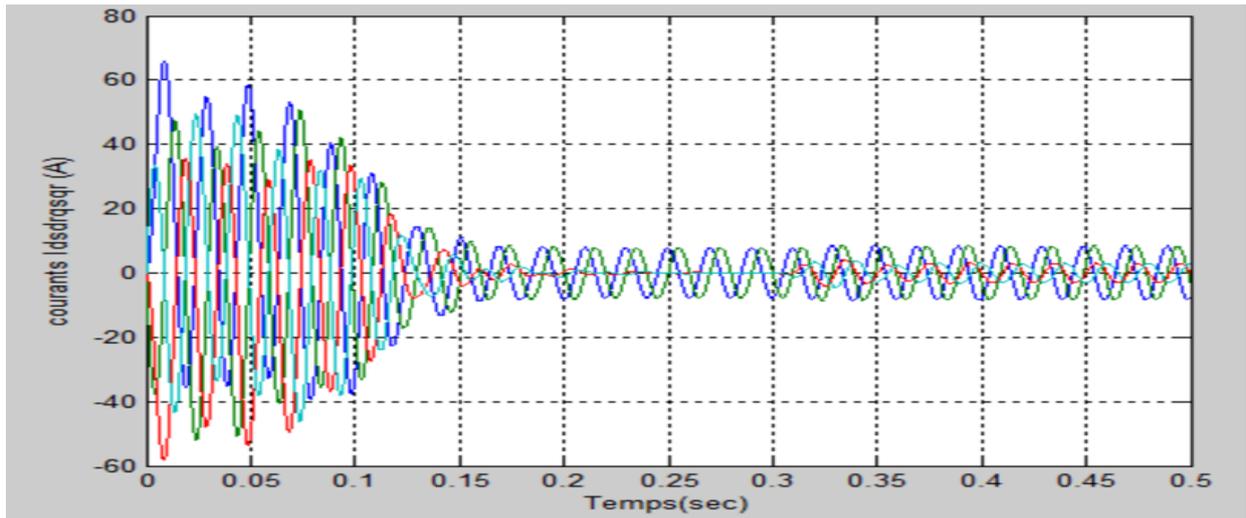


Figure 3.18 : courants  $I_{dsdrqsqr}$  (A)

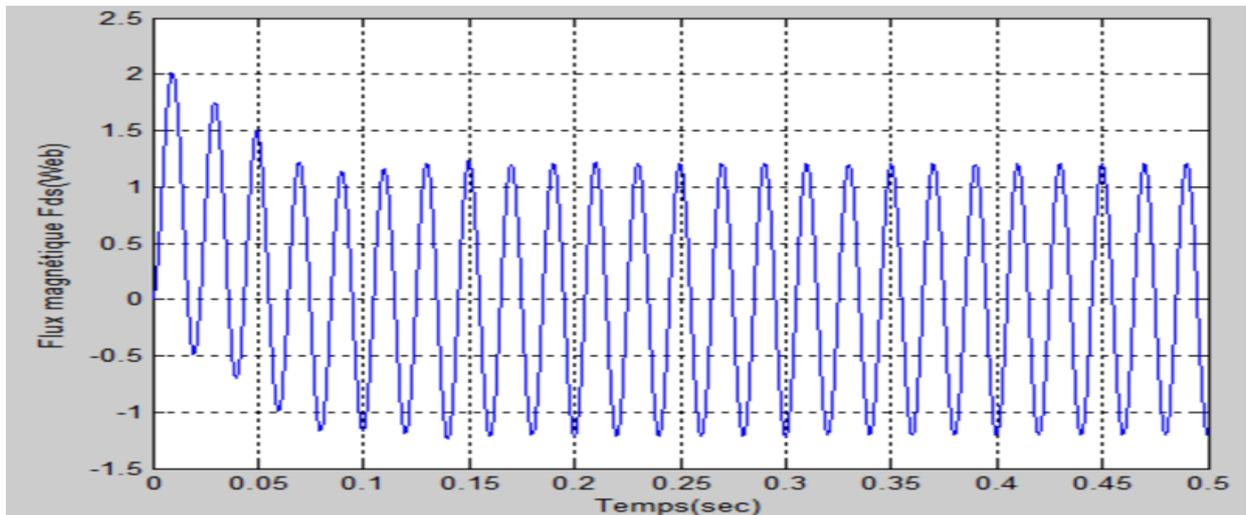


Figure 3.19 : Flux magnétique  $F_{ds}$ (Web)

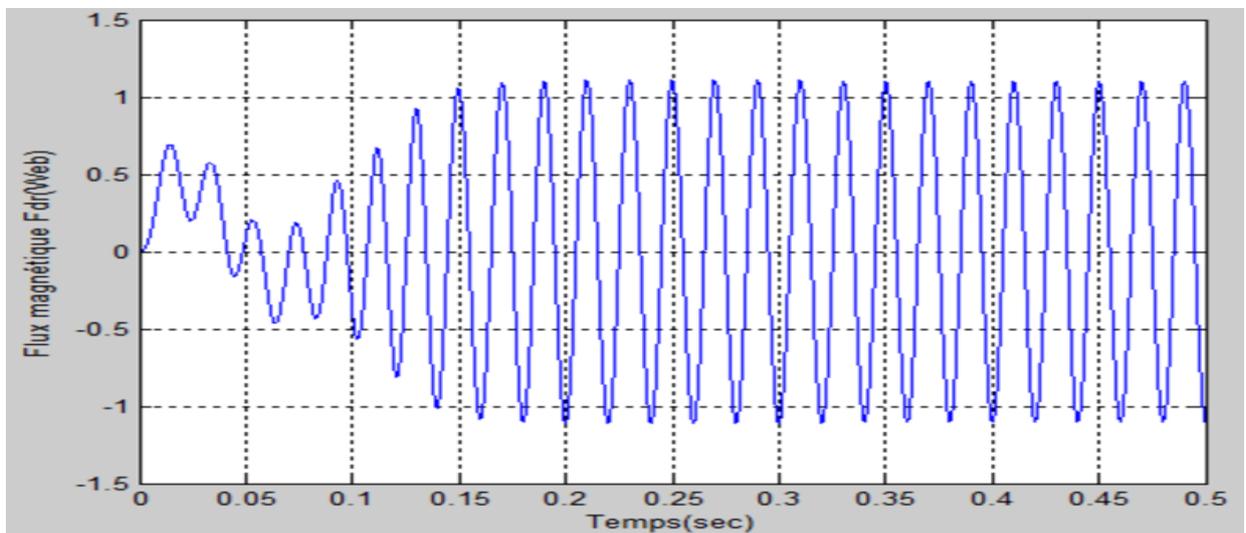


Figure 3.20 : Flux magnétique  $F_{dr}$  (Web)

### III.6.3. Interprétation des résultats :

Les figures (III.6) jusqu'à (III.14) illustre les résultats obtenus pour un démarrage à vide, et les figures (III.15) jusqu'à (III.20) représente les résultats de simulation en charge.

#### A vide :

La courbe de la vitesse des oscillations dans le premier instant de démarrage avec un accroissement presque linéaire, après un temps d'environ 0.2sec la vitesse de rotation stabilise à une valeur constante (158rad/s) puisque le moteur possède 2 paires de pole.

La courbe de couple se présente aux premiers instants du démarrage une pulsation très important, ce qui explique le bruit engendré par la partie mécanique après 0.25 sec le couple tend vers zéro en régime permanent.

Les courants statoriques présentent des oscillations successives autour de zéro avec une amplitude maximale jusqu'à 0.2 sec, après ce temps l'amplitude de ces oscillations est diminuée jusqu'à 10A.

#### En charge :

On note ici que l'introduction d'un couple de charge a provoqué une diminution de la vitesse de rotation.

### III.7. Conclusion :

Ce travail présente la modélisation et la simulation d'un moteur asynchrone à cage par le logiciel MATLAB/SIMULINK. Ce type de moteur s'est imposé dans l'industrie grâce à sa robustesse et sa simplicité de construction ; en revanche sa simulation est difficile, car le modèle est fortement non linéaire. Actuellement, la disponibilité de puissants outils informatiques de calcul permet de surmonter cette difficulté. Le processus de démarrage du moteur, suivi de l'application d'une charge entraînée a été modélisé et simulé. Les résultats obtenus démontrent la justesse du modèle développé. D'autres régimes de fonctionnement du moteur peuvent être facilement étudiés.

Et maintenant on a sur le point de réalisation du quatrième chapitre qui prend en charge l'étude d'une machine asynchrone avec l'existence des pannes.

# **Chapitre IV : Modélisation et simulation de la MAS dédié au diagnostic des défauts.**

### IV.1. Introduction :

La modélisation et la simulation des machines électriques constituent une étape primordiale en matière de diagnostic. Elles permettent la compréhension du fonctionnement défectueux et la vérification des algorithmes de détection des défauts. Elles nous permettent aussi, de construire des bases de données sur les manifestations électriques et magnétiques de ces défauts. Il est important donc, de synthétiser un modèle adapté au problème à traiter, décrivant le comportement de la machine non pas de la façon moyenne, comme pour la commande, mais d'une façon la plus fine possible. Donc la modélisation des machines électriques est une étape aussi bien pour le concepteur. Elle permet l'observation et l'analyse des différentes évolutions de ses grandeurs électromécaniques d'une part et d'autre part pour l'élaboration d'un diagnostic. Un modèle basé sur les équations électriques et mécaniques des circuits est en générale suffisant pour faire la synthèse du diagnostic. La simplicité de la formulation algébrique conduit à des temps de simulation courts. En outre, la précision de la modélisation est acceptable. Les méthodes classiques d'étude de ce type de machine utilisent des modèles simples dans le repère (d, q), négligeant un certain nombre de phénomènes. Ces modèles sont fréquemment affectés par les transformations et le changement d'axes de référence, ce qui conduit à des interprétations théoriques qui ne peuvent pas être utilisées pour analyser des effets localisés tels que les cassures des barres rotoriques de la machine en les distinguant des effets provenant d'autres incidents. D'autre part, ces modèles sont imprécis et ne décrivent qu'un fonctionnement sain de la machine [53]. Ainsi, il a fallu s'orienter vers des modèles plus sophistiqués (modèle multi - enroulements) pour une description adaptée aux défauts. La modélisation décrite dans ce chapitre a pour objet de permettre la représentation d'une rupture de barres pour une machine asynchrone à cage.

### IV.2. Modèle multi enroulements de la machine asynchrone :

Dans le cadre du diagnostic de la machine, les objectifs d'un modèle de simulation sont cependant différents, ce qui a motivé la mise au point de nouveaux modèles, spécifiquement dédiés à la simulation des défauts [54] [55].

L'objectif est de procéder à un développement d'un modèle de la machine asynchrone qui mette en évidence l'influence des défauts étudiés sur les grandeurs mesurables de la machine, principalement les courants, afin d'étudier les phénomènes mis en jeu. Deux approches sont possibles. La première

## Chapitre IV : Modélisation et simulation de la MAS dédié au diagnostic des défauts.

(élément fini). S'appuie sur la distribution des champs et des courants en tout point de la machine et permet de simuler son fonctionnement en régime de défaut [54] [53]. Cette méthode est coûteuse en temps de calcul et nécessite la connaissance des paramètres géométriques et des caractéristiques des matériaux relatifs au moteur asynchrone. La seconde approche, retenue ici, consiste à interpréter la machine du point de vue de la théorie des circuits. Pour faciliter la simulation et la mise au point des problèmes de ruptures de barres et d'anneaux de court-circuit, nous avons modélisé le rotor par des mailles reliées entre elles électriquement et couplées magnétiquement [40][55][56].

En considérant les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Entrefer lisse et constant, (effet d'excentricité négligeable, champ radial) ;
- Perméabilité relative du fer très grande ;
- Distribution sinusoïdale de la force magnétomotrice statorique ;
- Pas de saturation, effet pelliculaire nul, courants de Foucault négligeables hors des barres rotoriques.

En plus de ces hypothèses, on suppose que le stator est sain, de constitution symétrique.

### IV.2.1. Calcul des inductances :

#### IV.2.1.1. Partie Statorique :

En appliquant le théorème d'Ampère sur un contour fermé, la circulation du champ magnétique  $H$  créée par une  $i^{\text{ème}}$  phase statorique en un point quelconque peut être calculée.

D'après le théorème d'Ampère on a : [55][53][40] :

$$\oint H dl = \frac{N_s I_s}{p} \quad (4.1)$$

$N_s$  : Nombre de spires statoriques par phase ;

$p$  : Nombre de paires de pôles ;

$I_s$ : Courant d'une phase statorique.

Partant de l'expression (2-1) l'induction maximale dans l'entrefer est égale :

$$B_{\max} = \mu_0 \frac{N_s I_s}{2.P.e} \quad (4.2)$$

Avec :

## Chapitre IV : Modélisation et simulation de la MAS dédié au diagnostic des défauts.

$e$  : entrefer [m]

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  Perméabilité magnétique du vide [ $H.m^{-1}$ ]

La décomposition de l'induction en série de Fourier fournit le fondamental :

$$B_s(\theta) = \frac{2\mu_0 N_s I_s}{e \cdot \pi \cdot p} \cos(p\theta) \quad (4.3)$$

Par conséquent, le flux magnétique dans l'entrefer, par pôles, est obtenu par intégration de l'expression (2-3). Autour d'un intervalle polaire le long de la machine.

$$\Phi_s = \iint_s B_s ds = \int_0^t dz \int_{-\frac{\pi}{2\pi}}^{\frac{\pi}{2\pi}} B_s R \cdot l \cdot d\theta$$

On obtient :

$$\Phi_s = \frac{4}{\pi} \mu_0 \frac{N_s^2}{e \cdot p^2} R \cdot l \cdot I_s \quad (4.4)$$

D'où le flux principal de l'enroulement statorique [53] :

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

$$\text{Donc : } \psi_{sa} = L_{sp} I_s \quad (4.5)$$

L'inductance principale (magnétisante) de la phase "n" statorique d'après (4-5) est donnée donc par [56][40] :

$$L_{sp} = 4\mu_0 \frac{N_s^2}{e \cdot p^2 \pi} R \cdot l \quad (4.6)$$

Le flux de fuites est donné par :

$$\Phi_{fs} = L_{fs} \cdot I_s \quad (4.7)$$

L'inductance cyclique  $L_{sc}$ :

$$L_{sc} = \frac{3}{2} L_{sp} + L_{sf} = \frac{6 \cdot \mu_0 \cdot N_s^2 \cdot R \cdot l}{e \cdot p^2 \cdot \pi} + L_{sf} \quad (4.8)$$

Du fait que les enroulements statoriques sont symétriques (décalés d'un angle de  $\frac{2\pi}{3}$ )

## Chapitre IV : Modélisation et simulation de la MAS dédié au diagnostic des défauts.

Les inductances mutuelles propres entre les trois phases s'écrivent :

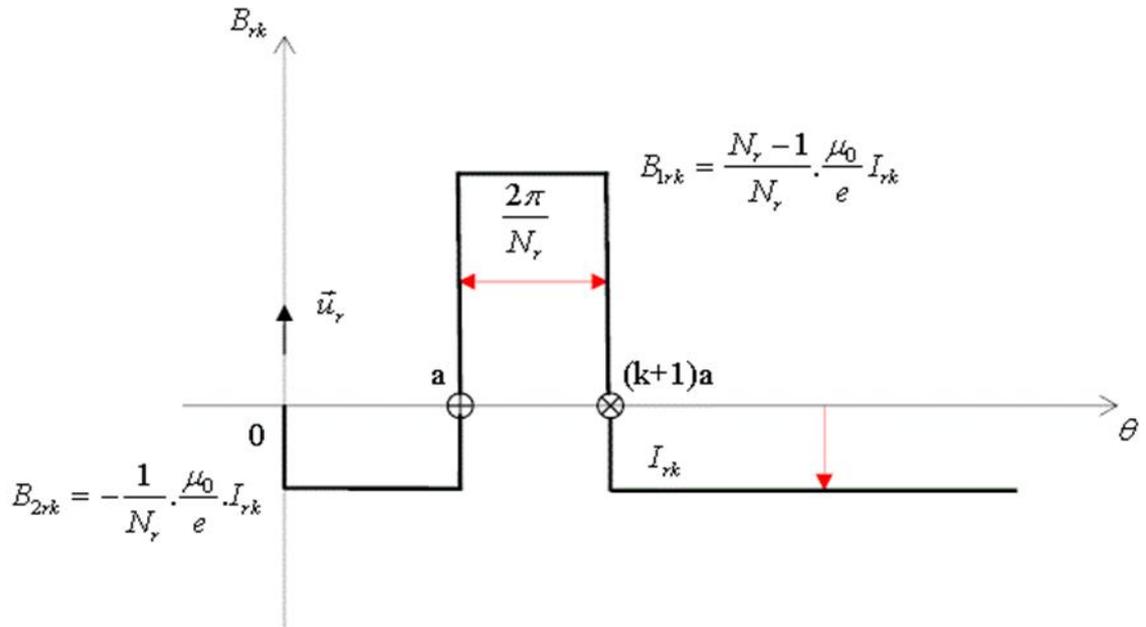
$$\left\{ \begin{array}{l} L_{ab} = L_{sp} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) = -\frac{L_{sp}}{2} \\ L_{ac} = L_{sp} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) = -\frac{L_{sp}}{2} \\ L_{bc} = L_{sp} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) = -\frac{L_{sp}}{2} \end{array} \right.$$

Avec :

$$\left. \begin{array}{l} L_{ab}=L_{ba} \\ L_{ac}=L_{ca} \\ L_{bc}=L_{cb} \end{array} \right\} = M_s = -\frac{L_{sp}}{2}$$

### IV.2.1.2. Partie rotorique :

La figure (4.1) représente, en fonction de «  $\theta$  », l'allure de l'induction magnétique, supposée radiale, produite par une maille rotorique  $k$  dans l'entrefer.



**Figure 4.1** : induction magnétique produite par une maille du rotor

$N_r$  : Nombre de barres rotoriques ;

$i_{rk}$  : Courant dans la boucle [A],  $k=1, \dots, N_r$  ;

$B_k$  : Induction magnétique dans l'entrefer produit par une maille rotorique « k ».

Le rotor est décomposé en circuits élémentaires (mailles) constitués de deux barres et de deux portions d'anneaux les reliant à chaque extrémité. Cette topologie des circuits rotoriques nous permettra de calculer leurs inductances [40] [55] [54].

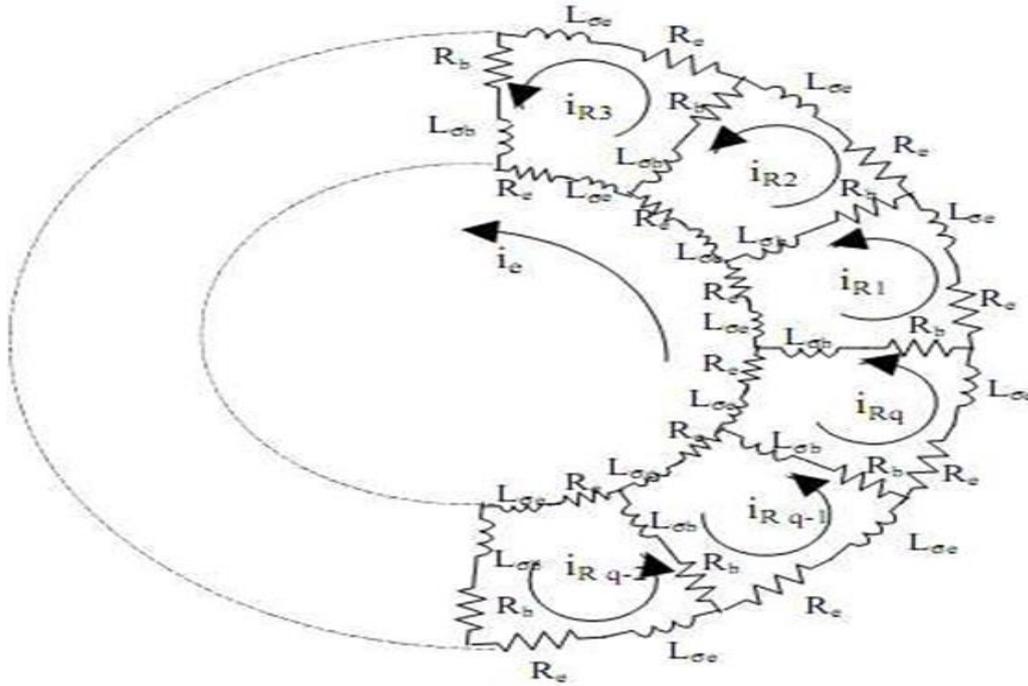


Figure 4.2 : Structure de la cage du rotor

Considérant chaque maille rotorique constituée d'une bobine à une seule spire, parcourue par un courant  $i_{rk}$ , est le siège d'un flux principal exprimé par :

$$\Phi_{rpk} = \int_0^{\left(\frac{2\pi}{N_r}\right)} B_{2rk} R.l. d(\theta)$$

$$\Phi_{rpk} = \frac{N_r - 1}{N_f^2} \mu_0 \frac{2\pi R l}{e} i_{rk} \quad (4.9)$$

Par la suite, l'inductance principale d'une maille rotorique est :

$$L_{rp} = \frac{N_r - 1}{N_f^2} \frac{\mu_0}{e} 2 \cdot \pi \cdot R \cdot l \quad (4.10)$$

L'inductance totale de la  $k^{eme}$  maille rotorique est égale à la somme de son inductance principale, des inductances de fuite des deux barres et des inductances de fuite des deux portions d'anneaux de court-circuit refermant la maille k. Donc l'expression est donnée par :

$$L_{rr} = L_{rp} + 2L_b + 2L_e \quad (4.11)$$

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

## Chapitre IV : Modélisation et simulation de la MAS dédié au diagnostic des défauts.

$$\Phi_{rjrk} = \int_0^t dz \int_{j_a}^{(j+1)a} B_{2rk} R. l. d(\theta)$$

$$\Phi_{rjrk} = \int_0^t dz \int \left[ -\frac{1}{N_r} \frac{\mu_0}{e} R. l. i_{rk} \right] d(\theta) \quad (4.12)$$

Donc, l'inductance mutuelle entre mailles rotoriques non adjacentes (disjointes) est exprimée par la relation suivante :

$$M_{rr} = -\frac{1}{N_r^2} \frac{\mu_0}{e} 2\pi. l. R \quad (4.13)$$

L'inductance mutuelle entre la k<sup>ème</sup> maille et les mailles adjacentes est donnée par :

$$L_{(k+1)k} = -\frac{1}{N_r^2} \frac{\mu_0}{e} 2\pi. l. R. L_{b(K+1)}$$

$$L_{r(k-1)k} = -\frac{1}{N_r^2} \frac{\mu_0}{e} 2\pi. l. R. L_{b(k-1)} \quad (4.14)$$

### IV.2.1.3. Mutuelle inductance entre stator et rotor :

La figure (4.3) indique les bases géométriques de l'expression du flux mutuel entre l'enroulement d'une phase "n" au stator et un circuit élémentaire "k" au rotor.

La transformation dans le repère lié au rotor de l'équation (4.3), donne :

$$B_{msr} = \frac{2\mu_0 N_s i_s}{e.p.\pi} \cos\left(p\theta - n\frac{\pi}{3}\right) \quad (4.15)$$

Avec : n= (1, 2,3)

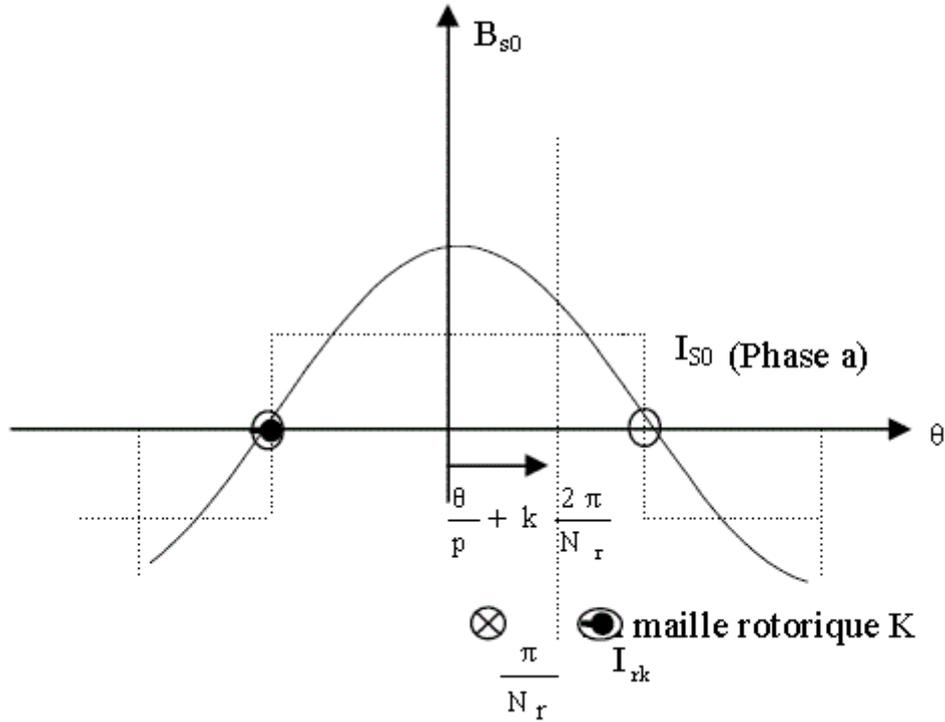


Figure 4.3 : flux mutuel –phase statorique –boucle rotorique

L'induction produit par la bobine statorique de la phase n induit dans la maille rotorique k le flux :

$$\Phi_{smrk} = -\frac{2\mu_0}{\pi \cdot e \cdot p} N_s R \cdot I \cdot i_{sm} \frac{1}{p} \left[ \sin \left( p\theta - n \frac{2\pi}{3} \right) \right]_{-\left( \frac{\theta}{\pi} + k \frac{2\pi}{N_r} + \frac{\pi}{N_r} \right)}^{+\left( \frac{\theta}{\pi} + k \frac{2\pi}{N_r} + \frac{\pi}{N_r} \right)} \quad (4.16)$$

L'inductance mutuelle entre la phase "n" du stator et la « k<sup>ème</sup> » maille rotorique est donnée donc par :

$$M_{rkm} = -M_{sr} \cos \left( p\theta - n \frac{2\pi}{3} + ka \right) \quad (4.17)$$

Avec :

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

$a = p \frac{2\pi}{N_r}$  : L'angle électrique entre deux mailles rotoriques

De même, les inductances mutuelles entre la « k<sup>ème</sup> » maille et les phases "b" et "c", sont exprimées par:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{rka} = M_{sr} \cos(p\theta + ka) \\ M_{rkb} = M_{sr} \cos\left(p\theta + ka - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{rkc} = M_{sr} \cos\left(p\theta + ka + \frac{2\pi}{3}\right) \end{array} \right.$$

### IV.3. Mise en équations :

Le but de la mise en équations est d'effectuer une simulation numérique. Nous recherchons donc, l'ensemble des équations différentielles indépendants définissant le modèle de la machine.

#### IV.3.1. Equations statoriques :

Les équations de tension et du flux statorique sont :

$$\begin{cases} [V_{abc}] = [R_s][I_{abc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{abc}] \\ [\Phi_{abc}] = [L_s][I_{abc}] + [M_{sr}][I_{rk}] \end{cases} \quad (4.18)$$

Avec :

$$\begin{aligned} [V_{abc}] &= [V_a \quad V_b \quad V_c]^t \\ [I_{abc}] &= [I_a \quad I_b \quad I_c]^t \\ [I_{rk}] &= [I_{r0} \quad I_{r1} \quad \dots \quad I_{r(N_r-1)}]^t \\ [\Phi_{abc}] &= [\Phi_a \quad \Phi_b \quad \Phi_c]^t \end{aligned}$$

La matrice des résistances statorique :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix}$$

La matrice d'inductance statorique s'écrit :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{sp} + L_{sf} & M_s & M_s \\ M_s & L_{sp} + L_{sf} & M_s \\ M_s & M_s & L_{sp} + L_{sf} \end{bmatrix}$$

La matrice des inductances mutuelles entre phases statoriques et mailles rotoriques s'écrit [RIT94] [BAG9] :

$$[M_{Sr}] = \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & -M_{Sr} \cos(\theta_r + Ka) & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & -M_{Sr} \cos(\theta_r + Ka) & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & -M_{Sr} \cos(\theta_r + Ka) & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

Avec :  $K=0, 1, 2, \dots, N_r - 1$ .

### IV.3.2. Equations rotoriques :

Le modèle multi-enroulement, permet de mieux se rapprocher de la structure réelle de la cage rotorique. Le rotor est assimilé à un enroulement polyphasé de  $(N_r+1)$  mailles, chaque maille est constituée de deux barres adjacentes et de deux portions des deux anneaux de court-circuit. La figure IV .3 illustre la modélisation du rotor par son schéma électrique équivalent.

Ce découpage est largement suffisant pour l'étude des ruptures de barres ou d'anneaux. Par contre, la prise en compte des courants inters barres nécessiterait d'affiner encore le circuit.

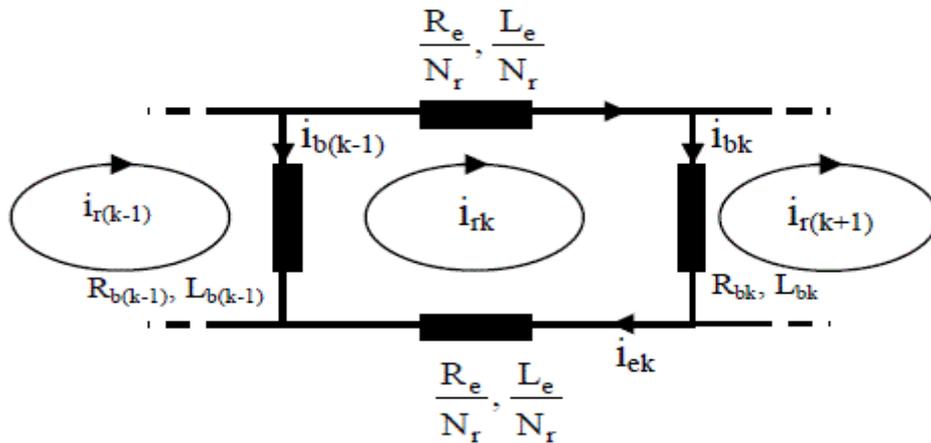


Figure 4.4 : Schéma électrique équivalent des mailles rotoriques.

Sachant que :

Pour le nœud  $n^0_1$  :

$$i_{bk} = i_{rk} - i_{r(k+1)} \quad (4.19)$$

Pour le nœud  $n^0_2$  :

$$i_{b(k-1)} = i_{r(k-1)} - i_{rk} \quad (4.20)$$

L'équation de la tension pour une maille 'k' de la cage rotorique est donnée par :

## Chapitre IV : Modélisation et simulation de la MAS dédié au diagnostic des défauts.

$$\frac{R_e}{N_r} i_{rk} - R_{b(k-1)} \cdot i_{b(k-1)} + \frac{R_e}{N_r} i_{ek} i_{bk} + \frac{d}{dt} \Phi_{rk} = 0 \quad (4.21)$$

Le flux totalisé  $\Phi_{rk}$  pour un circuit élémentaire k est composé de la somme des termes suivants :

- le flux principal :

$$\Phi_{rp} = L_{rp} I_{rk}$$

- le flux mutuel avec les autres circuits du rotor :

$$\Phi_{rr} = M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^{N_r-1} I_{rj}$$

- le flux mutuel avec le stator :

$$\Phi_{sr} = M_{sr} \left[ \cos(\theta_r + Ka) : \cos\left(\theta_r + Ka - \frac{2\pi}{3}\right) : \cos\left(\theta_r + Ka - \frac{4\pi}{3}\right) \right]$$

L'équation (4.21) devient donc :

$$0 = R_{bk} I_{r(k-1)} + \left( 2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b(k-1)} + R_{bk} \right) I_{rk} - R_{bk} I_{r(k+1)} - \frac{R_e}{N_r} I_e + \frac{d\Phi_{rk}}{dt}$$

D'où :

$$\Phi_{rk} = \left( L_{rp} + 2 \frac{L_e}{N_r} + 2L_b \right) I_{rk} - M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^{N_r-1} I_{rj} - L_b (I_{r(k-1)} + I_{r(k+1)}) - \frac{L_e}{N_r} I_e - M_{sr} \left[ \cos(\theta_r + Ka) : \cos\left(\theta_r + Ka - \frac{2\pi}{3}\right) : \cos\left(\theta_r + Ka - \frac{4\pi}{3}\right) \right] [I_{abc}]. \quad (4.22)$$

Avec :

$$K = 0, \dots, N_r - 1$$

Il faut compléter le système d'équations des circuits du rotor par celle de l'anneau de court-circuit :

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

De la même façon on utilise les équations de  $I_{e(k)}$  et  $I_{bk}$  et on trouve :

$$\frac{R_e}{N_r} \sum_{k=1}^{N_r} I_{r(k)} + \frac{L_e}{N_r} \sum_{k=1}^{N_r} \frac{d}{dt} I_{r(k)} - I_e \frac{d}{dt} I_e - R_e I_e = 0 \quad (4.23)$$

### IV.3.3. Equation d'état de la machine :

Le système est mis sous la forme canonique suivante :

$$[V] = [R][I] + [L] \cdot \frac{d}{dt} [I] + \frac{d[L]}{dt} [I] \quad (4.24)$$

Avec :

$[V] = [V_a \ V_b \ V_c \ ; \ 0 \ 0 \dots\dots 0 \ ; \ 0]^t$  : Le vecteur global des tensions  $((N_r + 4) \times 1)$ . Il contient les trois tensions statoriques et les «  $N_r$  » tensions des mailles rotoriques, ainsi que la tension de l'anneau de court-circuit

$[I] = [i_a \ i_b \ i_c \ ; \ i_{r0} \ i_{r1} \ \dots i_{rk} \ \dots i_{r(N_r-1)} \ ; \ i_e]^t$  : Le vecteur global des courants  $((N_r+4) \times 1)$ . Il contient les trois courants statoriques et les  $N_r$  courants des mailles rotoriques, ainsi que le courant de l'anneau de court-circuit.

La matrice globale des résistances est :

$$[R] = \begin{bmatrix} [R_s]_{3 \times 3} & : & [0]_{3 \times (N_r+1)} \\ \dots\dots & \dots\dots & \dots\dots \\ [0]_{(N_r+1) \times 3} & : & [R_r]_{(N_r+1) \times (N_r+1)} \end{bmatrix}$$

La matrice des résistances rotoriques.

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_{b0} + R_{b(N_r-1)} + 2 \frac{R_e}{N_r} & -R_{b0} & \dots & 0 & \dots & \dots & -R_{b(N_r-1)} & : & -\frac{R_e}{N_r} \\ \vdots & \vdots \\ 0 & \vdots & -R_{b(k-1)} & R_{bk} + R_{b(k-1)} + 2 \frac{R_e}{N_r} & -R_{bk} & \vdots & 0 & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ -R_{b(N_r-1)} & \vdots & 0 & \vdots & \vdots & -R_{b(N_r-2)} & R_{b(N_r-2)} + 2 \frac{R_e}{N_r} & \vdots & -\frac{R_e}{N_r} \\ \dots\dots & \dots\dots \\ -\frac{R_e}{N_r} & \dots\dots & \dots\dots & \dots\dots & \dots\dots & \dots\dots & -\frac{R_e}{N_r} & \dots\dots & R_e \end{bmatrix}$$

La matrice globale des inductances est donnée par :

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_s]_{3 \times 3} & : & [M_{sr}]_{3 \times (N_r+1)} \\ \dots\dots & \dots\dots & \dots\dots \\ [M_{sr}]_{(N_r+1) \times 3} & : & [N_r]_{(N_r+1) \times (N_r+1)} \end{bmatrix}$$

La matrice des inductances rotoriques :

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & M_{rr} - L_b & \dots & \dots & M_{rr} & \dots & M_{rr} - L_b & \dots & -\frac{L_e}{N_r} \\ \vdots & \vdots \\ M_{rr} - L_b & \dots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots \\ M_{rr} - L_b & \dots & M_{rr} & \dots & \dots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & \dots & -\frac{L_e}{N_r} \\ \dots & \dots \\ -\frac{L_e}{N_r} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & -\frac{L_e}{N_r} & \dots & L_e \end{bmatrix}$$

La dérivée de la matrice globale des inductances est :

$$\frac{d[L]}{dt} = \begin{bmatrix} [0] & \frac{d[M_{sr}]}{dt} \\ \frac{d[M_{sr}]^t}{dt} & [0] \end{bmatrix}$$

#### IV.3.4. Transformation de Park :

Pour obtenir un système d'équations à coefficients constants, il est usuel de faire appel à une transformation dite transformation de Park. Elle permet le passage du repère réel triphasé (a, b, c) au repère d'axe (h, d, q).

Le système de grandeurs triphasées est tel que la somme instantanée des grandeurs est nulle. Ceci permet d'annuler la composante homopolaire. Par conséquent, le repère (h, d, q) peut être réduit à un repère biphasé (d, q).

La matrice de Park modifiée est définie par :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos\theta & -\sin\theta \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

La dérivée de la matrice de Park est :

$$\frac{d}{dt}[P(\theta)] = -\omega \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 0 & \sin\theta & \cos\theta \\ 0 & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ 0 & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

## Chapitre IV : Modélisation et simulation de la MAS dédié au diagnostic des défauts.

On définit la matrice globale de Park de dimension  $(N_r + 4) \times (N_r + 4)$  comme :

$$[T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)] & : & [0] \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ [0]^T & : & [1]_{(N_r+1) \times (N_r+1)} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

Sachant que :

$$[V] = [T][V_{tr}]$$

Avec :

$$[V_{tr}] = [V_{0s} \ V_{ds} \ V_{qs} \ ; \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ ; \ 0]^t.$$

Le vecteur global des tensions de dimensions  $(N_r+4)$ , il contient les tensions statoriques dans le repère de Park et les «  $N_r$  » tensions des mailles rotoriques, ainsi que la tension de l'anneau de court-circuit.

$$[I] = [T][I_{tr}]$$

Avec :

$$[I_{tr}] = [i_{0s} \ i_{ds} \ i_{qs} \ ; \ i_{r0} \ \dots \ i_{rk} \ \dots \ i_{r(N_r-1)} \ ; \ i_e]^t.$$

Le vecteur global des courants de dimensions  $(N_r+4)$ .

L'équation (4.24) devient :

$$\begin{aligned} [T][V_{tr}] &= [R][T][I_{tr}] + \frac{d[L]}{dt}[T][I_{tr}] + [L]\frac{d[T]}{dt}[I_{tr}] + [L][T]\frac{d[I_{tr}]}{dt} \\ [V_{tr}] &= \left( [T]^{-1}[R][T] + [T]^{-1}\frac{d[L]}{dt}[T] + [T]^{-1}[L]\frac{d[T]}{dt} \right) [I_{tr}] + [T]^{-1}[L][T]\frac{d[I_{tr}]}{dt} \\ [V_{tr}] &= (A + B + C)[I_{tr}] + D\frac{d[I_{tr}]}{dt} \end{aligned}$$

Avec les termes A, B, C, D donnés par :

$$A = [T]^{-1}[R][T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1}[R_s][P(\theta)] & : & [0] \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ [0] & : & [R_r] \end{bmatrix}$$

## Chapitre IV : Modélisation et simulation de la MAS dédié au diagnostic des défauts.

$$B = [T]^{-1}[L] \frac{d[T]}{dt} = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1}[L_s] \frac{d[P(\theta)]}{dt} & \vdots & [0] \\ \dots & \dots & \dots \\ [M_{sr}] \frac{d[P(\theta)]}{dt} & \vdots & [0] \end{bmatrix}$$

$$C = [T]^{-1}[L] \frac{d[T]}{dt} = \begin{bmatrix} [0] & \vdots & [P(\theta)]^{-1} \frac{d[M_{sr}]}{dt} \\ \dots & \dots & \dots \\ [P(\theta)] \frac{d[M_{sr}]}{dt} & \vdots & [0] \end{bmatrix}$$

$$D = [T]^{-1}[L][T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1}[L_s][P(\theta)] & \vdots & [P(\theta)]^{-1}[M_{sr}] \\ \dots & \dots & \dots \\ [M_{sr}]^T [P(\theta)] & \vdots & [L_r] \end{bmatrix}$$

La mise en équation du modèle de la machine conduit à un système complet de dimension  $(N_r + 4)$  :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{0s} \\ \dots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} = [R_{tr}] \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{0s} \\ \dots \\ I_{r1} \\ \vdots \\ I_{r(N_r-1)} \\ \dots \\ I_e \end{bmatrix} + [L_{tr}] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{0s} \\ \dots \\ I_{r1} \\ \vdots \\ I_{r(N_r-1)} \\ \dots \\ I_e \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

$[R_{tr}]$  Et  $[L_{tr}]$  sont les matrices globales des résistances et des inductances après la transformation de Park.

A ces équations, on ajoute les équations électromagnétiques (4.28) et (4.29) afin d'avoir la vitesse électrique et la position électrique « $\theta_r$  » du rotor.

$$\frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (C_e - C_r - K_0 \Omega_r) \quad (4.28)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_r = \Omega_r \quad (4.29)$$

### IV.3.5. Equation mécanique :

La puissance absorbée de la machine asynchrone s'écrit :

$$P_e = V_a i_a + V_b i_b + V_c i_c = V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs} + V_{0s} i_{0s}$$

Posons :

$$[X_{dq0}] = \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} \quad \text{Et} \quad [X_{abc}] = \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix}$$

Avec :

$X=(i, v, \Phi)$  et  $\Phi$  est le flux d'induction totalisé dans l'enroulement.

Soit  $[P]$  la matrice de transformation directe, de telle sorte que :

$$[X_{dq0}] = [P] \cdot [X_{abc}]$$

Dans ces conditions, la puissance instantanée a pour expression

$$[P_e] = [V_{abc}]^t [i_{abc}] = [V_{dq0}]^t [I_{dq0}] \quad (4.30)$$

$$[V_{dq0}] = [R_s] [i_{dq0}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{dq0}] + [P] \frac{d[P]^{-1}}{dt} [\Phi_{dq0}] \quad (4.31)$$

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} - \omega_s \Phi_{ds} \\ V_{0s} = R_s I_{0s} + \frac{d}{dt} \Phi_{0s} \end{cases}$$

$$P_e = (R_s \cdot I_{ds}^2 + R_s \cdot I_{qs}^2) + I_{sd} \left( \frac{d\Phi_{sd}}{dt} \right) + I_{sq} \left( \frac{d\Phi_{sq}}{dt} \right) + \omega_{er} (I_{qs} \cdot \Phi_{sq} - \Phi_{sq} \cdot I_{sd})$$

$$P_e = \left( R_s I_{ds}^2 + \left( \frac{d}{dt} \Phi_{ds} \right) I_{ds} - \omega_{er} \Phi_{qs} I_{ds} \right) + \left( R_s I_{qs}^2 + \left( \frac{d}{dt} \Phi_{qs} \right) I_{qs} + \omega_{er} \Phi_{ds} \right) + \left( R_s I_{0s}^2 + \left( \frac{d}{dt} \Phi_{0s} \right) I_{0s} \right)$$

a) La puissance dissipée en pertes Joule est :

$$P_J = R_s (I_{ds}^2 + I_{qs}^2)$$

b) La puissance représentant les échanges d'énergie électromagnétique est :

$$P_V = I_{ds} \left( \frac{d\Phi_{ds}}{dt} \right) + I_{qs} \left( \frac{d\Phi_{qs}}{dt} \right)$$

c) La puissance mécanique  $P_m$  est :

$$P_m = \omega (\Phi_{ds} I_{qs} - \Phi_{qs} I_{ds})$$

Or la puissance mécanique est égale à «  $C_e \Omega$  » on à  $\frac{C_e \omega}{P}$ . On en tire l'expression scalaire du couple.

$$C_e = P [\Phi_{ds} I_{qs} - \Phi_{qs} I_{ds}] \quad (4.32)$$

On remplace  $\Phi_{ds}$  et  $\Phi_{qs}$  par ces expressions et on obtient :

$$C_e = \frac{3}{2} P \cdot M_{sr} \left( I_{ds} \sum_{k=0}^{N_r-1} I_{r(k)} \sin(k \cdot a) - I_{qs} \sum_{k=0}^{N_r-1} I_{r(k)} \cos(k \cdot a) \right). \quad (4.33)$$

#### **IV.4. Modèle de taille réduit :**

La représentation du système par l'expression (4.27) fait apparaître un système d'ordre très élevé car il est constitué de nombre de phases statoriques, du nombre de phases rotoriques et des équations électromécaniques [40] [57].

Nous avons appliqué une transformation de Park étendue au système rotorique de manière à transformer ce système à  $N_r$  phases en un système (d, q).

Nous pouvons définir un vecteur d'état  $[X]$  qui, après l'application de cette matrice de transformation, donnera :

$$[X_{odqs}] = [T(\theta_s)] [X_{abcs}] \Rightarrow [X_{abcs}] = [T(\theta_s)]^{-1} [X_{odqs}]$$

$$[X_{odqs}] = [T_{3N_r}(\theta_r)] [X_{rk}] \Rightarrow [X_{rk}] = [T_{3N_r}(\theta_r)]^{-1} [X_{odqr}]$$

## Chapitre IV : Modélisation et simulation de la MAS dédié au diagnostic des défauts.

Soit la partie statorique

$$[V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt} \{ [L_s][i_s] \} + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}][i_{rk}] \} \quad (4.34)$$

L'application de la transformation donne :

$$\begin{aligned} [V_{odqs}] &= \{ [T(\theta_s)][R_s][T(\theta_s)]^{-1} \} [i_{odqs}] + \{ [T(\theta_s)][L_s][T(\theta_s)]^{-1} \} \frac{d}{dt} [i_{odqs}] \\ &+ \left\{ [T(\theta_s)][L_s] \frac{d}{dt} [T(\theta_s)]^{-1} \right\} [i_{odqs}] \\ &+ \{ [T(\theta_s)][M_{sr}][T_{3Nr}(\theta_R)]^{-1} \} \frac{d}{dt} [i_{odqr}] \\ &+ \left\{ [T(\theta_s)] \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}][T_{3Nr}(\theta_R)]^{-1} \} \right\} [i_{odqr}] \end{aligned}$$

Pour la partie rotorique :

$$[V_r] = [R_r][i_{rk}] + \frac{d}{dt} \{ [L_r][i_{rk}] \} + \frac{d}{dt} \{ [L_r][i_{rk}] \} + \frac{d}{dt} \{ [M_{rs}][i_s] \} \quad (4.35)$$

Nous obtenons de la même façon :

$$\begin{aligned} [V_{odqr}] &= \{ [T(\theta_R)][R_r][T(\theta_R)]^{-1} \} [i_{odqr}] + \{ [T(\theta_R)][L_r][T(\theta_R)]^{-1} \} \frac{d}{dt} [i_{odqr}] \\ &+ \left\{ [T(\theta_R)][M_{sr}] \frac{d}{dt} [T(\theta_R)]^{-1} \right\} \frac{d}{dt} [i_{odqr}] \\ &+ \left\{ [T(\theta_R)] \frac{d}{dt} [M_{rs}][T(\theta_R)]^{-1} \right\} [i_{odqs}] \end{aligned}$$

En choisissant un référentiel lié au rotor, les relations angulaires peuvent s'écrire :  $\theta_s = \theta_r$  et  $\theta_R = 0$

Après simplifications nous obtenons un modèle de taille réduite pour la machine asynchrone.

## Chapitre IV : Modélisation et simulation de la MAS dédié au diagnostic des défauts.

$$\begin{bmatrix} L_{sc}I_2 & -\frac{N_r M_{sr}}{2}I_2 & \vdots & 0 \\ -\frac{3 M_{sr}}{2}I_2 & L_{rdq} & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \vdots & \dots \\ 0 & 0 & \vdots & L_e \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{dqS} \\ i_{dqr} \\ \dots \\ i_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{dqS} \\ V_{dqr} \\ \dots \\ V_e \end{bmatrix} -$$

$$\begin{bmatrix} R_S I_2 + \omega_r L_{sc} J_2 & -\frac{N_r}{2} \omega_r M_{sr} J_2 & \vdots & 0 \\ 0 & R_{rdq} I_2 & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \vdots & \dots \\ 0 & 0 & \vdots & R_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dqS} \\ i_{dqr} \\ \dots \\ i_e \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

Avec :

$$L_{rdq} = L_{rp} - M_{rr} + 2 \frac{L_e}{N_r} + 2L_e(1 - \cos(a)) \quad (4.37)$$

$$R_{rdq} = 2 \frac{R_e}{N_r} + 2R_b(1 - \cos(a)) \quad (4.38)$$

Et :

$$I_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad J_2 = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Dans le cas d'un défaut rotorique, la matrice  $[R_r]$  doit être modifiée. En utilisant la matrice de transformation, nous obtenons une matrice d'ordre 2 pour le rotor.

La matrice de défaut rotorique s'écrit :

$$[R_{rf}] = [R_r] + \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots \\ & \dots & \vdots & \vdots & & \dots \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & & \dots \\ & \dots & & & & \dots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & \dots & 0 & R'_{bk} & -R'_{bk} & \dots \\ 0 & \dots & 0 & -R'_{bk} & R'_{bk} & \dots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & \dots \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

La nouvelle matrice des résistances rotoriques, après transformations, devient :

$$[R_{rfdq}] = [T(\theta_R)][R_{rf}][T(\theta_R)]^{-1} = [T(\theta_R)]\{[R_r] + [R'_r]\}[T(\theta_R)]^{-1}$$

La matrice résistance est :

$$[R_{rfdq}] = \begin{bmatrix} R_{rdd} & R_{rdq} \\ R_{qd} & R_{rqd} \end{bmatrix}$$

## Chapitre IV : Modélisation et simulation de la MAS dédié au diagnostic des défauts.

Où les quatre termes de cette matrice sont :

$$\left[ \begin{array}{l} [R_{rdd}] = 2 \cdot R_b(1 - \cos(a)) + 2 \frac{R_e}{N_r} + \frac{2}{N_r} (1 - \cos(a)) \sum_k R_{bfk}(1 - \cos(2k - 1) a) \\ [R_{rdq}] = -\frac{2}{N_r} (1 - \cos(a)) \sum_k R_{bfk} \cdot \sin(2k - 1)a \\ [R_{rqd}] = \frac{-2}{N_r} (1 - \cos(a)) \sum_k R_{bfk} \cdot \sin(2k - 1)a \\ [R_{rqq}] = 2 \cdot R_b(1 - \cos(a)) + 2 \frac{R_e}{N_r} + \frac{2}{N_r} (1 - \cos(a)) \sum_k R_{bfk}(1 + \cos(2k - 1) a) \end{array} \right. \quad (4.40)$$

L'indice « k » caractérise la barre cassée.

Pour la partie mécanique, après l'application de la transformation généralisée sur l'expression du couple, on obtient :

$$C_e = \frac{3}{2} \cdot P \cdot N_r \cdot M_{sr}(I_{ds} \cdot I_{qr} - I_{qs} \cdot I_{dr}) \quad (4.41)$$

La sous-matrice, relative à la résistance rotorique, est un bon indicateur de la présence d'un défaut. En effet, en cas de défaut  $[R_{rdd}]$  et  $[R_{rqq}]$  ne sont plus égaux comme c'est le cas pour la machine saine. En outre, les termes  $[R_{rdq}]$  et  $[R_{rqd}]$  prennent une valeur non nulle, ce qui témoigne de la présence d'un défaut au rotor. [40][53]

### IV.5. Simulation du modèle de la machine asynchrone :

Une fois le modèle de la machine asynchrone à cage est établi, nous pouvons aborder la simulation de celle-ci en utilisant MATLAB -2009 a- SIMILINK. Cela permet de mettre en évidence le comportement du moteur asynchrone dans le cas où le rotor est défaillant.

#### IV.5.1. Résultats de simulation :

L'évolution du courant statorique et rotoriques, du couple électromagnétique, la vitesse ; en charge avec la rupture d'une barre, deux barres et  $V_c=0$ .

Le démarrage s'effectue à vide sous tension nominale avec une alimentation équilibré.

• Cas de cassure d'une seule barre :

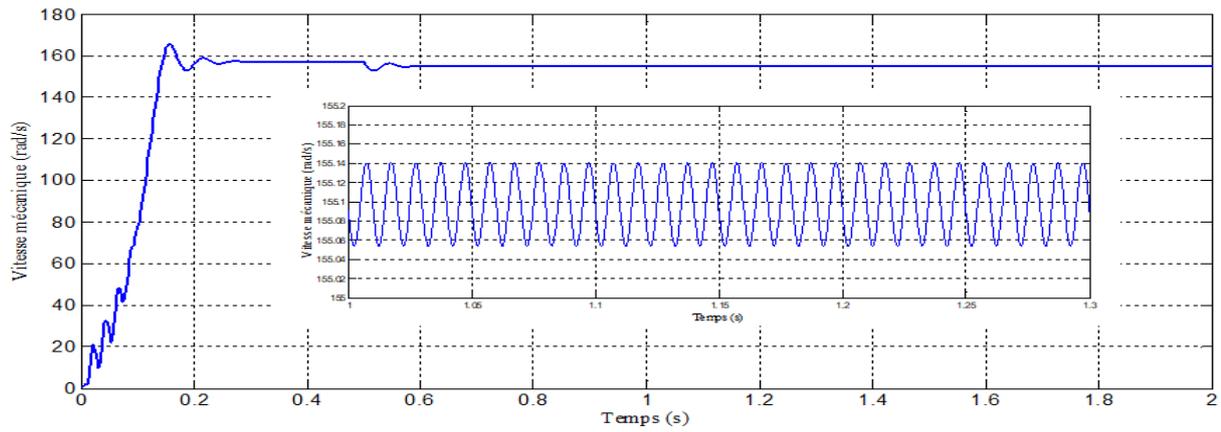


Figure 4.5: la Vitesse mécanique (rad/s)

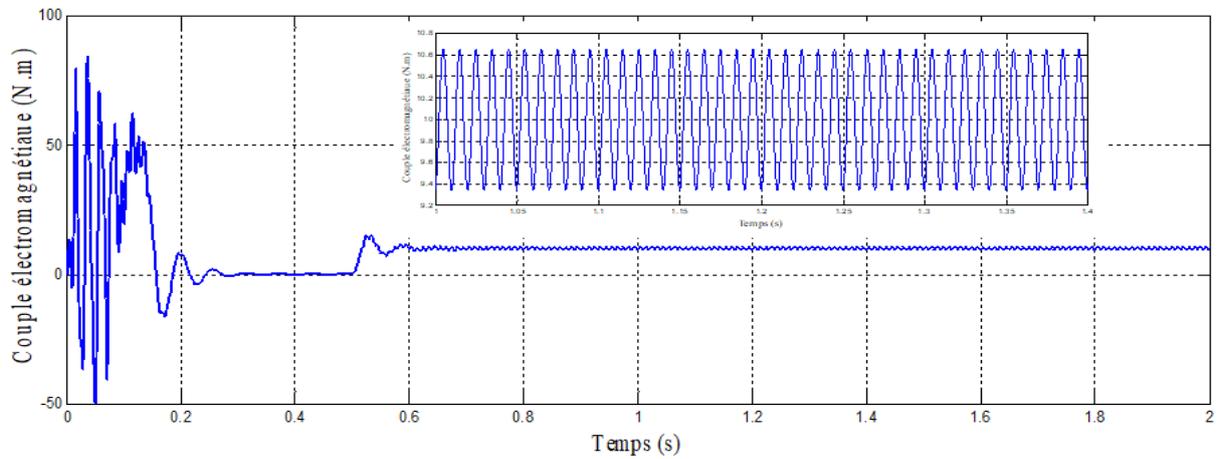


Figure 4.6: Couple électromagnétique (N.m)

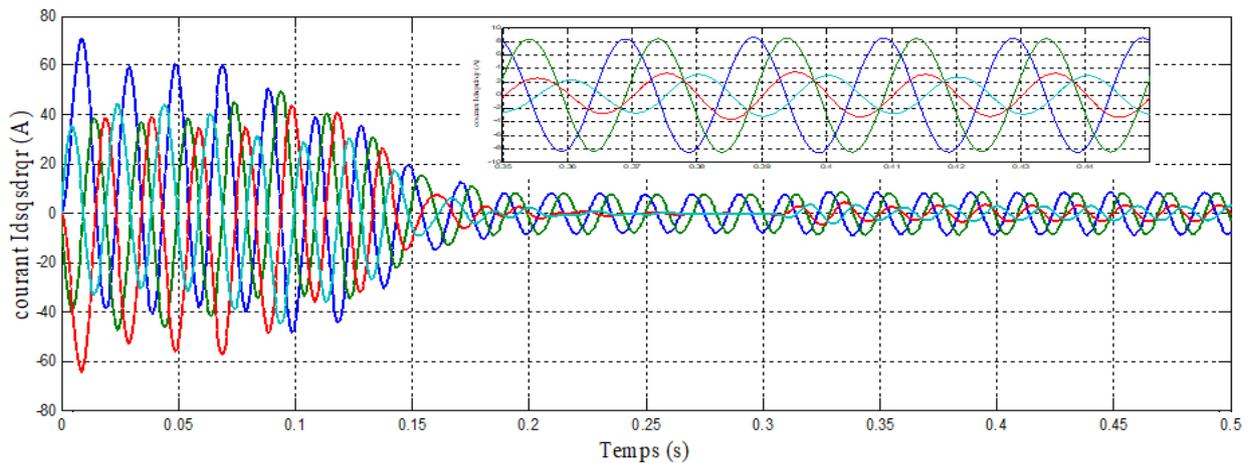


Figure 4.7 : courants  $I_{dsqsdrrq}$  (A)

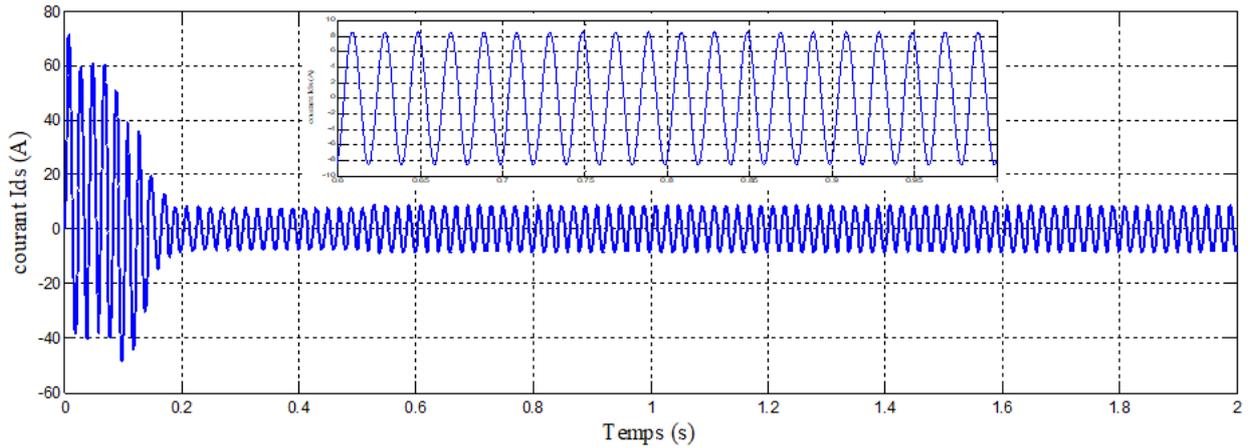


Figure 4.8 : courant  $I_{ds}$  (A)

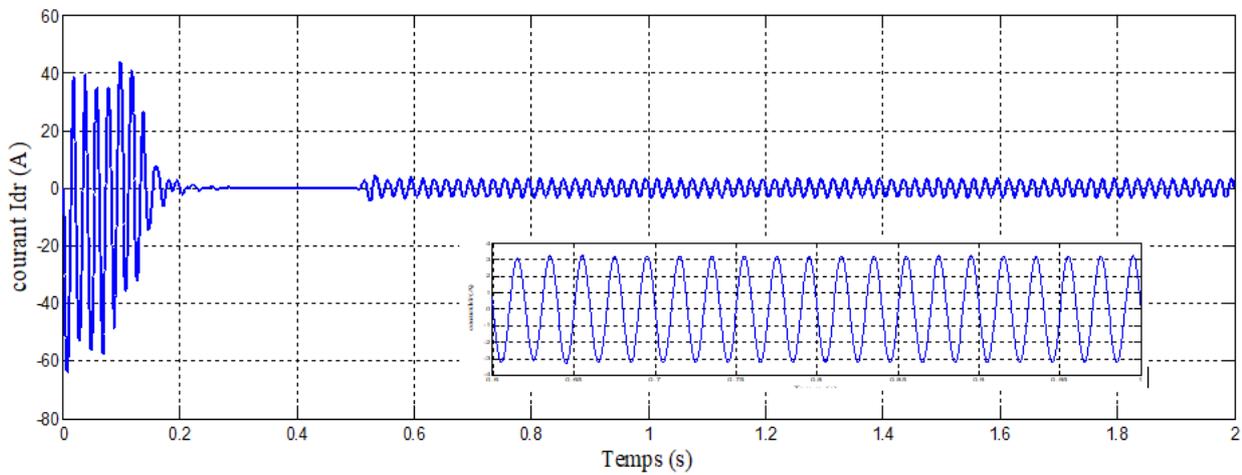


Figure 4.9 : courant  $I_{dr}$  (A)

Fundamental (50Hz) = 3.233 , THD= 0.10%

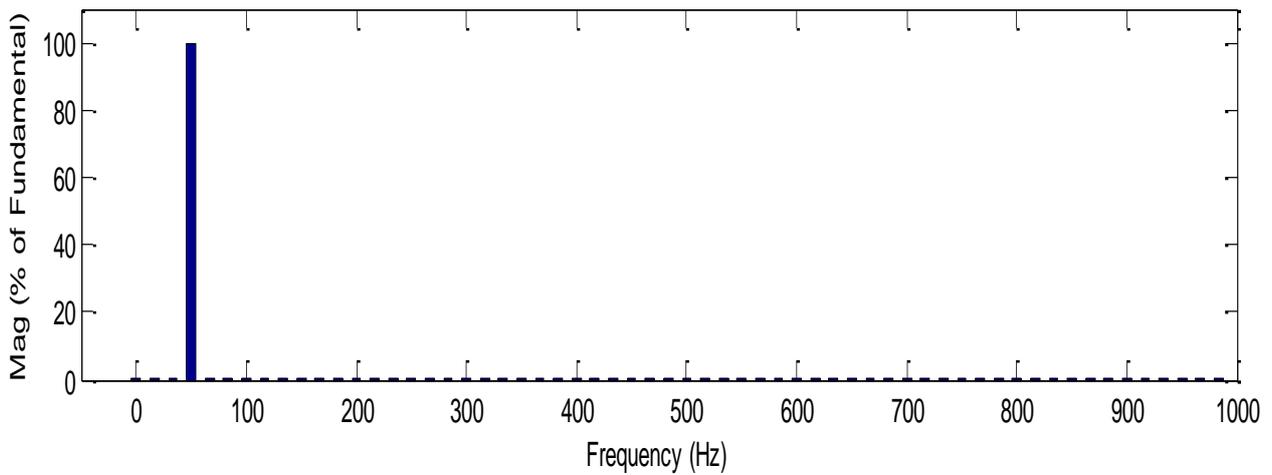


Figure 4.10 : FFT du courant  $I_{dr}$  (A)

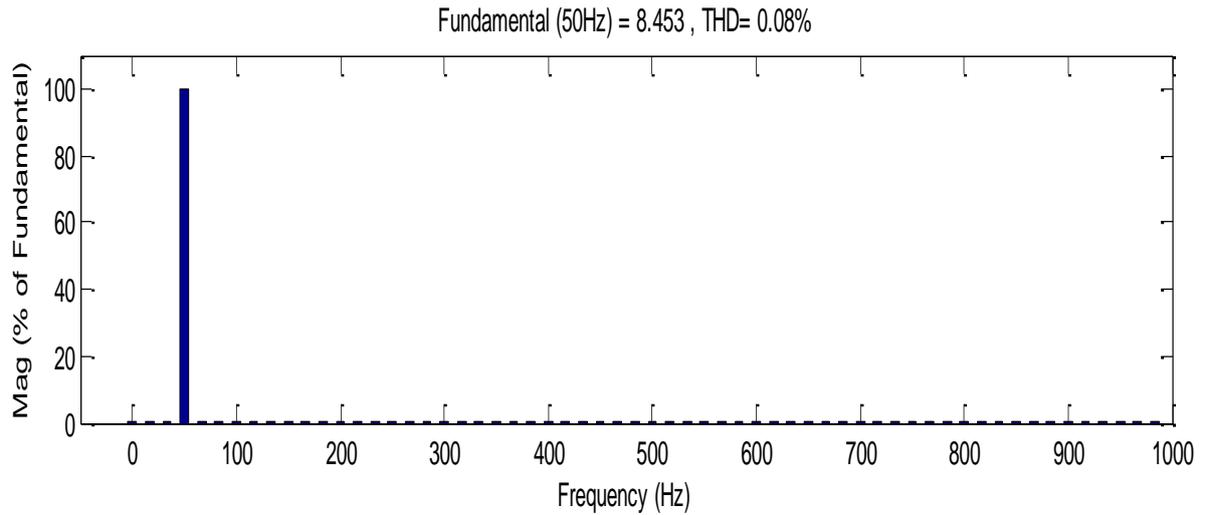


Figure 4.11 : FFT du courant  $I_{qs}$  (A)

• Cas de cassure de deux barres :

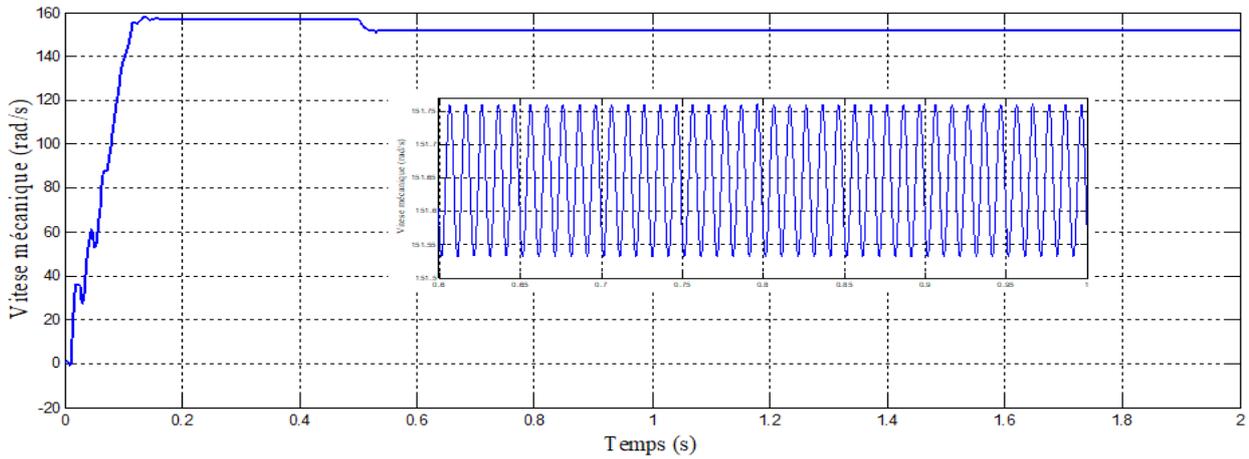


Figure 4.12: la Vitesse mécanique (rad/s)

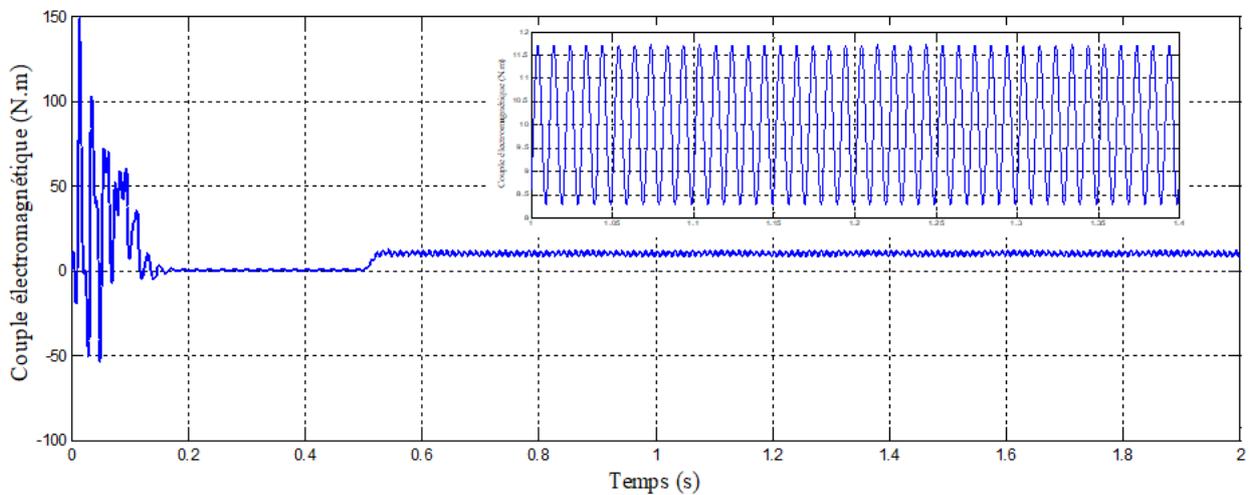


Figure 4.13: Couple électromagnétique (N.m)

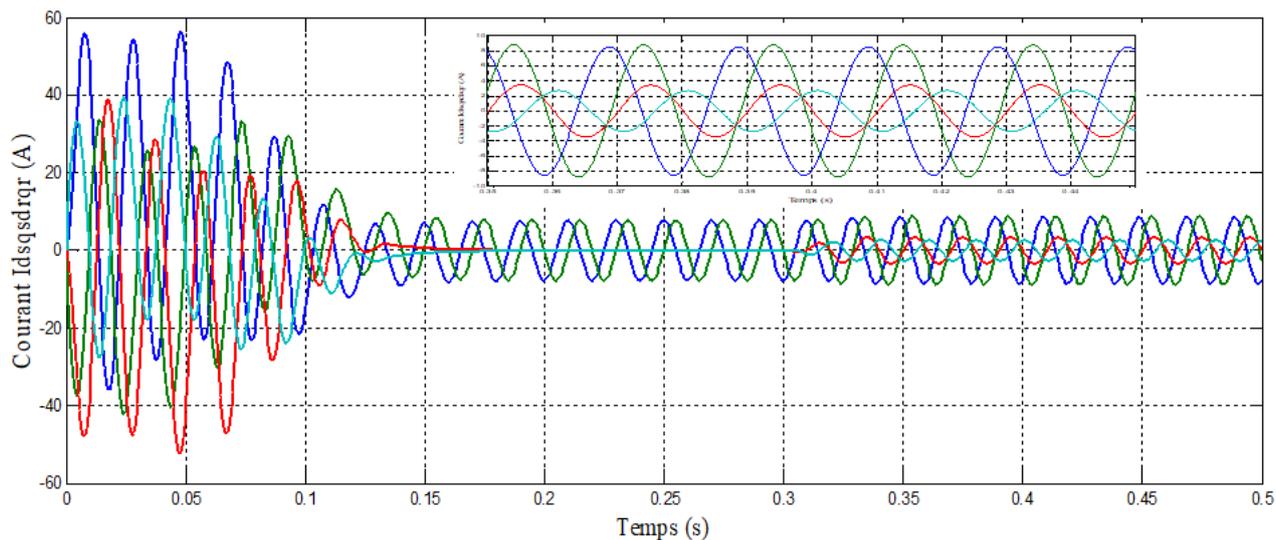


Figure 4.14 : courants  $I_{dsqdrqr}$  (A)

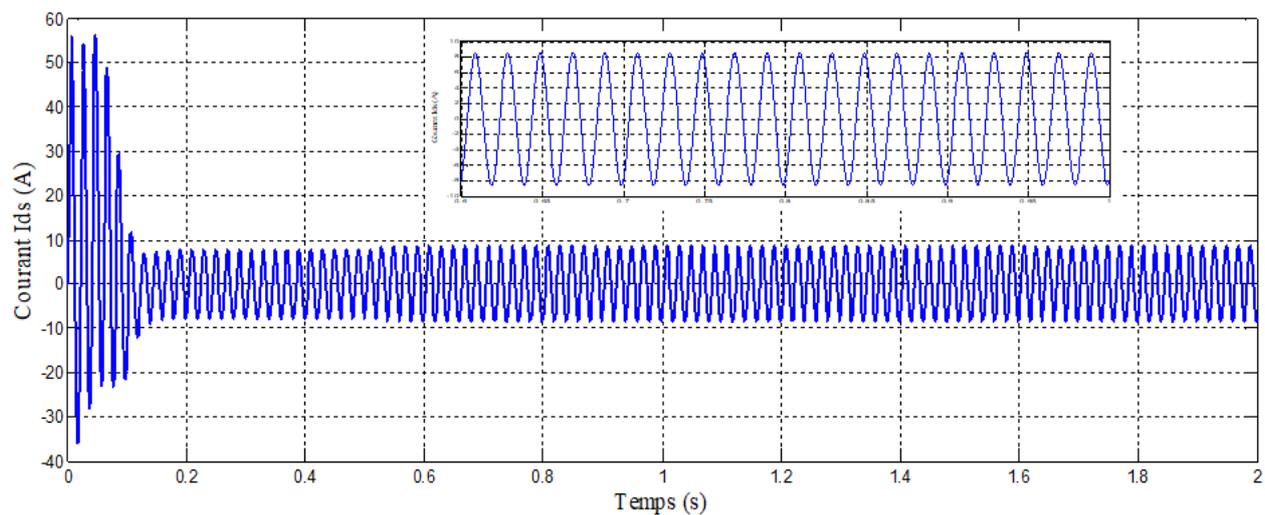


Figure 4.15 : courant  $I_{ds}$  (A)

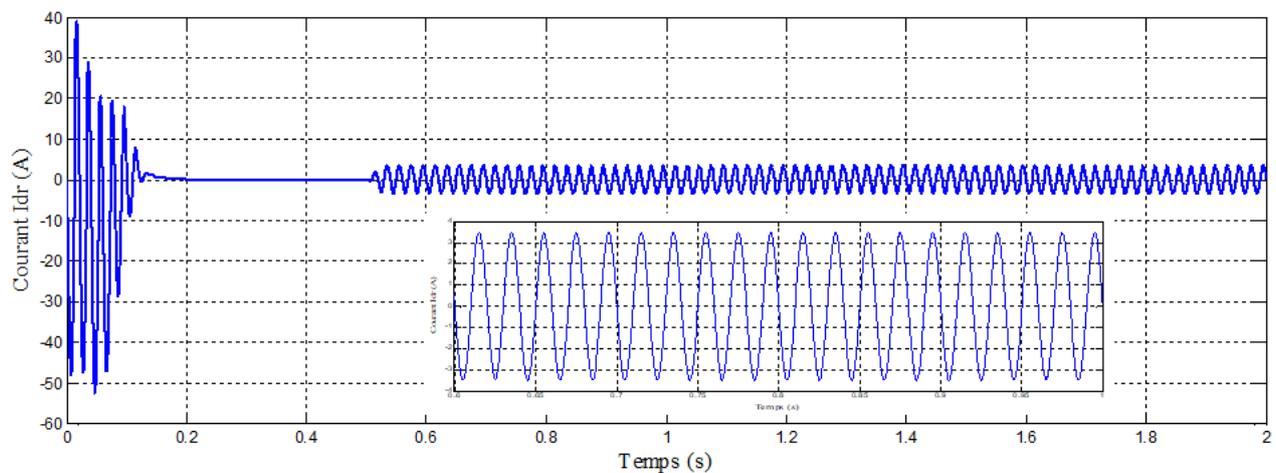


Figure 4.16 : courant  $I_{dr}$  (A)

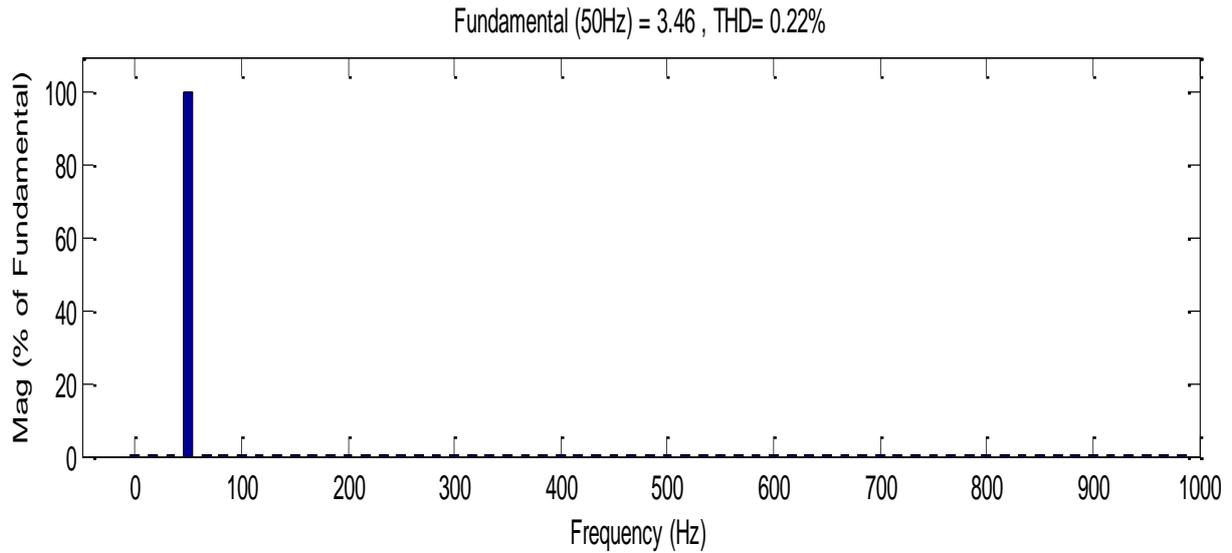


Figure 4.17 : FFT du courant  $I_{dr}$  (A)

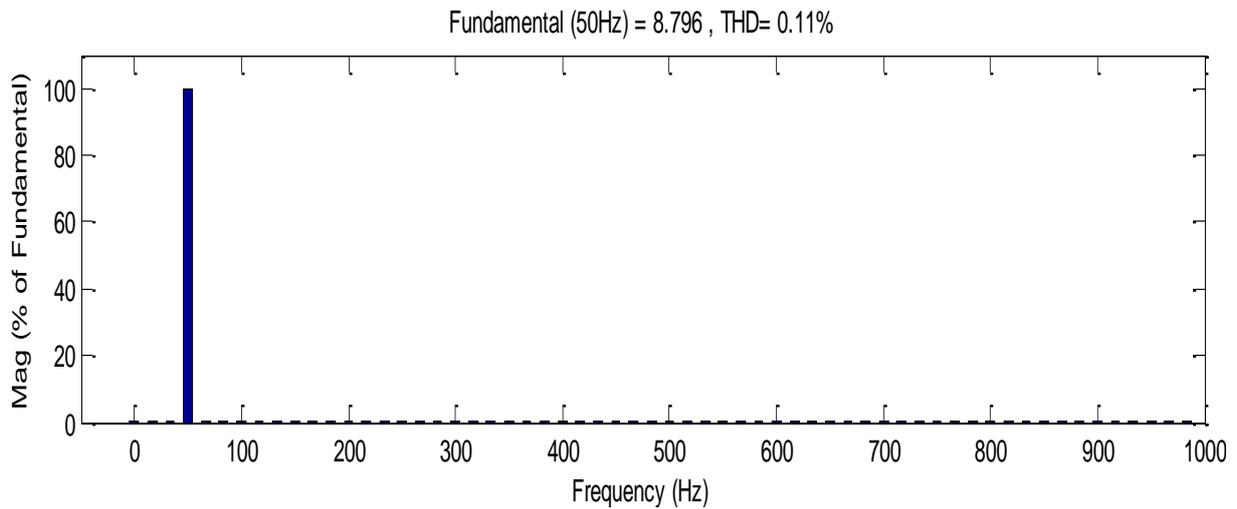


Figure 4.18 : FFT du courant  $I_{ds}$  (A)

- Cas de  $V_c=0$  ; [volt] :

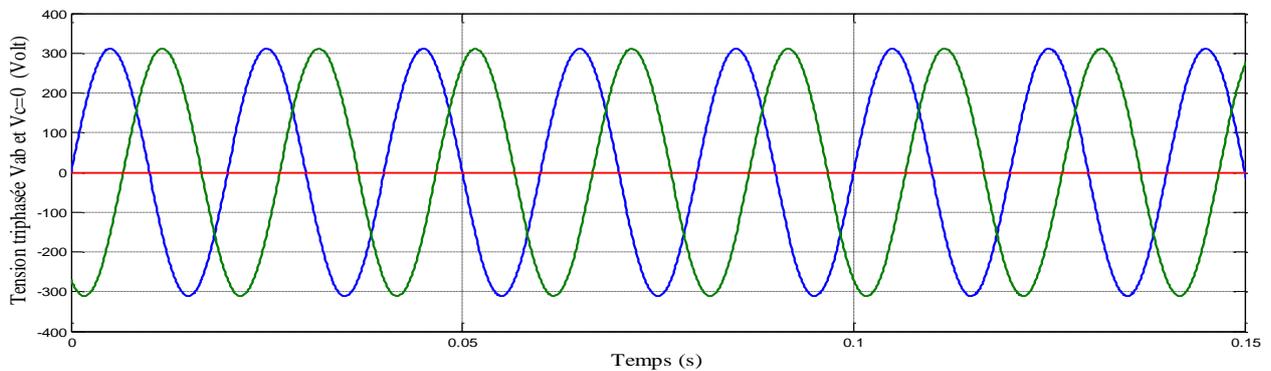


Figure 4.19: Tension triphasée ( $V_{abc}$  avec  $V_c = 0$ )

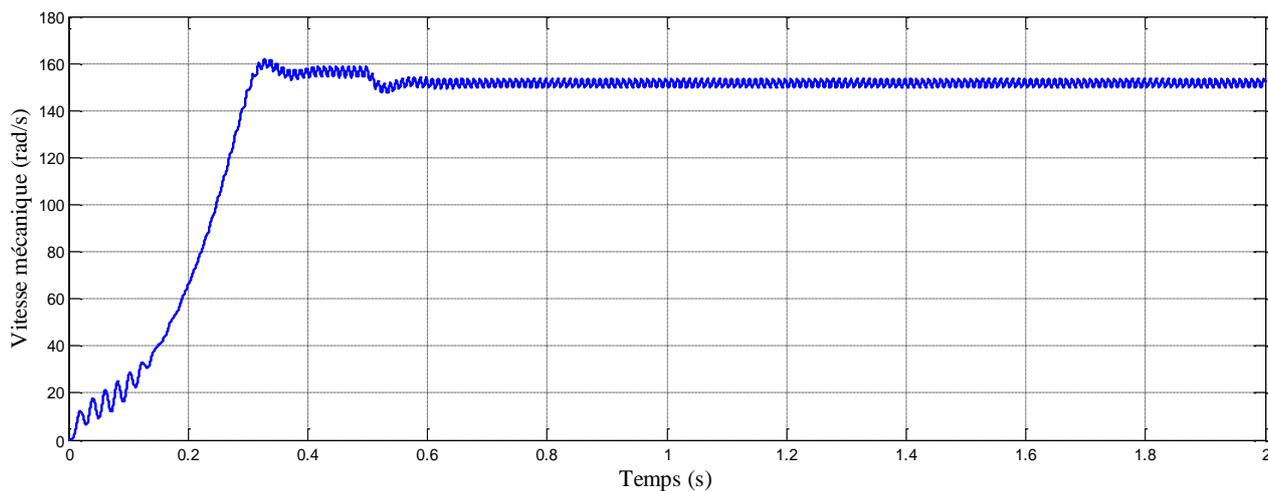


Figure 4.20: la Vitesse mécanique (rad/s)

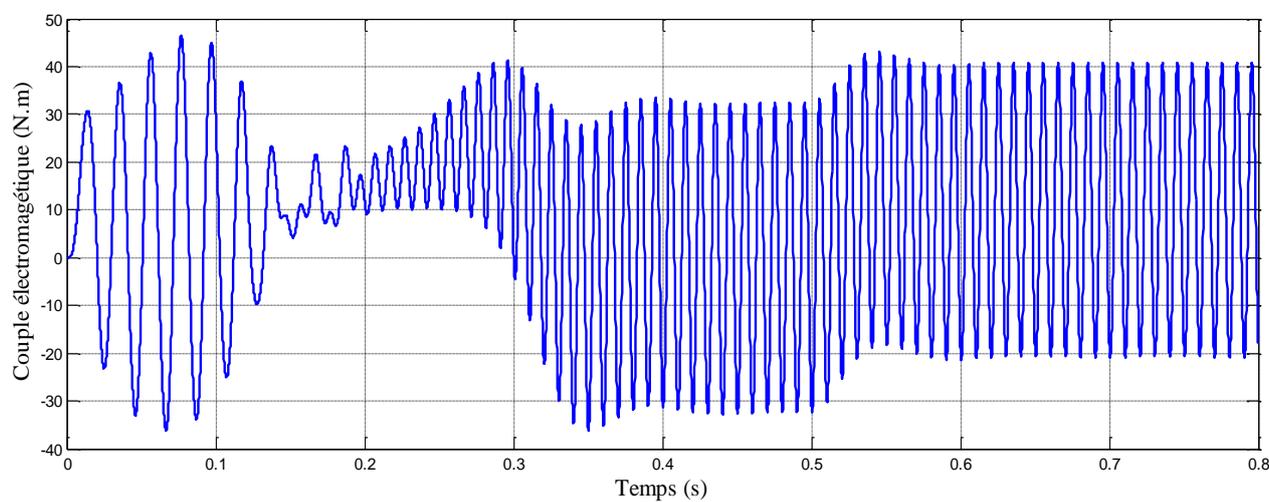


Figure 4.21: Couple électromagnétique (N.m)

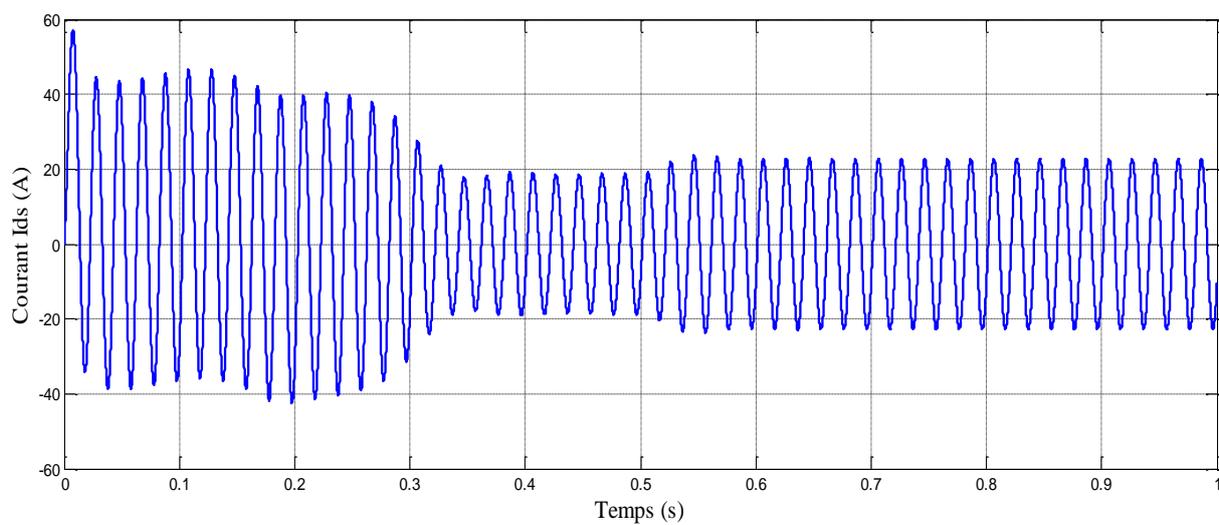


Figure 4.22 : courants  $I_{ds}$  (A)

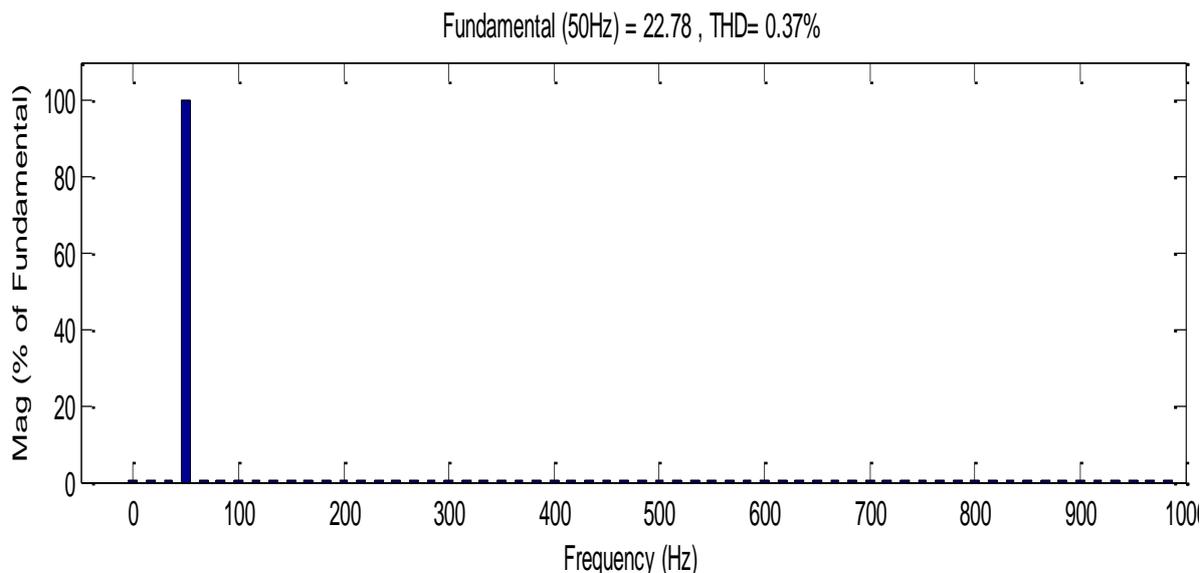


Figure 4.23 : FFT du courants  $I_{ds}$  (A)

#### IV.5.2. Interprétation des résultats :

Le courant qui parcourait la barre cassée est alors réparti dans les barres voisines et ce traduit sur le couple et la vitesse par une augmentation de l'amplitude des ondulations. Nous remarquons également l'augmentation de l'amplitude de modulation du courant statorique.

## **IV.6. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté explicitement les étapes de construction du modèle mathématique de la machine asynchrone à cage d'écureuil adapté pour la simulation des ruptures de barres au rotor.

Nous avons tout d'abord adapté le modèle pour la simulation des ruptures de barres au rotor en présentant les hypothèses simplificatrices sur lesquelles repose le modèle multi-enroulement par la suite nous avons calculé les différentes inductances et mutuelles statoriques et rotoriques.

Les conséquences d'une cassure de barre s'obtiennent aisément par l'augmentation de la résistance de la barre concernée par le défaut.

Ce modèle nous permettra de comprendre les phénomènes physiques associés à ce type de défauts.

Ensuite nous avons présenté une transformation de Park généralisée permettant de réduire l'ordre du système électrique.

La simulation du modèle multi-enroulement nous a donné un ordre de grandeur sur l'effet de défauts sur les grandeurs physiques de la machine, comme la vitesse de rotation ou le couple électromagnétique. Cependant l'analyse de ces grandeurs temporelles et notamment le courant statorique ne permet pas de visualiser avec facilité l'effet de défaut, car l'ordre des modulations est relativement faible.

Parmi les approximations intelligentes qui peuvent résoudre ce problème on peut utiliser la transformation de Fourier rapide FFT et les réseaux d'ondelettes ; peut-être dans un autre sujet de master.

# **Conclusion générale**

### Conclusion générale :

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts dans les machines asynchrones multi-enroulements. Nous avons focalisé l'étude sur les moteurs à cage pour deux raisons, la première est parce que les moteurs asynchrones à cage sont les plus répandus dans le monde industriel, tandis que la deuxième réside dans le fait que d'un point de vue structure multi-enroulements.

Au début de ce travail, nous avons rappelé les différents défauts qui peuvent affecter le bon fonctionnement de la machine asynchrone multi-enroulement à cage, ainsi que leurs causes. Les méthodes du diagnostic et les approches utilisées pour la modélisation sont aussi représentées.

Nous avons développé un modèle  $(d, q)$  pour l'étude de la machine asynchrone, il permet de simuler le comportement de la machine lors des défaillances de barres rotoriques.

Afin de représenter le comportement de la machine, lors d'un fonctionnement normal (état sain et avec défaut) nous avons développé un modèle mathématique multi-enroulement pour la cage rotorique.

Ce modèle, conduit à un gain notable en termes de temps de calcul tout en introduisant l'apparition d'un défaut par un changement significatif des résistances de la sous matrice liée au rotor.

Ensuite, nous avons abordé l'aspect lié à la simulation à l'aide du MATLAB -2009 a-, SIMULINK. Ceci nous a permis de visualiser les performances de la machine, en considérant les différentes conditions de fonctionnement de la machine (état sain, et avec défaut).

Nous avons fait la simulation des performances de la machine (le couple, la vitesse de rotation, le courant statorique...) à l'état sain puis avec défaut des barres cassées.

A la fin de ce travail on a fait état d'une méthode permettant la surveillance d'une machine asynchrone multi-enroulement lorsqu'un défaut apparaît. Pour cette surveillance nous avons développé un modèle de la machine qui permet d'étudier les phénomènes répercutés sur les performances de la machine. L'analyse spectrale ayant recours à la procédure de la transformée de Fourier rapide (FFT), l'analyse spectrale de ces performances a permis de détecter et de quantifier la valeur des défauts survenue sur la partie rotorique de la machine.

# Bibliographie

### Bibliographie :

- [1] : **KHEMCHANE Nour et TIZZAOUI Arezki**, « technique de diagnostic des défauts statorique d'un moteur asynchrone », Mémoire de Master en Électrotechnique université d'Abderrahmane Mira Bejaïa Promotion 2016-2017.
- [2] : **ADDOUN Abdelkrim**, « Optimisation de la maintenance par la méthode AMDEC appliquée au ventilateur de l'entreprise ALZINC », Mémoire de Master en Génie Mécanique, université d'Aboubakr Belkaïd – Tlemcen Promotion 2014 2015.
- [3] : **BELOUADAH Abdenaceur**, « Amélioration de la fiabilité d'un système électromécanique par l'utilisation des opérations de la maintenance préventive », Mémoire de Master en Génie électrique université Mohamed Boudiaf de M'SILA Promotion : 2015/2016.
- [4] : **BENAICHA Halima**, « Analyse des stratégies de maintenance des systèmes de production industrielle », Mémoire de Doctorat En-sciences en Electrotechnique Option : Réseaux Electriques université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohammed Boudiaf ,2015.
- [5] : **ANTER LEBIDI**, « Développement de la production d'un système électromécanique par une proposition d'une politique de maintenance efficace », mémoire de Master en génie électrique, université de M'sila, 2014.
- [6] : **LAURENS Jérémy**, « Mise en place d'un plan de maintenance préventive sur un site de production pharmaceutique », Thèse présentée pour l'obtention du titre de docteur en pharmacie diplôme d'état, université Joseph Fourier, faculté de pharmacie de Grenoble, 16 Février 2011.
- [7] : **TOUAMA Elhadj**, « Evaluation des performances de la maintenance des systèmes de production », mémoire de Master en génie électrique, université de M'sila, Juin 2014.
- [8] : **BOITEL Daniel et HAZARD Claude**. Guide pratique de la maintenance, entretiens manuels d'enseignements. Edition Nathan cop Paris 1987.
- [9] : **Benedetti, C. A.** (2002). Introduction à la gestion des opérations (4<sup>ème</sup> édition). Québec : Sylvain Ménard. 2002.
- [10] : **H.P.Ramella**. Maintenance des turbines à vapeur. Techniques de l'ingénieur, Référence BM4186. 2002.

## Bibliographie

- [11] : **Pierre Cocheteux**, « Contribution à la maintenance proactive par la formalisation du processus de pronostic des performances de systèmes industriels ». Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré - Nancy I, 2010.
- [12] : **ROLAND Casimir**, « Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance de formes » ; Ecole centrale de Lyon. 2003.
- [13] : **HARIR Miloud**, « Etude des Défauts dans La Machine Asynchrone à Cage d'Ecureuil par l'Emploi de la Fonction d'Enroulement Modifiée ». Mémoire de Magister en électrotechnique université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohammed Boudiaf Oran, 2008/2009.
- [14] : **MERABET HICHEM**, « surveillance et détection de défauts d'une machine à induction ». Mémoire de Magister en électrotechnique université de Badji Mokhtar Annaba, 2009.
- [15] : **M.R. Zemouri**, « Contribution à la surveillance des systèmes de production à l'aide des réseaux de neurones dynamiques : Application à la maintenance ». Thèse de doctorat, L'UFR des Sciences et Techniques de l'Université de France -Comté, 2003.
- [16] : **F. Fellipitti, G. Franceschini, P. Vas**, « Récent développement of induction motor drives fault diagnosis using AI techniques ». International electronics society, IEON, vol 4, pp :1966-1973, IEEE 1998.
- [17] : **A. Zaoui, H. Dahmani**, « Application des réseaux de neurones artificiels pour la détection et la localisation des défauts de la machine asynchrone ». Thèse d'ingénieur, spécialité d'électromécanique, Université de M'sila. 2005.
- [18] : **ANDRIAN CEBAN** 2012 « Méthode globale de diagnostic des machines électriques ». Thèse de doctorat, 2012
- [19] : **KERFALI SAMIR**, « Contribution à la Surveillance et au Diagnostic des Défauts De la Machine Asynchrone ». Thèse Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat Soutenue le 30/05/2016
- [20] : **ALLAL ABDERRAHIM**, « Thème grandeurs non invasives pour le diagnostic des machines asynchrones ». Magister en électrotechnique Université de Ferhat Abbas Sétif, 2010.
- [21] : **KHATIR Abdelfattah**, « Etude comparative des modèles des machines asynchrones utilisés en diagnostic des défauts ». Mémoire de Magister En Electrotechnique université Ferhat Abbas – Sétif ,2009.
- [22]: **A. H. Bonnett and C. Yung**, « Increased Efficiency Versus Increased Reliability». Industry Applications Magazine, IEEE, vol. 14, pp. 29-36, 2008.

## Bibliographie

- [23] : **Allianz**, « Présentation des avaries. Machines électriques tournantes ». Cahier des Préventions.CP2. 1988.
- [24] : **Roland casimir**, « diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes » ; 1992.
- [25] : **O. Ondel**, « Diagnostic par reconnaissance des formes : application à un ensemble convertisseur machine asynchrone ». Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, 2006.
- [26] : **Razik H**, « Notes de cours sur le diagnostic de la machine asynchrone », Groupe de Recherches en Electrotechnique et Electronique, Université de Henri Poincaré Nancy, France, 2003.
- [27] : **Tarek BOUMEGOURA**. « Recherche de Signatures Electromagnétiques des défauts dans une machine asynchrone et Synthèse d'observateurs en vue du diagnostic » Thèse de Doctorat ; E.C.L. 2001.
- [28] : **Didier G**, « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances », Thèse de doctorat, Université Nancy 1, France, 2004.
- [29] : **Babak Vaseghi**, « Contribution à l'étude des machines électrique en présences de défaut entre spires Modélisation –Réduction du courant de défaut », Thèse de doctorat l'institut national polytechnique de Lorraine, Université de Nancy, 2009.
- [30]: **Hamid A, Toliyat, Mohammed S, Arefeen, et Alenxender G,Parlos**, «A method for dynamic Simulation of Air-Gap Eccentricity in Induction Machines », IEEE Transaction on Industry Applications,32(4) ;910-917, July –August 1996.
- [31] : **BELHAMDI Saad**, « Diagnostic Des Défauts De La Machine Asynchrone Contrôlée Par Différentes Techniques De Commande ». Thèse doctorat Faculté des Sciences et de la technologie Université Mohamed Khider – Biskra, 2014.
- [32] : **Ayman Hussain** « Contribution à la commande adaptative robuste par modes glissants ». Thèse doctorat, Université de Reims Champagne Ardenne, 2009.
- [33]: **Intesar Ahmed, Manzar Ahmed, Kashif Imran. Shuja Khan, S. Junaid Akhtar**, « Detection of eccentricity Faults in Machine using Frequency Spectrum Technique». International Journal of Computer and Electrical Engineering, vol.3, no.1, February, pp.111-119. 2011.
- [34]: **Sahraoui M., Ghoggal A., Zouzou S., Benbouzid M**, «Dynamic eccentricity in squirrel cageinduction motor-Simulation and analytical study of its spectral signature on stator currents». Elsevier Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 16, p.1503-1513, 2008.
- [35] : **Abdelkarim bourase**, « Détection Prédictive des Anomalies des Moteurs de Moyenne Tension lors des Défauts Combinés ». Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba 2015.
- [36] : **Ayman Hussain**, « Contribution à la commande adaptative robuste par modes glissants ». Thèse doctorat, Université de Reims Champagne Ardenne, 2009

## Bibliographie

- [37] : **Bui Viet Phuong**, « Diagnostic des machines électriques par l'analyse du champ magnétique de fuite application à l'identification de défauts rotoriques d'un alternateur à vide ». Thèse de doctorat, l'institut National polytechnique, Université de Grenoble.
- [38] : **Saliou Diouf**, « Contribution au diagnostic industriel de défauts de roulement et de Balourd par techniques Neuronales Application a la machine asynchrone ». thèse de doctorat, Université Paris XII Val De MARNE –CRETEIL ,2007.
- [39] : **Smail Bachir, Jean Claude Trigeassau, Slim Tnani**, « Diagnostic des défauts statorique et rotoriques par identification paramétrique sans capteur de vitesse ». Conférence internationale francophone d'automatique Nantes8-10 juil. 2002. floue, des réseaux de neurones et d
- [40] : **L. Baghli**, « Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique es algorithmes génétique ». Thèse doctorat Nancy France, 1999.
- [41] : **S. Belhamdi**, « Prise en compte d'un défaut rotorique dans la commande d'un moteur asynchrone". Thèse de Magistère, Université Mohamed khidre Biskra. 2005.
- [42] : **M. Sahraoui**, « Contribution au diagnostic des machines asynchrones triphasées à cage ». Mémoire de Magistère, Université Mohamed Khider, Biskra, Décembre 2003.
- [43] : **A. Abed**. « Contribution à l'Etude et Diagnostic de la machine asynchrone ». Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1. Mars 2002.
- [44]: **M. L. Dombia, G. Roy, V. Rajagopalan, V. Missurenko**, « Comparative Study of Multi-Mass Models of Electrical Drives with Asynchronous Motors ». Revue canadienne de Génie électrique et de Génie informatique, 1998.
- [45] : **Bouakaz Ouahid**, « contribution à l'analyse des onduleurs multi niveaux ». Thèse de magistère, Batna année 2005.
- [46] : **Lamine M, Traoré.A**, « Modélisation et simulation d'une machine asynchrone à cage à l'aide du logiciel Matlab/Simulink », msas\_pp038\_45.
- [47] : **G. Brahim**, « Commande non linéaire de la machine à induction ». Thèse de master, Université de Batna, 2012.
- [48] : **H. Yantour, J. Saadi, A. Khoumsi**, « Modélisation et Simulation d'une Commande directe du couple appliquée à la Machine Asynchrone ». 6<sup>ème</sup> Conférence Francophone de Modélisation et Simulation MOSIM06, Rabat-Maroc, Avril 2006.
- [49] : **Mr. Sadki** , cours de 2ème année Master GE à l'ENSET Rabat.
- [50]: SIMULINK User's Guide, The MathWorks, Inc., 1996.

## Bibliographie

- [51] : **Khalid DAHI**, « Conditionnement d'un indicateur statistique en vue de détection de défaut rotorique dans une machine asynchrone ». Mémoire de Master Génie Electrique ENSET RABAT, 2012.
- [52] : **Bennoui Hassina**, Apport de la logique floue et des réseaux de neurones pour la commande avec minimisation des pertes de la machine asynchrone ; université de Batna.
- [53] : **Abed. A**, « Contribution à l'étude et au diagnostic de la machine asynchrone ». Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy, 2002.
- [54] : **Schaeffer. E**, « Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts ». Thèse de doctorat, école centrale de Nantes 1999.
- [55] : **Belhamdi. S**, « Prise en compte d'un défaut rotorique dans la commande d'un moteur asynchrone », thèse de magister, Université de Biskra ,2005.
- [56]: **E.Ritchie and X.Deng**, « Dynamic model of three-phase squirrel cage induction motor with rotor faults ». Conference Proceedings of the International Conference on Electrical Machine 8, ICEM, pp 694498.1994.
- [57] : **Hubert .R** , Notes de cours, « Le contenu spectral du courant absorbé par la machine asynchrone en cas de défaillance ». GREEN.UHP Faculté des sciences Vandoeuvre, Nancy, 2002.