



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electromécanique
Electromécanique

Réf. : ...

Présenté et soutenu par :

Ouamane Mohamed

Maaoui Khaled

Le : juin 2022

Analyse Paramétrique Du Diagnostic De La Machine Asynchrone

Jury :

M.	Zouzou Salah Eddine	Pr	Université de Biskra	Président
M.	Bekhoucha Nassima	MAA	Université de Biskra	Examineur
M.	Ghoggal Adel	Pr	Université de Biskra	Rapporteur

Année universitaire : 2021 – 2022



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electromécanique
Electromécanique

Réf. : ...

Présenté et soutenu par :

Ouamane Mohamed

Maaoui Khaled

Le : juin 2022

Analyse Paramétrique Du Diagnostic De La Machine Asynchrone

Présenté par :

Ouamane Mohamed

Maaoui Khaled

Avis favorable de l'encadrant :

Pr. GHOGGAL Adel

Avis favorable du Président du Jury

Cachet et signature

Remerciement

Tout d'abord nous remercions Dieu Tout-Puissant, qui nous a donné la force et la volonté de faire ce travail

*Nous exprimons nos profondes gratitude à notre encadrant **Pr. GHOGGAL Adel** pour nos avoir dirigé ce travail, nous le remercions pour la qualité de ses conseils, sa patience et son aide tout au long de notre thèse.*

Nos remerciements tous les membres de jury qui ont bien voulu juger et examiner le présent mémoire

Nous remercions toute personnes ayant contribues de près ou de loin au bon déroulement de ce travail

Dédicaces

À ma chère mère

À mon cher père

À mes frères

À toute ma famille

À tous mes amis

Je dédie ce modeste travail.

Khaled

Dédicaces

À ma chère mère

À mon cher père

À mes frères

À toute ma famille

À tous mes amis

Je dédie ce modeste travail.

Mohamed

Résumé

Le diagnostic des défauts mécaniques de la machine tournante par l'analyse des vibrations a considérablement évolué ces dernières années grâce aux techniques avancées de traitement du signal. Ces techniques permettent maintenant de détecter à un stade précoce l'existence d'un défaut, d'identifier sa nature, de déterminer sa gravité et de suivre son évolution.

Notre étude porte sur la présentation de la machine asynchrone et les différents défauts qu'ils peuvent réduire le bon fonctionnement de cette dernière. Une modélisation en multi enroulements et la méthode de la transformée de Fourier rapide ont été présentées pour diagnostiquer les défauts de cassure de barres et les défauts d'excentricité rotoriques de moteur asynchrone à cage.

Mots-clés : Machine asynchrone, Diagnostic, Analyse vibratoire, Modèle multi-enroulements, Excentricité, Analyse par FFT.

ملخص

تطور تشخيص العيوب الميكانيكية في الآلات الدوارة بواسطة تحليل الاهتزاز إلى حد كبير في السنوات الأخيرة بفضل تقنيات معالجة الإشارات المتقدمة. وهذه التقنيات تتيح الآن كشف وجود عيب أو خلل ما في مرحلة مبكرة، وتحديد طبيعته، وتحديد شدته، ومتابعة تطوره.

تركز دراستنا على عرض الألة غير المتزامنة والأخطاء المختلفة التي يمكن أن تقلل من الأداء السليم للأخيرة. تم تقديم نموذج متعدد اللفات وطريقة تحويل " فورييه " السريعة لتشخيص عيوب كسر قضبان الدوار وانحراف محوره لمحركات القفص السنجابي غير المتزامن.

الكلمات المفتاحية: محرك غير متزامن، تشخيص، تحديد الاهتزاز، نموذج متعدد الملفات، انحراف محور الدوران، تحويل " فورييه " السريع (FFT)

Liste des figures

Figure I. 1 : Machine asynchrone avec stator et rotor.....	2
Figure I. 2 : Représentation schématique d'un stator d'une machine asynchrone.....	3
Figure I. 3 : Représentation schématique d'un rotor à cage d'une machine asynchrone.....	4
Figure I. 4 : Objectifs de la maintenance	5
Figure I. 5 : Statistiques des défauts de la machine asynchrone	7
Figure I. 6 : Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique.....	8
Figure I. 7 : Dimension du roulement à bille	9
Figure I. 8 : Représentation des différents défauts de court-circuit statoriques.....	10
Figure I. 9 : Exemples de dégâts dus au défaut de court-circuit statorique d'un moteur asynchrone.....	11
Figure I. 10 : Diaporama des méthodes de diagnostic de machine électrique.....	11
Figure I. 11 : force appliquée sur un conducteur transportant un courant et se déplaçant dans un champ magnétique.....	13
Figure I. 12 : Représentation temporelle vers fréquentielle.....	16
Figure II. 1 : Structure multi-enroulements du rotor	19
Figure II. 2 : Circuit électrique équivalent de la cage rotorique	20
Figure II. 3 : Champ produit par une maille rotorique	25
Figure II. 4 : Deux mailles adjacentes	28
Figure II. 5 : Deux mailles adjacentes avec une barre cassée.....	28
Figure II. 6 : Représentation de l'excentricité statique est dynamique.....	29
Figure II. 7 : Représentation schématique de l'excentricité statique.....	30
Figure III. 1 : Vitesse de rotation d'un moteur sain avec charge 20 Nm (a), et son zoom en régime permanent (b)	32
Figure III. 2 : Courant de la maille rotorique (a) avec charge de 20 Nm, et son zoom en régime permanent (b)	33
Figure III. 3 : Courant correspondant de la phase A statorique (a) avec charge de 40 Nm, et son zoom en régime permanent (b)	33
Figure III. 4 : Couple électromagnétique correspondant (a) avec charge de 40 Nm, et son zoom en régime permanent (b).....	33
Figure III. 5 : Spectre correspondant du courant avec charge de 40 Nm. Etat sain	34
Figure III. 6 : Spectre correspondant du courant avec les PSHs. Etat sain	34
Figure III. 7 : Vitesse de rotation en régime permanent dans défaut deux cassure de barres (a) et d'un moteur sain (b) avec charge 20 Nm	35
Figure III. 8 : Courant correspondant de la phase A statorique en régime permanent dans défaut deux cassure de barres (a) et d'un moteur sain (b) avec charge 20 Nm.....	35
Figure III. 9 : Spectre du courant pour une barre cassée et une charge de 10 Nm.....	35
Figure III. 10 : Spectre du courant pour une barre cassée (a) et augmentation de la sévérité du défaut (b)	36

Figure III. 11 : Spectre du courant pour une barre cassée (a) et 4 barres cassées (b).la charge 10 Nm.....	37
Figure III. 12 : Evolution des raies $(1 \pm 2g) * fs$ en fonction du nombre de barres cassées pour charge de 10 Nm (a) et pour charge de 40 Nm (b).....	38
Figure III. 13 : Spectre du courant avec 3 barres cassées pour charge 10 Nm (a) et pour charge 40 Nm (b).....	38
Figure III. 14 : Evolution des raies $(1 \pm 2g) * fs$ en fonction de la charge, et pour 1 barre cassée (a) et pour 3 barres cassées (b).....	39
Figure III. 15 : Vitesse de rotation d'un moteur avec 1 barre cassée et charge de 40 Nm pour un moment d'inertie $j_i = 0.2$ (a) et $j_i = 0.15$ (b)	39
Figure III. 16 : Spectre du courant pour une barre cassée et charge de 40 Nm pour un moment d'inertie $j_i = 0.2$ (a) et $j_i = 0.15$ (b)	40
Figure III. 17 : Evolution des raies $(1 \pm 2g) * fs$ en fonction le moment d'inertie, et pour 1 barre cassée.la charge 40 Nm.....	40
Figure III. 18 : Vitesse de rotation en régime permanent pour un fonctionnement avec un degré d'excentricité statique 40% et 10% dynamique (a) et fonctionnement sain (b).....	41
Figure III. 19 : Le couple en régime permanent pour un fonctionnement avec un degré d'excentricité statique 40% et 10% dynamique (a) et fonctionnement sain (b).....	41
Figure III. 20 : Spectre du courant pour un fonctionnement avec un degré d'excentricité statique 40 % et 10% dynamique, et une charge de 40Nm	42
Figure III. 21 : Evolution des harmoniques de défaut en fonction du degré d'excentricité statique	42
Figure III. 22 : Vitesse de rotation en régime permanent pour un fonctionnement avec un degré d'excentricité dynamique 30% et statique 30% (a) et fonctionnement sain (b).....	43
Figure III. 23 : Courant de la maille r_1 rotorique, en régime permanent pour un fonctionnement avec un degré d'excentricité dynamique 30% et statique 30% (a) et fonctionnement sain (b).....	43
Figure III. 24 : Spectre du courant pour un fonctionnement avec un degré d'excentricité dynamique 30 %, statique 30% et une charge de 40Nm.	44
Figure III. 25 : Evolution des harmoniques en fonction du degré d'excentricité mixte.....	45
Figure III. 26 : Evolution des harmoniques en fonction du la charge	45
Figure III. 27 : Evolution des harmoniques en fonction du moment d'inertie	46
Figure III. 28 : Courant de la phase statorique en régime permanent, pour un fonctionnement non inclinaison (a) et avec inclinaison (b) avec un degré d'excentricité statique 30% et dynamique 30%, $C_r = 40Nm$	46
Figure III. 29 : Spectre du courant pour un fonctionnement avec un degré d'excentricité dynamique $\delta_d = 30$ %, et dynamique $\delta_d = 30\%$,une charge de 40Nm charge pour un fonctionnement non inclinaison (a) et avec inclinaison (b)	47
Figure III. 30 : Evolution des harmoniques en fonction du la charge pour un fonctionnement non inclinaison (a) et avec inclinaison (b) avec un degré d'excentricité statique 30% et dynamique 30%	47
Figure III. 31 : Evolution des harmoniques en fonction du degré d'excentricité pour un fonctionnement non inclinaison (a) et avec inclinaison (b)	48

Liste des tableaux

Tableau I. 1 : les causes et conséquences de défauts mécaniques :	7
Tableau I. 2 : les signatures spectrales qui caractérisent les défauts de la machine asynchrone à cage.....	14
Tableau III. 1 : Amplitudes en dB des raies $(1 \pm 2g) \cdot fs$ en fonction de la charge, et pour différents nombres de barres cassées.....	37
Tableau III. 2 : Evolution des amplitudes des harmoniques en fonction du degré d'excentricité statique.	42
Tableau III. 3 : Evolution des amplitudes des harmoniques en fonction du degré d'excentricité.....	44
Tableau III. 4 : Evolution des amplitudes des harmoniques en fonction de la charge	45
Tableau III. 5 : Evolution des amplitudes des harmoniques en fonction du moment d'inertie	46

Symboles et notations

S : Surface fermée.

Ω : Surface enfermée par un contour.

p : Nombre de paires de pôles.

μ_0 : Perméabilité magnétique de l'air.

\mathbf{H} : Champ magnétique.

\mathbf{B} : Induction magnétique.

φ : Flux magnétique.

i : Courant électrique

g_0 : Epaisseur de l'entrefer de la machine symétrique.

g : Glissement.

P : permeance de l'entrefer.

r : Rayon moyen de l'entrefer de la machine symétrique.

f_s : Fréquence d'alimentation.

f_{he} : Fréquence des harmoniques d'encoches rotoriques.

f_{mix} : Fréquence caractéristique du défaut d'excentricité mixte.

f_r : Fréquence rotorique.

f_{bille} : Fréquence de vibration relative aux défauts de billes.

$f_{b.int}$: Fréquence de vibration relative au défaut de bague intérieure.

$f_{b.ext}$: Fréquence de vibration relative au défaut de bague extérieur.

f_b : Fréquence caractéristique du défaut de barres.

l : Longueur active de la machine.

L_{mr} : Inductance de magnétisation d'une maille rotorique.

L_{BA} : Inductance mutuelle entre l'enroulement B et A .

L_b : Inductance de fuite d'une barre rotorique.

L_e : Inductance de fuite d'un segment d'anneau de court-circuit.

$[R_s]$: Matrice des résistances statoriques.

$[R_r]$: Matrice des résistances rotoriques.

$[R]$: Matrice globale des résistances de la machine.

$[V_s]$: Matrice des tensions statoriques.

$[V_r]$: Matrice des tensions rotoriques.

$[I_s]$: Matrice des courants statoriques.

$[I_r]$: Matrice des courants rotoriques.

N_s : Nombre de spires.

N_b : Nombre de barres rotoriques.

Ω_r : Vitesse mécanique du rotor.

ϕ : Ouverture angulaire.

α_r : Pas d'encoches rotoriques.

θ : Position mécanique du rotor.

PSH: Principals slots harmonics (Harmoniques d'encoches principales).

Sommaire

Introduction générale.....	1
CHAPITRE I : Etat de l'art	
1 Introduction :.....	2
2 Parties principales du moteur asynchrone :.....	2
2.1 Le stator :.....	2
2.2 Le rotor :.....	3
2.3 Organes mécaniques :.....	4
2.4 Les Paliers :	4
3 Maintenance :	5
3.1 But de la maintenance :	5
3.1.1 Objectifs financiers :	5
3.1.2 Objectifs opérationnels :.....	5
3.2 Différents types de maintenance :	6
3.2.1 La maintenance prédictive :	6
4 Défauts de la machine asynchrone :	6
4.1 Défauts rotorique :	7
4.1.1 Défauts mécaniques :	7
4.2 Défauts statorique :.....	9
4.2.1 Court-circuit entre spires :.....	9
4.2.2 Court-circuit entre phases :	10
4.2.3 Court-circuit avec le bâti (la carcasse) :	10
5 Méthodes de diagnostics :	11
5.1.1 Méthodes de redondances analytiques :	12
5.1.2 Méthodes par l'analyse de signaux :	12
6 Modèle de la machine asynchrone à cage :.....	15
6.1 Approche analytique :.....	15
6.1.1 Modèle multi-enroulement :.....	15
6.2 Approche numérique :	15
6.2.1 La méthode des réseaux de perméances :.....	15
6.2.2 La méthode des éléments finis :	15
7 Techniques de traitement de signal utilisées dans le diagnostic :	16

7.1	Transformée de Fourier rapide (FFT) :.....	16
8	Conclusion :.....	17

CHAPITRE II : Modélisation Dédiée au Diagnostic de la Machine Asynchrone

Triphasée à Cage

1	Introduction :.....	18
2	Modèle multi-enroulements :	19
2.1.	Hypothèses simplificatrices :.....	19
2.2.	Equations des tensions :	20
2.3.	Equation mécanique	23
3	Calcul des inductances sans prise en compte des harmoniques d'espace :	23
3.1.	Inductances statoriques :	23
3.2.	Inductances rotoriques :	25
3.3.	Inductances mutuelles entre enroulements statoriques et rotoriques :	26
4	Modélisation de défaut de cassure de barres rotoriques :.....	27
4.1.	Fracture totale d'une barre :	27
4.2.	Fracture partielle d'une barre	28
5	CALCUL DES INDUCTANCE EN CAS D'EXCENTRICITE	29
5.1.	Formulation	29
5.1.1.	Excentricité radiale.....	29
6	Conclusion :.....	31

Chapitre III Résultats de Simulation des défauts Rotoriques

1	Introduction :.....	32
2	Fonctionnement du moteur sain :	32
2.1	Les grandeurs temporelles :.....	32
2.2	Spectre de courant :	33
3	Défauts des barres cassées :	34
3.1	Sélection et influence des paramètres :.....	36
3.1.1	Influence du la augmentation de la sévérité de défaut :	36
3.1.2	Influence des nombres barres cassées et la charge :.....	36
3.1.3	Influence des nombres barres cassées :	37
3.1.4	Influence de la charge :	38
3.1.5	Influence de moment d'inertie :	39
4	DEFAUTS D'EXCENTRICITE :.....	41
4.1	Excentricité statique :	41

4.2	Excentricité mixte :.....	43
4.2.1	Influence du degré d'excentricité :.....	44
4.2.2	Influence de la charge :	45
4.2.3	Influence de l'inclinaison des barres :.....	46
5	Conclusion.....	48
	Conclusion générale :	49
	Bibliographie.....	50

Introduction générale

Introduction générale

Le diagnostic des machines électrique s'est fortement développé dans le monde industriel car la volonté d'obtenir une chaîne de production de plus en plus sûre devient, pour certaine application, indispensable. Les chaînes de production doivent être dotées de systèmes de protection fiable car une quelconque défaillance, peut mener à un dommage matériel ou l'arrêt du moteur ce qui provoque des pertes financières significatives.

C'est pour éviter ces problèmes que la recherche sur le plan mondial, s'emploie depuis plusieurs dizaines d'années à élaborer des méthodes de diagnostic. Celles-ci ont pour premier objectif de prévenir les utilisateurs d'un risque possible pouvant apparaître en un point particulier du système [1].

Notre projet de fin d'études est axé sur l'étude de ces deux techniques afin de montrer les performances de chacune d'elle. Ce mémoire est organisé en trois chapitres répartis comme suit :

- Le premier chapitre est consacré à des études bibliographiques liées au domaine du diagnostic des machines tournantes et leur maintenance, tel que les éléments de constitution d'une machine asynchrone et aussi un aperçu sur les différents défauts pouvant survenir dans la machine asynchrone d'écureuil et leurs causes et les différentes méthodes de diagnostic d'une machine asynchrone.
- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des modèles de la machine asynchrone pour la simulation des cassures de barres. Pour cela, nous utilisons le modèle multi-enroulement pour avoir un modèle plus proche de la réalité. Avec ce modèle on peut prendre en considération toutes les mailles formées par les barres de la cage, ce qui facilite la simulation d'une cassure de barre.
- Dans le troisième chapitre, nous allons présenter les résultats obtenus par la simulation avec MATLAB nous analysant le fonctionnement du moteur en état sain, les défauts de barres cassée et les défauts d'excentricité rotorique.

Nous avons détecté la présence de défauts rotorique en appliquant la méthode qui est basées sur du traitement de signal qu'est l'analyse de la transformées de Fourier rapide (*FFT*) ces défauts sont les défauts de cassure des barres et les défauts d'excentricité rotoriques.

Enfin, nous terminons ce travail par une conclusion générale où, nous résumons l'essentiel des résultats obtenu.

CHAPITRE I

Etat de l'art

1 Introduction :

Les moteurs asynchrones triphasés sont les moteurs les plus employés dans l'industrie. Ils possèdent en effet plusieurs avantages : simplicité, robustesse, prix peu élevé, et entretien facile.

Le moteur asynchrone est utilisé aujourd'hui dans de nombreuses applications, notamment dans le transport (trains, métro, propulsion des navires...), dans l'industrie (machines-outils) et dans l'électroménager.

Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent [2].

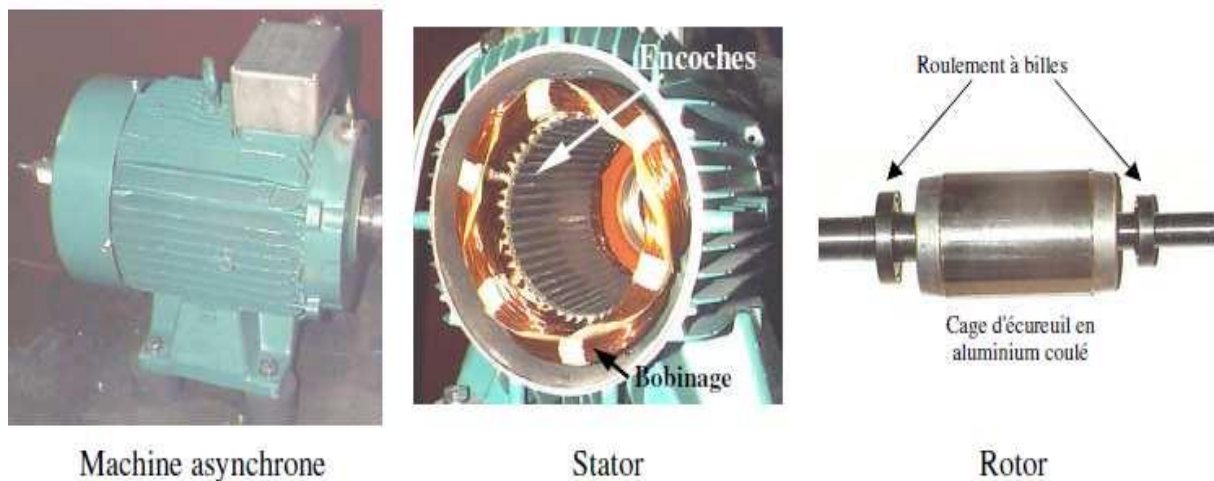


Figure I. 1: Machine asynchrone avec stator et rotor

2 Parties principales du moteur asynchrone :

Le moteur asynchrone triphasé (parfois appelé moteur d'induction triphasé) comprend deux parties ; le stator (fixe) et rotor (tournant) [2].

2.1 Le stator :

Le circuit magnétique du stator est réalisé par un assemblage de tôles ferromagnétiques fines et découpées, faisant apparaître les différentes encoches statoriques. L'utilisation des tôles minces permet de minimiser les pertes dans le circuit magnétique. De plus, afin de limiter l'effet des courants de Foucault, on isole habituellement les tôles d'une mince couche de vernis ou de silicate de soude. Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. Les conducteurs d'encoches permettent de

créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant leur circulation, l'objectif étant d'obtenir une répartition des forces magnétomotrices et du flux la plus sinusoïdale possible dans l'entrefer, pour limiter les oscillations du couple électromagnétique [3].

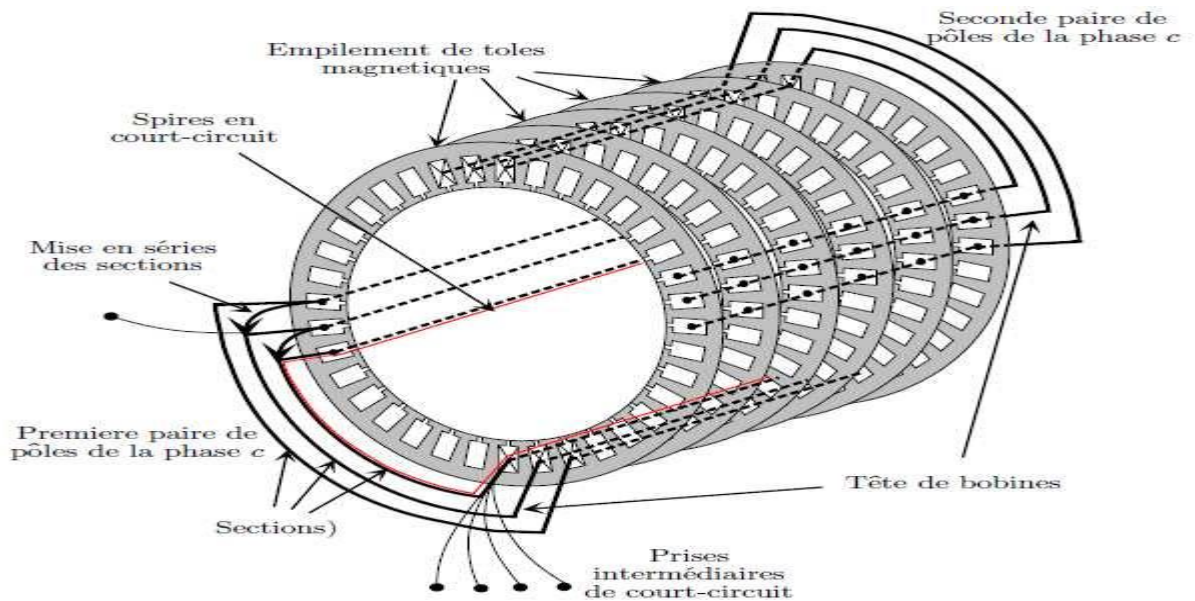


Figure I. 2 : Représentation schématique d'un stator d'une machine asynchrone

2.2 Le rotor :

Le rotor est constitué comme le stator de tôles empilées et habituellement du même matériau. Dans les petits moteurs, les tôles sont découpées dans une seule pièce et assemblées sur un arbre. Dans les plus gros moteurs, chaque lamination est constituée de plusieurs sections montées sur un moyeu. Dans le rotor à cage d'écureuil, les conducteurs sont des barres obtenues par injection d'un alliage d'aluminium ou préformées en cuivre et introduites 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 forte pour que les courants ne circulent pratiquement pas dans les tôles, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre[3].

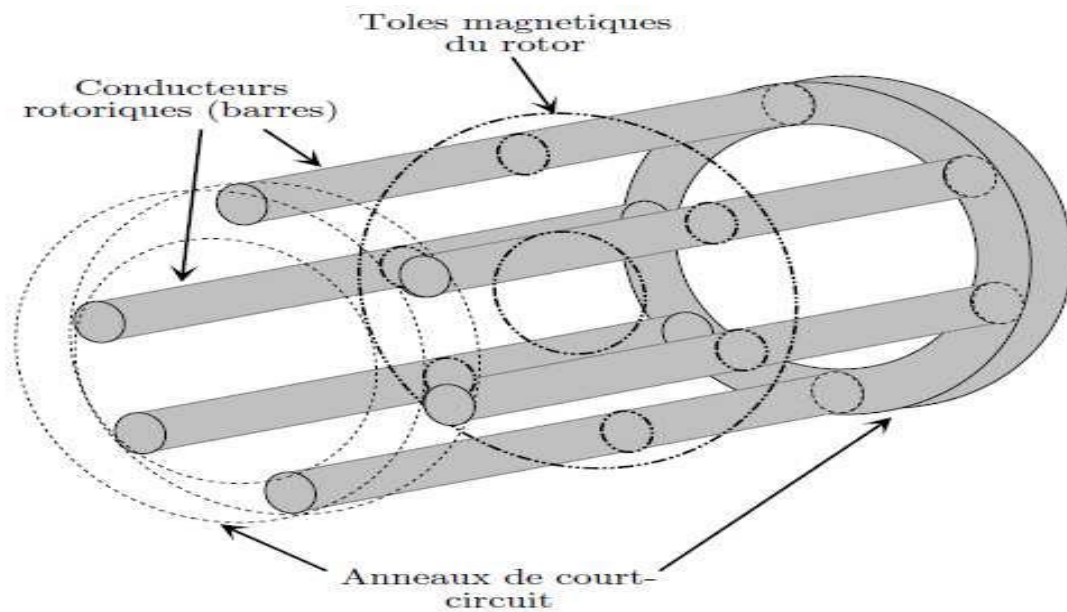


Figure I. 3 : Représentation schématique d'un rotor à cage d'une machine asynchrone

2.3 Organes mécaniques :

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi-accouplement. Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement est fonction des efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale, etc...), des efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges, des efforts de torsion (couple électromagnétique transmis en régime permanent, transitoire). Il est supporté par un ou plusieurs paliers [4].

2.4 Les Paliers :

Les paliers, qui permettent de supporter et de mettre en rotation l'arbre rotorique, sont constitués de flasques et de roulements à billes insérés à chaud sur l'arbre. Les flasques, moulés en fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage. L'ensemble ainsi établi constitue alors la machine asynchrone à cage d'écureuil [5].

3 Maintenance :

La maintenance c'est un ensemble des activités destinées à maintenir, à rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise [6].

3.1 But de la maintenance :

Les objectifs de la maintenance peuvent être classés en deux types :

3.1.1 Objectifs financiers :

- Réduire au minimum les dépenses de maintenance.
- Assurer le service de maintenance dans les limites d'un budget [6].

3.1.2 Objectifs opérationnels :

- Maintenir l'équipement dans les meilleures conditions possibles.
- Assurer la disponibilité maximale de l'équipement à un prix minimum.
- Augmenter la durée de vie des équipements.
- Entretenir les installations avec le minimum d'économie et les remplacer à des périodes prédéterminées.
- Assurer un fonctionnement sûr et efficace à tout moment [6].

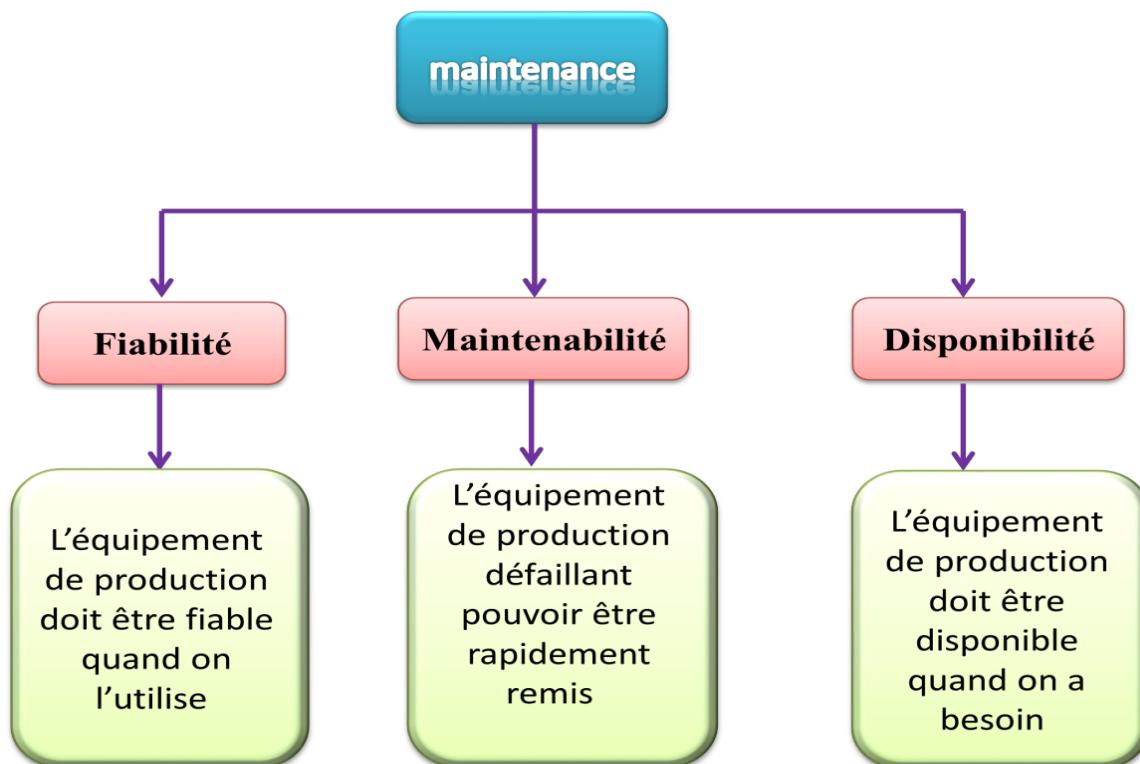


Figure I. 4 : Objectifs de la maintenance

3.2 Différents types de maintenance :

Les différents types de maintenance utilisés dans les applications industrielles dépendent principalement du niveau de criticité du système considéré, Plus la criticité est importante, plus les moyens et donc le coût associé seront élevés. On distingue :

- La maintenance préventive : Celle-ci consiste à changer les systèmes à date fixe prédéterminée. Le coût associé est important.
- La maintenance corrective : L'évaluation du système est réalisée fréquemment grâce à une instrumentation supplémentaire. Notons que plus cette évaluation est fréquente plus les couts d'immobilisation du système seront réduits. C'est dans le cadre de la maintenance corrective que l'utilisation de méthodes de diagnostic devient fondamentale. En effet, plus le diagnostic sera précis, plus l'intervention sera courte.
- La maintenance prédictive : L'intervention est effectuée avant l'apparition des défauts [6].

3.2.1 La maintenance prédictive :

L'émergence des solutions de traitement et d'analyse des données ainsi que de l'intelligence artificielle a permis aux industriels de planifier une maintenance prédictive ou prévisionnelle qui se base sur la prédiction des pannes et des dysfonctionnements. Ce type de maintenance industrielle permet aux entreprises d'anticiper les problèmes en planifiant les interventions nécessaires basées sur les prédictions. Elle permet ainsi de limiter les dépenses causées par les pannes inattendues et la perturbation de la production [7].

4 Défauts de la machine asynchrone :

Une défaillance d'une machine électrique représente tout incident donnant lieu à un comportement anormal de la machine et qui peut à court ou à long terme provoquer son endommagement.

Une variété d'études statistiques par différents auteurs tels qu'offrent une synthèse des défauts qui peuvent affecter la machine. Ces études sont présentées à la figure I.5 [4].

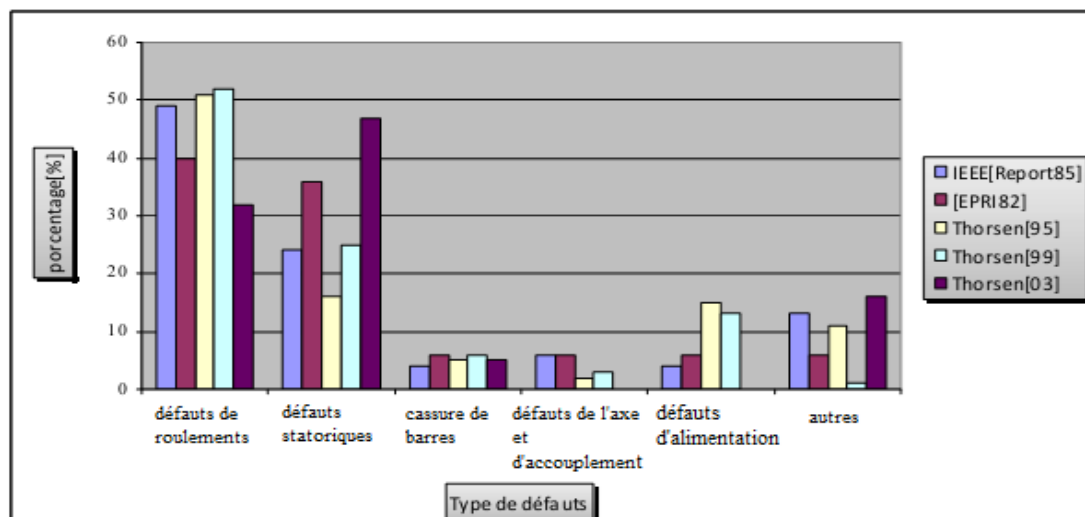


Figure I. 5 : Statistiques des défauts de la machine asynchrone

4.1 Défauts rotorique :

L'analyse du spectre du courant statorique en régime permanent, fournit des indications sur les défaillances rotoriques telles que les ruptures de barres, d'anneaux de court-circuit ou l'excentricité d'entrefer.

4.1.1 Défauts mécaniques :

Les défauts mécaniques sont, en général, les plus rencontrées parmi tous les défaillances que compte la machine asynchrone. Ces défauts peuvent apparaître au niveau des roulements à billes, des flasques ou encore de l'arbre moteur. Nous énumérons, dans la suite du document, certains de ces défauts sans pour autant en donner les détails. Nous pouvons trouver dans la littérature des ouvrages très complets qui traitent ces divers problèmes [6].

Dans le tableau ci-dessous sont regroupées les causes les plus importantes des défauts mécaniques et de leurs conséquences.

Tableau I. 1 : les causes et conséquences de défauts mécaniques :

Causes	Conséquences
<ul style="list-style-type: none"> • Fatigue mécanique (vibrations, mauvais montage mécanique) ; • Corrosion, problème de lubrification ; • Stator ovale ; • Excentricité (statique) du rotor, jeux excessifs ; • Flexion (déformation) du rotor ; • Vitesse critique ; • Résonance avec la commande de vitesse ; • Défaut roulement. 	<ul style="list-style-type: none"> • Billes cassées, bague interne ou externe fêlée ; • Cage endommagée ; • Entrefer irrégulier ; • Entrefer variable avec la rotation ; • Fluctuations au niveau du couple et de la vitesse ;

4.1.1.1 Défauts d'excentricités :

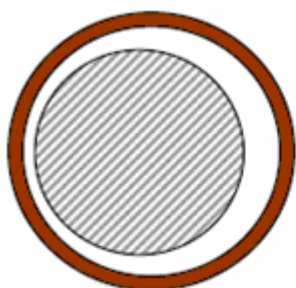
Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor) du rotor qui se traduit par des oscillations du couple. Ce phénomène est appelé excentricité statique ou dynamique dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut de roulement, à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication [8].

Il y a trois cas d'excentricités généralement bien distinctes :

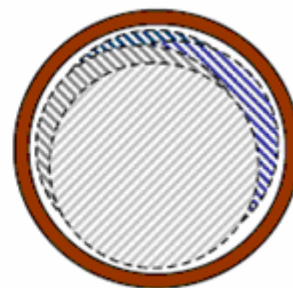
- ❖ **Excentricité statique** : le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour son axe.
- ❖ **Excentricité dynamique** : le rotor est positionné au centre de l'alésage stator mais ne tourne plus autour son axe. Exentération mixte, associe les deux cas précédemment définis.
- ❖ **Excentricité mixte** : L'excentricité dans la machine à induction augmente l'apparition des composantes additionnelles dans le spectre du courant, leurs fréquences sont données par des composantes fréquentielles suivantes [9] :

$$f_{mix} = f_s \left(1 \pm k \cdot \frac{(1-g)}{p} \right) \quad \text{avec} \quad k = 1, 2, 3 \dots \quad (I.1)$$

p : nombre de pair de pôles.



a : Excentricité statique



b : Excentricité dynamique (plusieurs Positions du rotor au cours de la rotation)

Figure I. 6 : Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique

Ces types des défauts modifient le comportement magnétique ainsi que mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent sur le noyau statorique et sur l'enroulement correspondant. Donc, engendre une dégradation de son isolation. D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence de frottements entre le stator et le rotor en

raison des forces de l'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des vibrations considérables dans les enroulements [9].

4.1.1.2 Défauts de roulements :

Les roulements à billes sont constitués de deux bagues, extérieure et intérieure, entre lesquelles existe un ensemble de billes ou de rouleaux tournants [1].

Nous pouvons distinguer les types de défauts suivants :

- Défaut de bague extérieure.
- Défaut de bague intérieure.
- Défaut de billes.

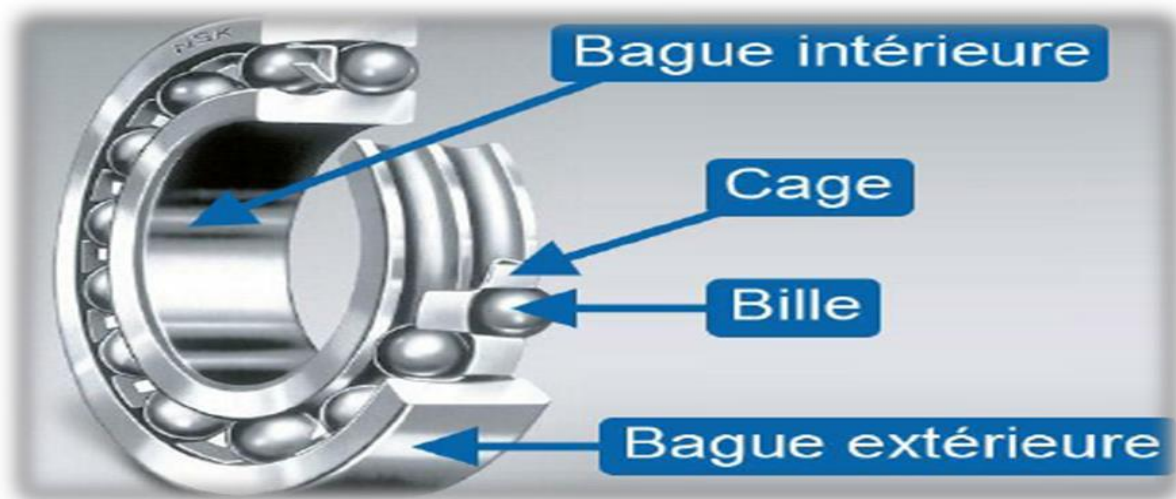


Figure I. 7 : Dimension du roulement à bille

4.2 Défauts statorique :

La majeure partie de défauts statoriques est attribuée à la dégradation d'isolants qui se manifestent sous la forme d'un court-circuit entre spires, d'un court-circuit entre deux phases ou d'un court-circuit entre une phase et la carcasse [4].

4.2.1 Court-circuit entre spires :

Le court-circuit entre spires de la même phase est un défaut fréquent qui peut apparaître soit au niveau des têtes de bobines soit dans les encoches, ce qui entraîne une diminution du nombre de spires effectives de l'enroulement. D'autre part, il entraîne aussi une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases et dans le cas des machines asynchrones, il amplifie les courants dans le circuit rotorique [4].

4.2.2 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. Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre dépend de la localisation du défaut. Dans le cas des machines asynchrones, les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce type de défaut [4].

4.2.3 Court-circuit avec le bâti (la carcasse) :

Le bâti est raccordé généralement avec une masse de terre. Si le bâti n'a pas d'importance dans la sécurité, il crée les effets capacitifs ; le bâti prend alors le potentiel de l'enroulement en cas court-circuit. La sécurité des personnes est donc soumise à un danger inattendu, et les dispositifs de protection sont nécessaires (disjoncteurs de sécurité) [4].

$$f_{cc} = f_s \left[\frac{n}{p} (1 - g) \pm k \right] \quad (I.2)$$

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

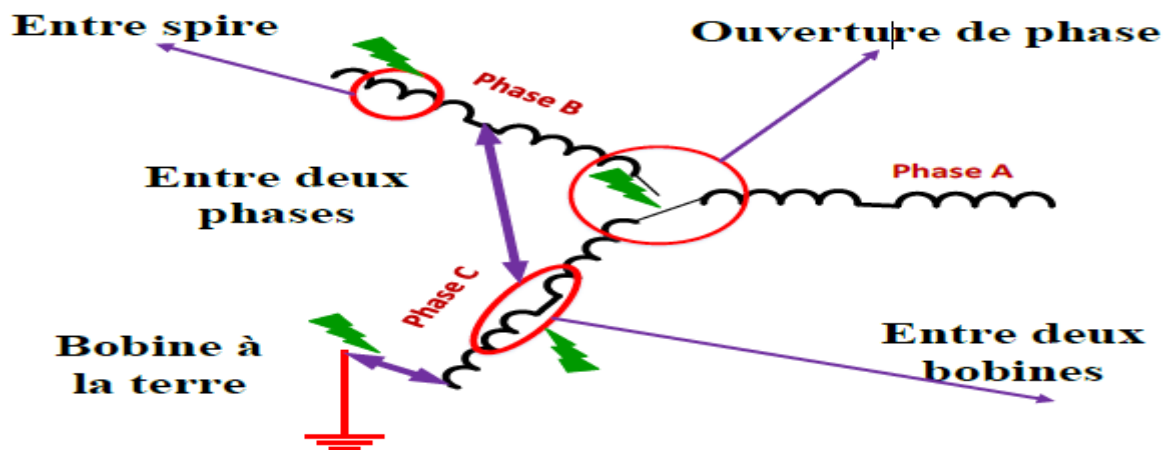


Figure I. 8 : Représentation des différents défauts de court-circuit statoriques



Figure I. 9 : Exemples de dégâts dus au défaut de court-circuit statorique d'un moteur asynchrone

5 Méthodes de diagnostics :

On retrouve, dans les différents travaux, les trois axes constituant le domaine du diagnostic des machines électriques, qui conduisent à définir trois méthodologies de diagnostic : Méthodes de connaissances, méthodes de redondances analytiques et méthodes par modélisation de signaux (voir Figure I.10) [4].

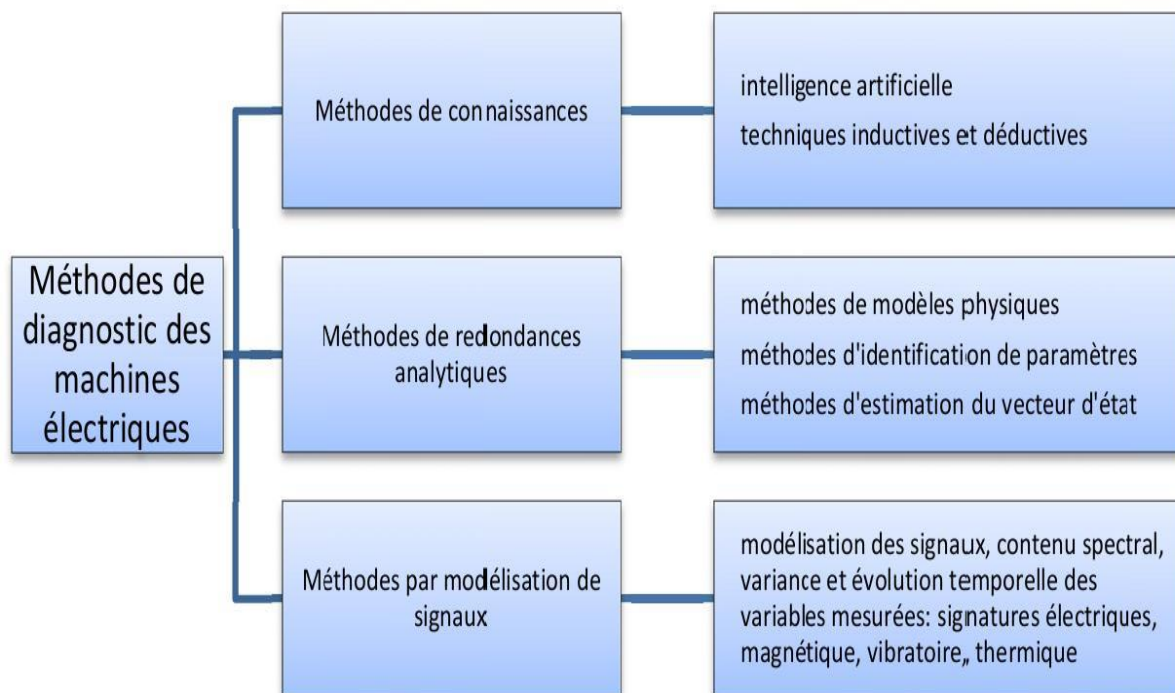


Figure I. 10 : Diaporama des méthodes de diagnostic de machine électrique

5.1.1 Méthodes de redondances analytiques :

Ces méthodes se basent sur une modélisation quantitative du système et exploitent les relations entre les variables du système considéré pour identifier les paramètres physiques à surveiller. On y distingue trois classes : les méthodes de modèles physiques, les méthodes d'identification de paramètres et les méthodes d'estimation du vecteur d'état [4].

5.1.2 Méthodes par l'analyse de signaux :

Le principe des méthodes d'analyse de signal repose sur l'existence de caractéristiques fréquentielles propres au fonctionnement sain ou défaillant du procédé [9]. Ce sont des méthodes basées sur une modélisation des signaux, le contenu spectral, la variance et l'évolution temporelle des J variables mesurés [4].

La démarche la plus souvent utilisée pour le diagnostic des défauts sur les machines électriques repose sur l'analyse des grandeurs mesurables et les signaux de défaut. Les grandeurs et signaux de défauts les plus fréquemment utilisés sont [4] :

5.1.2.1 Diagnostic par analyse du courant statorique :

Parce qu'il est facilement accessible, et vu sa capacité de détecter aussi bien les défauts électromagnétiques que mécaniques, l'analyse du courant statorique occupe une place privilégiée dans le diagnostic par analyse des signaux. Cette technique est connue sous l'abréviation MCSA (Motor Current Signature Analysis) [8]. La MCSA était l'objet de plusieurs travaux de recherche, elle consiste à affecter à chaque défaut une signature spectrale le caractérisant. Dans le même contexte, il a été démontré que la sévérité du défaut est fonction

de l'amplitude des composantes fréquentielles qu'il génère, et notamment, des raies déjà présentes dans le moteur sain (harmoniques d'espace) [10].

5.1.2.2 Diagnostic par l'analyse vibratoire :

Le diagnostic par l'analyse vibratoire fait partie des techniques mécaniques qui sont employées pour déceler des défauts au niveau des machines électriques. Une vibration est souvent accompagnée d'un bruit sonore qui peut être élevé même pour des faibles amplitudes de vibration. Les problèmes vibratoires dans les moteurs asynchrones ont une complexité accrue à cause de la présence du champ magnétique tournant. En réalité, les moteurs électriques industriels sont généralement fixés sur des structures à supports communs avec

l'équipement entraîné. Par conséquent, le spectre vibratoire devient très riche en harmoniques d'origines diverses (engrènement, roulement, desserrage, ...) transmises par les structures supports, ce qui complique le problème et impose l'identification des images vibratoires spécifiques [10].

Il est connu que la force induite sur un conducteur de longueur L parcouru par un courant \vec{i} et placé dans un champ magnétique \vec{B} , est donnée par (Figure I.11) :

$$\vec{F} = l(\vec{i} \wedge \vec{B}) \quad (\text{I.4})$$

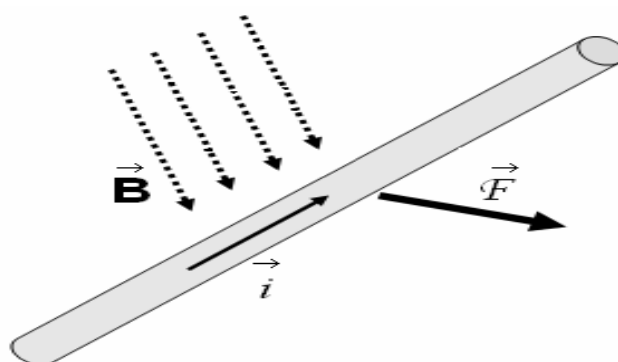


Figure I. 11 : force appliquée sur un conducteur transportant un courant et se déplaçant dans un champ magnétique

5.1.2.3 Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite :

La présence d'un défaut quelconque, provoque un déséquilibre électrique et magnétique au niveau du stator et du rotor ce qui affecte la répartition du champ magnétique dans et hors de la machine. Plusieurs auteurs se sont penchés à l'exploitation du flux axial. En fait, si on place une bobine autour de l'arbre de la machine, elle sera le siège d'une force électromotrice induite. Le contenu spectral de cette tension induite, peut être exploité pour détecter les différents défauts statoriques ou rotoriques [4].

5.1.2.4 Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique :

Cette technique, permet de détecter aussi bien les défauts rotoriques que les défauts de court-circuit entre spires dans les bobines statoriques. Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tous défauts, soit au niveau du stator ou au rotor, affectent directement le couple électromagnétique. L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état de la santé du moteur [4].

5.1.2.5 Diagnostic par l'analyse de la puissance instantanée

Il est clair que le niveau d'informations portées par le signal de la puissance est plus grand que celui donné par le courant d'une seule phase, ce qui représente l'avantage de cette méthode par rapport aux autres. Cette méthode est utilisée pour la détection des défauts mécaniques ou encore les défauts électriques tels que les courts circuits entre spires statorique.

Pratiquement, la surveillance par analyse spectrale de la machine asynchrone consiste donc à effectuer une transformée de Fourier des grandeurs affectées par le défaut, et visualiser les fréquences parasites constituant la signature d'un défaut dans la machine [4].

Tableau I. 2 : les signatures spectrales qui caractérisent les défauts de la machine asynchrone à cage

Défauts	Signatures spectrales
Roulement	$f_{roul} = fs \mp k \cdot fv , k = 1, 2, \dots$ $f_{bille} = \frac{PD}{BD} f_r \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos \beta \right)^2 \right]$ $f_{b.int} = \frac{n_b}{BD} f_r \left[1 + \frac{BD}{PD} \cos \beta \right]$ $f_{b.ext} = \frac{n_b}{2} f_r \left[1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta \right]$
Court-circuit statorique	$f_{cc} = f_s \left[\frac{n}{p} (1 - g) \pm k \right], n = 1, 2, 3, \dots, k = 1, 3, 5, \dots$
Excentricités	$f_H = \left \left(\lambda \mp (kR + n_d) \frac{(1 - s)}{P} \right) f_s \right $ $f_{exc} = fs \mp k \cdot fr , k = 1, 2, 3, \dots$
Cassure de barres rotoriques	$fb = (1 \mp 2k g), k = 1, 2, 3, \dots$

6 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 défectueux, 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 [11]:

6.1 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 [11].

6.1.1 Modèle multi-enroulement :

Un modèle du moteur asynchrone à cage d'écureuil appelé modèle multi-enroulements a été proposé dans la littérature [12]. Il suppose que le rotor est constitué d'autant de phases que de barres et que le stator est présenté par 3 phases comme dans le modèle ABC/abc. Il est donc possible d'observer les défauts au stator et au rotor à cause de la modélisation détaillée de la machine présentée par m circuits statoriques et N_b barres rotoriques [12].

6.2 Approche numérique :

6.2.1 La méthode des réseaux de perméances :

Elle consiste à découper la machine en plusieurs tubes du flux caractérisés par des perméances. Le mouvement de la machine est pris en compte par l'intermédiaire de perméances d'entrefer variable selon la position du rotor. Cette tient en compte aussi la saturation. [11].

6.2.2 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 [11].

7 Techniques de traitement de signal utilisées dans le diagnostic :

7.1 Transformée de Fourier rapide (FFT) :

Considérons le signal $X(t)$ à temps continu. Si X est à énergie finie, sa transformée de Fourier à la fréquence f est la suivante [9] :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-2\pi f t} dt \quad (\text{I.4})$$

Son inverse est donné par :

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f)e^{-2\pi f t} df \quad (\text{I.5})$$

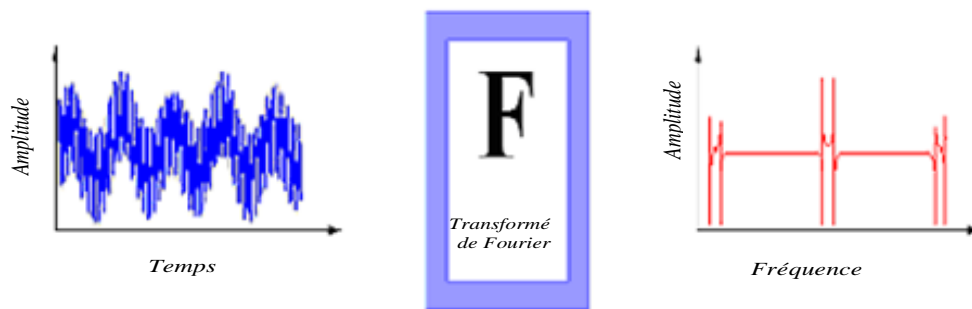


Figure I. 12 : Représentation temporelle vers fréquentielle

Sa transformée de Fourier discrète de N points avec une période d'échantillonnage T est donnée par :

$$x\left(\frac{f}{NT}\right) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(kT) e^{-\frac{2\pi f k T}{NT}} \quad (\text{I.6})$$

Et sa relation inverse est donnée par :

$$x(kT) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x\left(\frac{f}{NT}\right) e^{-j\frac{2\pi f k T}{NT}} \quad (\text{I.7})$$

La transformée de Fourier rapide (FFT) est un algorithme de calcul rapide de la transformée de Fourier discrète. L'algorithme de base de cette transformée utilise un nombre de points N égal à une puissance de 2, ce qui permet d'obtenir un gain en temps de calcul, par rapport à un calcul avec la transformée de Fourier discrète de $\frac{N}{\log_2(N)}$.

Cette transformation fait clairement ressortir le contenu fréquentiel du signal $x(t)$. En effet, la FFT décompose le signal $x(t)$ sur une base de vecteurs propres sinusoïdaux $\{e^{2\pi kt}\}_{f \in R}$. Malheureusement, ceci convient pour des signaux stationnaires dont les propriétés statistiques sont invariantes dans le temps. Cependant, en pratique la grande majorité des signaux rencontrés sont non stationnaires et la notion de décomposition sur une somme infinie d'exponentielles complexes propres à la FFT s'avère inadéquate.

Pour mieux décrire ce type de signaux, on fait appel à des représentations faisant intervenir conjointement le temps et la fréquence. Le changement ainsi opéré nous permettra d'analyser les lois du comportement fréquentielle du signal au cours du temps. Dans le cas de l'existence de sauts d'impulsions ou de changements de fréquence par exemple, la FFT ne permet pas de localiser ces événements transitoires qui surviennent dans le signal, Ces phénomènes sont non stationnaires et du fait qu'ils sont brefs et souvent à caractère oscillatoire, leur contenu spectral est difficile à mettre en évidence.

Pour résoudre ce problème, GABOR (1964) a introduit la transformée de Fourier à court terme qui se base sur le fenêtrage (Windowing). Il s'agit de segmenter en tranche de temps fixes le signal à analyser et d'appliquer par la suite la Transformée de Fourier à chaque tranche. La suite logique pour la résolution de ce problème a été l'élaboration d'un puissant outil localisé en temps et en fréquences dénommé la transformée en Ondelettes (Wavelets transform) [9].

8 Conclusion :

Vue sa place dans l'industrie, la machine asynchrone nécessite un suivie rigoureux pour assurer son bon fonctionnement et sa disponibilité, la maintenance prédictive est un outil puissant pouvant déceler un défaut a un state prématuré. Un modèle mathématique est de grande utilité pour prédire le fonctionnement de cette machine sous contrainte de défaut, son élaboration est l'objet de chapitre suivante.

CHAPITRE II
Modélisation Dédicée
au Diagnostic de la
Machine Asynchrone
Triphasée à Cage

1 Introduction :

Le modèle multi enroulement développé par et autres a trouvé une grande utilisation dans le sens qu'il reproduit fidèlement le comportement de la machine asynchrone lorsque celle-ci est en fonctionnement sain ou en défaut. Il a été développé grâce à une approche analytique qui consiste quant à elle à interpréter la machine du point de vue de la théorie des circuits. Un simple modèle de circuits pourrait être utilisé pour représenter chaque enroulement du stator ou chaque barre du rotor ainsi que le champ magnétique qui les lie. Partant de ce concept par des mailles reliées entre elles électriquement et couplées magnétiquement, où une maille est constituée de deux barres et de deux portions d'anneaux qui les relie. Selon le nombre de barres N_r du moteur, le nombre d'équations qui régit le fonctionnement de la machine est de l'ordre de $N_r + 3$. Les résultats de simulation issus de ce modèle, pris dans plusieurs thèses de doctorat, montrent qu'ils sont proches des résultats expérimentaux montrant les courants de phase, la vitesse et le couple électromagnétique. On observe des ondulations dans les courants des phases, dans la vitesse ainsi que dans le couple identiquement à ceux dans l'expérimental [13].

Pourtant aussi performant qu'il soit le modèle multi enroulement de dimension $N_r + 3$ se trouve confronté au problème de temps de calcul, certes ce dernier est très inférieur à celui alloué au modèle à base d'éléments finis mais il demeure assez long devant les modèles réduits. Cependant le modèle classique triphasé-biphasé (abc-dq) est simple et néglige un certain nombre de phénomènes entre autre le rotor à cage est considéré comme triphasé et ne reflète pas la réalité. De plus ces modèles décrivent le fonctionnement sain de la machine et sont fréquemment affectés par les transformations et le changement d'axe de référence ce qui ne permet pas la distinction entre les défauts venant des cassures de barres ou d'autres incidents [13].

La machine asynchrone, avec tous ses avantages, peut présenter des défauts structurels variés, qu'ils soient de nature mécanique ou électrique, au niveau du stator ou du rotor. Parmi ces défauts, nous pouvons citer la rupture totale ou partielle des barres rétorques, tout particulièrement au niveau de la brasure barre-anneau [2].

La mise au point d'une procédure de diagnostic, à base de modèles analytiques pour les machines asynchrones, nécessite la synthèse d'un modèle capable de tenir compte de sa structure et rendre compte du comportement transitoire de celle-ci.

Pour ce faire, il faut s'orienter vers le modèle multi-enroulements afin de pouvoir représenter individuellement les barres rotoriques pour une description mieux adaptée aux défauts [2].

2 Modèle multi-enroulements :

2.1.Hypothèses simplificatrices :

Pour pouvoir nous concentrer sur la simulation des ruptures de barres et d'anneaux de court-circuit, nous avons modélisé le rotor par des mailles reliées entre elles électriquement et couplées magnétiquement, elles sont formées par deux barres adjacentes et les portions d'anneaux qui les relie. Chaque barre et segment d'anneau sont caractérisés par une résistance et une inductance (Figure II.1).

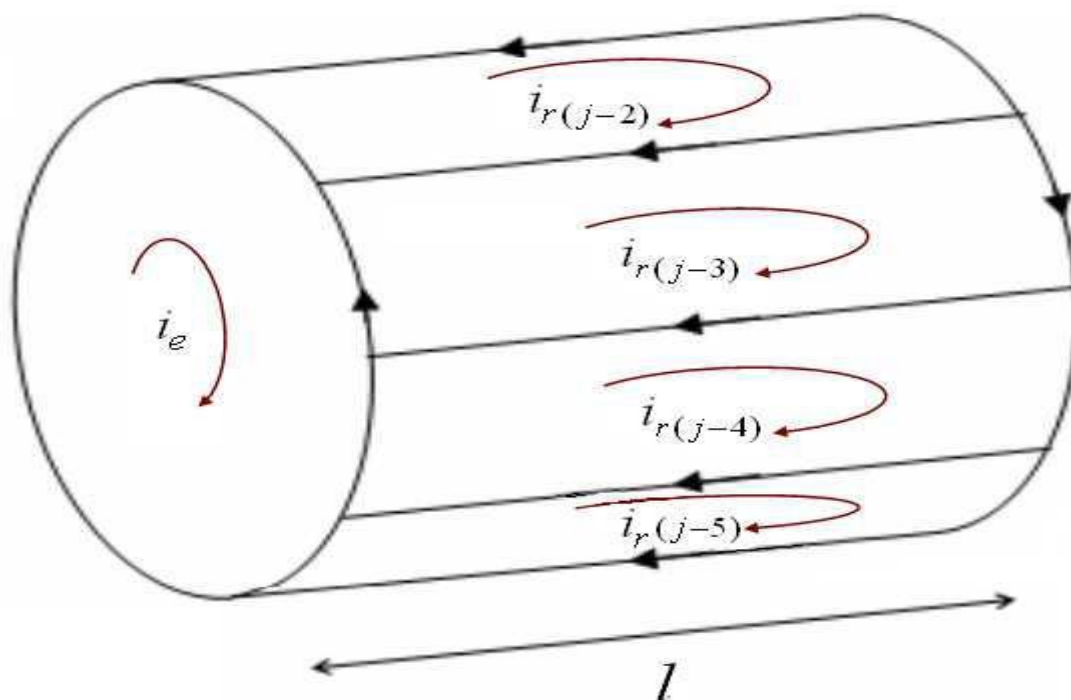


Figure II. 1 : Structure multi-enroulements du rotor

Notre modélisation s'est établie à partir des hypothèses simplificatrices classiques :

- entrefer lisse et constant (effet d'excentricité négligeable, champ radial).
- distribution sinusoïdale de la force magnétomotrice statorique.
- effet pelliculaire nul - courants de Foucault négligeables hors des barres rotoriques - absence de l'influence de l'échauffement.

• La négligence de la saturation magnétique et son influence sur les circuits magnétiques (perméabilité relative du fer infinie).

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer : La constance des inductances propres – l’additivité des flux – la loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements du stator et du rotor en fonction de l’angle électrique.

Avec ces hypothèses, et en supposant un stator triphasé sain, de constitution symétrique, nous calculons les différents paramètres du modèle [2].

2.2. Equations des tensions :

La figure II.2 montre le circuit électrique équivalent d’une maille rotorique, là où les barres rotoriques et les portions d’anneaux de court-circuit sont représentées par leurs résistances et inductances de fuite correspondantes[10].

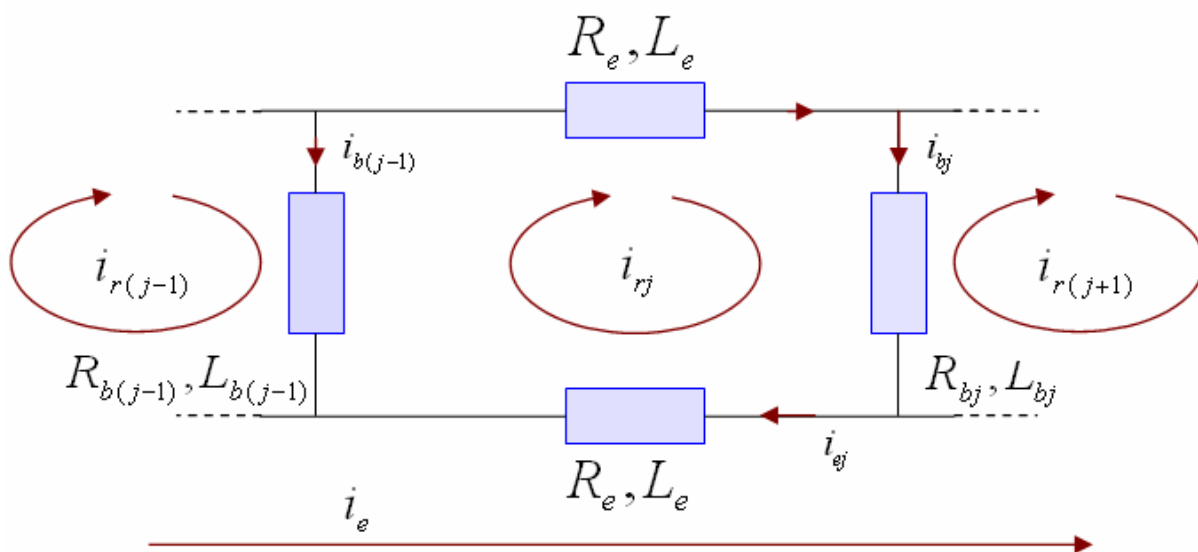


Figure II. 2 : Circuit électrique équivalent de la cage rotorique

En faisant référence à la figure II.2, les équations des tensions des trois phases statoriques et des $(N_b + 1)$ mailles rotoriques seront :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d[\psi_s]}{dt} \tag{II.1}$$

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d[\psi_r]}{dt} \tag{II.2}$$

Où $[\psi_s]$ et $[\psi_r]$ représentent les vecteurs regroupant les flux totaux à travers les enroulements statoriques et rotoriques respectivement. $[I_s]$ et $[I_r]$ sont les courants correspondants, avec :

$$[\psi_s] = [L_{ss}][I_s] + [L_{sr}][I_r] \quad (II.3)$$

$$[\psi_r] = [L_{rs}][I_s] + [L_{rr}][I_r] \quad (II.4)$$

$$[V_s] = [V_{sA} \quad V_{sB} \quad V_{sC}] \quad (II.5)$$

$$[V_r] = [V_{r1} V_{r2} \dots V_{rNb} V_{re}]^T \quad (II.6)$$

$$[I_s] = [i_{sA} \quad i_{sB} \quad i_{sC}]^T \quad (II.7)$$

$$[I_r] = [i_{r1} i_{r2} \dots i_{rNb} i_{re}]^T \quad (II.8)$$

Tel que i_{rj} et i_{re} sont respectivement les courants de la j ème maille rotorique et de l'anneau de court-circuit. V_{rj} et V_{re} sont les tensions correspondants avec, pour un rotor à cage (mailles court-circuitées), $V_{re} = 0$ et $V_{rj} = 0 ; j = 1, 2, \dots, Nb$.

Les matrices des résistances sont des matrices symétriques. $[R_s]$ est une matrice 3×3 , tandis que $[R_r]$ possède $(Nb + 1) \times (Nb + 1)$ éléments qu'on peut reconstituer à partir des lois relatives aux circuits électriques. Soit dans le cas :

$$[R_s] = r_s [I]. \quad (II.9)$$

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_{r1} + R_{rNb} + 2R_e & -R_{r1} & 0 & \dots & -R_{rNb} & \vdots & -R_e \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & -R_{r(j-1)} & R_{rj} + R_{r(j-1)} + 2R_e & -R_{rj} & 0 & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -R_{rNb} & 0 & \dots & \dots & R_{r(Nb-1)} + R_{rNb} + 2R_e & \vdots & -R_e \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -R_e & \dots & \dots & \dots & -R_e & \vdots & N_b R_e \end{bmatrix} \quad (II.10)$$

Avec : $[I]$ la matrice identité, la résistance d'une phase statorique, R_{rj} la résistance de la j ème barre rotorique et R_e la résistance d'un segment d'anneau de court-circuit. Comme le montrent les expressions (II.11) et (II.12), les matrices des inductances statoriques et rotoriques sont des matrices 3×3 et $(Nb + 1) \times (Nb + 1)$ respectivement, exprimées en diagonale par les inductances propres de chaque enroulement, et dans le reste, par les inductances mutuelles entre enroulements (phases statoriques ou mailles rotoriques). Les expressions détaillées des éléments de chaque matrice seront exposées par la suite.

$$[L_{SS}] = \begin{bmatrix} L_A & L_{AB} & L_{AC} \\ L_{BA} & L_B & L_{BC} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_C \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_{mr} + 2(L_b + L_\epsilon) & L_{r1r2} - L_b & \dots & L_{r1r(N_b-1)} & L_{r1rN_b} - L_b & \vdots & -L_\epsilon \\ L_{r2r1} - L_b & L_{mr} + 2(L_b + L_\epsilon) & \dots & L_{r2r(N_b-1)} & L_{r2rN_b} & \vdots & -L_\epsilon \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{r(N_b-1)r1} & L_{r(N_b-1)r2} & \dots & L_{mr} + 2(L_b + L_\epsilon) & L_{r(N_b-1)rN_b} - L_b & \vdots & -L_\epsilon \\ L_{rN_b r1} - L_b & L_{rN_b r2} & \dots & L_{rN_b r(N_b-1)} - L_b & L_{mr} + 2(L_b + L_\epsilon) & \vdots & -L_\epsilon \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -L_\epsilon & -L_\epsilon & -L_\epsilon & -L_\epsilon & -L_\epsilon & \vdots & N_b L_\epsilon \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Quant à $[L_{sr}]$, elle comporte $3 \times (N_b + 1)$ éléments qui constituent les inductances mutuelles entre les phases statoriques et les mailles rotoriques. Et elle est donnée par :

$$[L_{sr}] = \begin{bmatrix} L_{Ar1} & L_{Ar2} & \dots & L_{Ar(N_b-1)} & L_{ArN_b} & 0 \\ L_{Br1} & L_{Br2} & \dots & L_{Br(N_b-1)} & L_{BrN_b} & 0 \\ L_{Cr1} & L_{Cr2} & \dots & L_{Cr(N_b-1)} & L_{CrN_b} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

à où représente l'inductance mutuelle entre la phase statorique A et la maille rotorique. Pour ce qui est de $[L_{rs}]$.

Là où représente l'inductance mutuelle entre la phase statorique A et la $j^{\text{ème}}$ maille rotorique. Pour ce qui est de $[L_{rs}]$, elle est une matrice $(N_b + 1) \times 3$ qu'on obtient de la même façon en posant au palace des L_{Arj} les inductances mutuelles L_{rjA} . De même pour les phases B et C. L'inductance mutuelle entre chaque phase statorique et l'anneau de court-circuit est négligée du fait qu'ils peuvent être assimilés à des bobines à axes perpendiculaires.

En regroupant les équations (II.1) et (II.2) dans une même équation matricielle, nous aboutissons à :

$$[V] = [R] \cdot [I] + \frac{d([L][I])}{dt} \quad (\text{II.14})$$

Ce qui donne :

$$[V] = [R] \cdot [I] + [I] \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \frac{d[L]}{d\theta_r} + [L] \frac{d[I]}{dt} \quad (\text{II.15})$$

$$[V] = [R][I] + [I]\Omega_r \cdot \frac{d[L]}{d\theta_r} + [L] \cdot \frac{d[I]}{dt} \quad (\text{II.16})$$

Tel que :

$$[V] = \begin{bmatrix} [V_s] \\ [V_r] \end{bmatrix}, [I] = \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

$$[R] = \begin{bmatrix} [R_s] & 0 \\ 0 & [R_r] \end{bmatrix}, \quad (\text{II.18})$$

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [L_{sr}] \\ [L_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

$$\Omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (\text{II.20})$$

Θ_r est la position angulaire du rotor mesurée par rapport à une référence de phase fixe par rapport au stator, elle est appelée aussi angle mécanique. Tandis que Ω_r représente la vitesse mécanique de l'arbre de la machine [10].

2.3. Equation mécanique

Selon l'application à laquelle est désigné le moteur, il est possible de définir l'équation mécanique du mouvement associé par :

$$J_T \frac{d\Omega_r}{dt} + f_v \Omega_r = C_e - C_r \quad (\text{II.21})$$

Où C_e est le couple électromagnétique, C_r le couple résistant, f_v le coefficient de frottement visqueux et J_T le moment d'inertie total des parties tournantes.

Si $[L_{ss}]$ et $[L_{rr}]$ sont constantes, et $[L_{sr}] = [L_{rs}]$, le couple électromagnétique sera défini par :

$$C_e = \frac{1}{2} [I_s]^T \frac{d[L_{sr}]}{d\theta_r} [I_r] \quad (\text{II.22})$$

3 Calcule des inductances sans prise en compte des harmoniques d'espace :

3.1. Inductances statoriques :

On suppose que les enroulements statoriques sont idéalement distribués autour du périmètre de l'entrefer de sorte que l'induction résultante puisse être supposée sinusoïdale. Dans ce cas, l'expression de la FMM de la première phase statorique A sera [2] :

$$F_A(\varphi) = \frac{2N_s}{\pi \cdot p} i_A \cos(p\varphi) \quad (\text{II.23})$$

N_s est le nombre total des tours de chaque phase, p le nombre de paires de pôles, φ un angle décrivant une position particulière dans l'espace ; cet angle est mesuré par rapport à une référence fixe par rapport au stator i_A , et le courant traversant la phase A. La densité du flux radial créée dans l'entrefer tiendra l'expression :

$$B_A(\varphi) = \frac{2\mu_0 N_s}{\pi g_0 p} \cdot i_A \cos(p\varphi) \quad (\text{II.24})$$

Où μ_0 désigne la perméabilité magnétique de l'air g_0 , et l'épaisseur de l'entrefer de la machine symétrique (entrefer constant).

Sachant que :

$$d\phi = B_A ds \quad (\text{II.25})$$

Par intégration de l'expression (II.25) autour d'un intervalle polaire, nous obtenons l'expression du flux magnétique dans l'entrefer par pôle tel que :

$$\phi = \int_0^l dz \int_{\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} B_A(\varphi) r d\varphi \quad (\text{II.26})$$

Etant donné que l'entrefer de la machine est supposé uniforme, et qu'on néglige toute asymétrie axiale, l'expression (II.26) se réduit à :

$$\phi = \frac{4\mu_0 N_s r l}{\pi g_0 p^2} \cdot i_A \quad (\text{II.27})$$

Où r désigne le rayon moyen de l'entrefer de la machine symétrique, et l la longueur effective de la machine.

Le flux total traversant l'enroulement de la phase A dû au courant i_A est donné par :

$$\psi = \phi \cdot N_s = \frac{4\mu_0 N_s^2 r l}{\pi g_0 p^2} \cdot i_A \quad (\text{II.28})$$

L'inductance de magnétisation et le flux par unité de courant. Par conséquent, elle est égale à :

$$L_{Am} = \frac{\psi_A}{i_A} = \frac{4\mu_0 N_s^2 r l}{\pi g_0 p^2} \quad (\text{II.29})$$

L'inductance totale dans la phase A est égale à la somme de l'inductance de magnétisation et l'inductance de fuite correspondant au flux de fuite d'encoches, au flux de fuite des têtes de bobines...etc. Son expression est :

$$L_A = L_{Am} + L_{fA} \quad (\text{II.30})$$

Les enroulements statoriques étant identiques et symétriques, ce qui fait que :

$$L_A = L_B = L_C \quad (\text{II.31})$$

Et du fait qu'ils sont décalés de $3/2\pi$, les inductances mutuelles entre enroulements statoriques auront pour valeurs :

$$\begin{aligned} L_{AB} = L_{BA} &= L_{Am} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) = \frac{-L_{Am}}{2} \\ L_{BC} = L_{CB} &= L_{Am} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) = \frac{-L_{Am}}{2} \\ L_{AC} = L_{CA} &= L_{Am} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) = \frac{-L_{Am}}{2} \end{aligned} \quad (\text{II.32})$$

3.2. Inductances rotoriques :

En définissant les flux rotoriques qui entrent en jeu, et en faisant référence à la représentation équivalente du rotor, il sera possible de donner l'expression des différentes inductances. La figure II.3 représente, en fonction de l'ouverture angulaire α_r dans un référentiel lié au rotor, l'allure de l'induction magnétique dans l'entrefer, supposée radiale, produite par une maille rotorique. Cela en admettant que les barres rotoriques sont identiques, régulièrement décalées et séparées l'une de l'autre par un angle $\alpha_r = 2\pi/N_b$ (rad) [14].

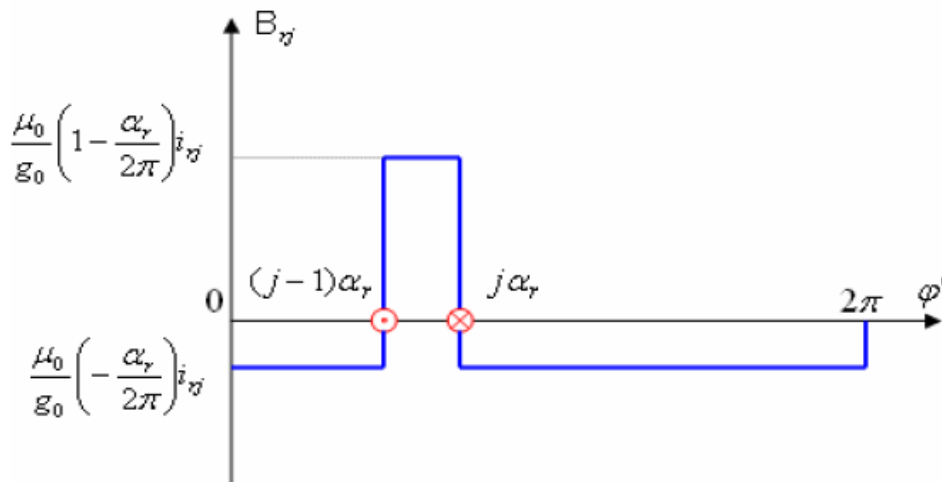


Figure II. 3 : Champ produit par une maille rotorique

Chaque maille rotorique est considérée comme étant une bobine à une spire parcourue par un courant i_{rj} , et qui sera le siège d'un flux propre ψ_{rjrj} tel que :

$$\psi_{rjrj} = \int_0^l dz \int_{(j-1)\alpha_r}^{j\alpha_r} \frac{\mu_0 r}{g_0} \left(1 - \frac{\alpha_r}{2\pi}\right) i_{rj} d\varphi' \quad (\text{II.33})$$

Il en résulte que :

$$\psi_{rjrj} = \frac{\mu_0 r l}{g_0} \left(1 - \frac{\alpha_r}{2\pi}\right) \alpha_r i_{rj} \quad (\text{II.34})$$

Par conséquent, l'inductance de magnétisation est égale à :

$$L_{mrj} = \frac{\psi_{rjrj}}{i_{rj}} = \frac{2\pi\mu_0(N_b-1)rl}{g_0 N_b^2} \quad (\text{II.35})$$

L'inductance totale de la $j^{\text{ème}}$ maille rotorique s'obtient par la sommation de l'inductance de magnétisation de cette maille et les inductances de fuite des deux barres et des deux portions d'anneau de court-circuit formant la maille. Son expression sera :

$$L_{rj} = L_{mrj} + L_{bj} + L_{(j+1)} + 2L_e = L_{mrj} + 2(L_b + L_e) \quad (\text{II.36})$$

Le flux traversant la $k^{\text{ème}}$ maille, produit par le courant i_{rj} circulant dans la maille j est donnée par :

$$\psi_{rkrj} = \int_0^l dz \int_{(k-1)\alpha_r}^{k\alpha_r} \frac{\mu_0 r}{g_0} \left(\frac{-\alpha_r}{2\pi}\right) i_{rj} d\varphi' \quad (\text{II.37})$$

Pour $k \neq j$, on a :

$$\psi_{rkrj} = \frac{\mu_0 r l}{g_0} \left(\frac{-\alpha_r}{2\pi}\right) i_{rj} \alpha_r \quad (\text{II.38})$$

De ce fait, l'expression de L_{rkrj} sera donnée par :

$$L_{rkrj} = \frac{\psi_{rkrj}}{i_{rj}} \quad (\text{II.39})$$

Tenant compte des inductances de fuites, il est possible de déduire les expressions des inductances mutuelles entre la $j^{\text{ème}}$ maille et les autres mailles du circuit rotorique.

$$\begin{aligned} L_{r(j+1)j} &= \frac{\psi_{r(j+1)rj}}{i_{rj}} - L_{b(j+1)} = \frac{-2\pi\mu_0 r l}{g_0 N_b^2} - L_b \\ L_{r(j-1)j} &= \frac{\psi_{r(j-1)rj}}{i_{rj}} - L_{bj} = \frac{-2\pi\mu_0 r l}{g_0 N_b^2} - L_b \end{aligned} \quad (\text{II.40})$$

Et pour les mailles non adjacentes on obtient :

$$L_{rkj} = \frac{\psi_{rkrj}}{i_{rj}} = \frac{-2\pi\mu_0 r l}{g_0 N_b^2} \quad (\text{II.41})$$

3.3. Inductances mutuelles entre enroulements statoriques et rotoriques :

Pour transformation dans le repère lié au rotor, on a :

$$\varphi = \varphi' + \theta_r = \varphi' + \Omega_r t \quad (\text{II.42})$$

L'équation (II.18) de la densité du flux d'entrefer créée par le courant, sera comme suit :

$$B_A(\varphi') = \frac{g_0 N_b^2}{\pi g_0 p} \cdot i_A \cos[p(\varphi' + \omega_r t)] \quad (\text{II.43})$$

Le flux parcourant la maille rj sera :

$$\psi_{rjA} = \int_0^l dz \int_{(j-1)\alpha}^{j\alpha} B_A(\varphi') r d\varphi' \quad (\text{II.44})$$

Et tenant compte de (II.44), il résulte :

$$\psi_{rjA} = M \cdot i_A \cos \left[p \left(\frac{2(j-1)\pi}{N_b} + \Omega_r t \right) \right] \quad (\text{II.45})$$

Avec

$$M = \frac{4\mu_0 N_s r l}{\pi g_0 p^2} \sin \left(\frac{\pi \cdot p}{N_b} \right) \quad (\text{II.46})$$

Les inductances mutuelles entre la $j^{\text{ème}}$ maille rotorique et les phases statoriques seront données par :

$$\begin{aligned} L_{rjA} &= \frac{\psi_{rjA}}{i_A} = M \cdot \cos \left[p \left(\frac{2(j-1)\pi}{N_b} + \Omega_r t \right) \right] \\ L_{rjB} &= \frac{\psi_{rjB}}{i_B} = M \cdot \cos \left[p \left(\frac{2(j-1)\pi}{N_b} + \Omega_r t \right) - \frac{2\pi}{3} \right] \\ L_{rjC} &= \frac{\psi_{rjC}}{i_C} = M \cdot \cos \left[p \left(\frac{2(j-1)\pi}{N_b} + \Omega_r t \right) - \frac{4\pi}{3} \right] \end{aligned} \quad (\text{II.47})$$

4 Modélisation de défaut de cassure de barres rotoriques :

Une cassure d'une barre peut être totale ou bien partielle. Partant de la structure multi enroulements, la cassure partielle d'une barre est souvent modélisée par élévation de sa résistance à des taux reflétant le degré de sévérité voulu. Une cassure totale se traduit par l'annulation complète de la branche équivalente dans la structure multi-enroulements diminuant ainsi le nombre de mailles rotoriques à flux radiaux à (N_b-1) . Les mailles résultantes ne sont plus identiques ce qui impose une restructuration du modèle d'état . Une forte augmentation de la résistance des barres rotoriques peut aussi modéliser leur cassure totale [2].

4.1.Fracture totale d'une barre :

Le cas d'une cassure totale d'une barre signifie que le courant ne passe pas dans cette barre, donc il est nul.

La Figure (II-4) montre la disposition générale de deux mailles adjacentes et donne les courants qui circulent dans les barres et dans les anneaux.

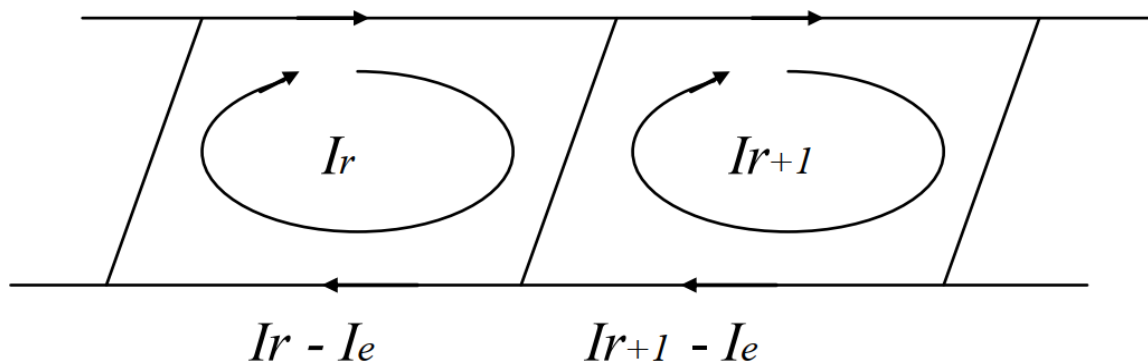


Figure II. 4 : Deux mailles adjacentes

Si une barre est ouverte (cassée), cela implique que $I_{r+1} = I_r$ voir figure (II-5).

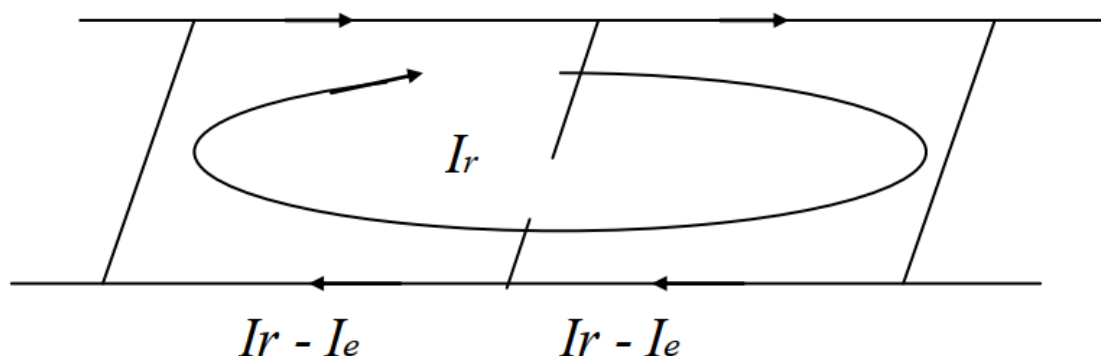


Figure II. 5 : Deux mailles adjacentes avec une barre cassée

La condition $I_{r+1} = I_r$ est imposée sur la matrice des résistances et des inductances par l'addition de la colonne relative à I_{r+1} , à celle relative à I_r . De même pour les lignes, I_{r+1} est supprimé du vecteur courant et tension. La taille des matrices est réduite selon le nombre de barres cassées [14].

4.2. Fracture partielle d'une barre

Une barre rétrécie ou mal soudée représente une augmentation de la résistance de cette dernière par rapport à une barre normale. Ce qui signifie le passage d'un faible courant dans cette barre. La matrice de résistance est modifiée en augmentant la valeur de la résistance de la barre défectueuse.

5 CALCUL DES INDUCTANCE EN CAS D'EXCENTRICITE

5.1. Formulation

La non-uniformité de l'entrefer peut être radiale ou bien axiale. Parler de la non uniformité de l'entrefer c'est évoquer principalement le problème d'excentricité du rotor. Cette dernière se répartie en deux catégories. Le premier est statique, la seconde est dynamique. L'excentricité statique se distingue par le fait que le centre du rotor n'est pas confondu avec celui du stator, tel que des rotors ou noyaux statoriques ovales. L'excentricité dynamique fait que le centre du rotor tourne autour du centre du stator, dans ce type d'excentricité, l'épaisseur minimale de l'entrefer est fonction de la position du rotor (**figure II.6**). La manifestation des deux excentricités en même temps donne naissance à ce qui est appelé excentricité mixte. Afin de calculer les inductances d'une machine susceptible de présenter ce type de défaut, il est nécessaire de modéliser la variation de l'épaisseur d'entrefer avant de faire intervenir la fonction d'enroulement [10].

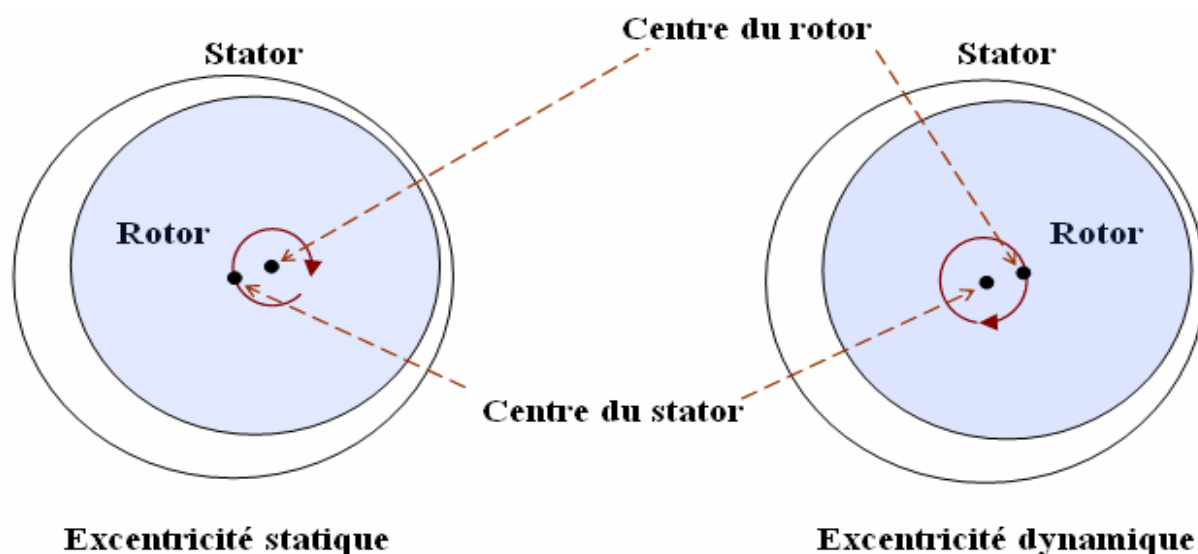


Figure II. 6 : Représentation de l'excentricité statique et dynamique

5.1.1. Excentricité radiale

L'excentricité est purement radiale si l'épaisseur de l'entrefer pour une ouverture angulaire ϕ donnée, et une position θ du rotor, est la même le long de l'axe Z de la machine. Autrement dit, la fonction de l'entrefer peut être fonction seulement de ϕ et θ . La **figure II.7** met en évidence une vue de face d'un rotor statiquement excentrique par rapport à l'axe de la machine, où O et O' désignent les centres du stator et du rotor respectivement. La distance est le décalage entre les deux centres, et reflète le degré de

déplacement du rotor. Elle est égale à la variation maximale qui peut survenir sur l'épaisseur de l'entrefer en faisant varier l'ouverture angulaire $OO' \phi$ de 0 jusqu'à 2π (angle mécanique).

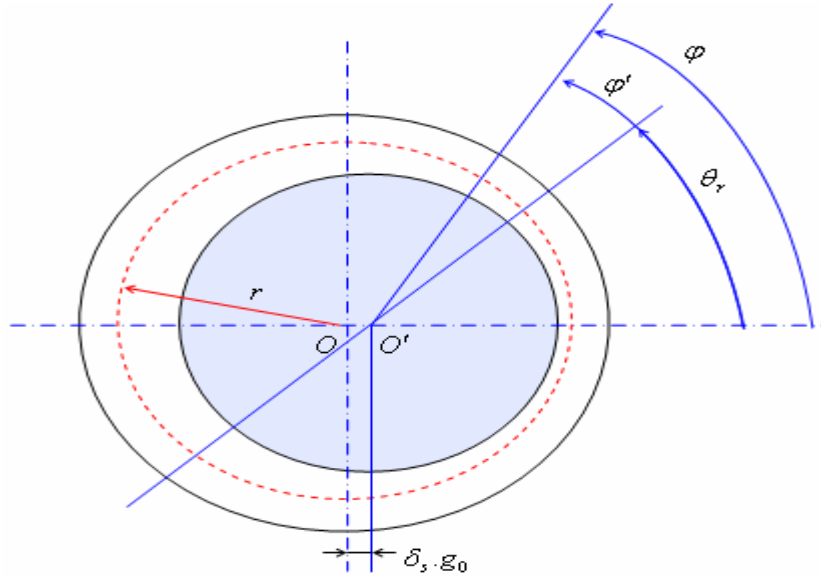


Figure II. 7 : Représentation schématique de l'excentricité statique

Dans le cas de l'excentricité statique, et comme le présente la figure II.14, la fonction d'entrefer aura pour expression [10]:

$$g(\varphi) = g_0 \cdot (1 - \delta_s \cos(\varphi)) \quad (\text{II.48})$$

Tel que δ_s est le degré d'excentricité statique. Si l'excentricité est dynamique, elle sera exprimée en fonction du degré d'excentricité dynamique δ_d comme suit :

$$g(\phi, \theta_r) = g_0 \cdot (1 - \delta_d \cos(\phi - \theta_r)). \quad (\text{II.49})$$

L'excentricité mixte est la manifestation des deux excentricités, statique et dynamique en même temps. Soit dans ce cas :

$$g(\phi, \theta_r) = g_0 \cdot (1 - \delta_s \cos(\phi) - \delta_d \cos(\phi - \theta_r)). \quad (\text{II.50})$$

Et si on tient compte de la représentation linéaire, il est possible de remplacer ϕ et θ_r par les longueurs des arcs correspondants $x = r\phi$ et $x_r = r\theta_r$. Il est tout de même possible de rassembler δ_s et δ_d dans une nouvelle grandeur δ caractérisant l'excentricité mixte. Dans ce cas, l'inverse de la fonction d'entrefer s'écrit :

$$g^{-1}(x, x_r) = \frac{1}{g_0 \{1 - \delta \cos(x/r - \rho)\}} \quad (\text{II.51})$$

Avec :

$$\delta = \sqrt{\delta_s^2 + \delta_d^2 + 2\delta_s\delta_d \cdot \cos(\rho)} \quad (\text{II.52})$$

Et

$$\rho = r \cdot \arctan \left(\frac{\delta_d \sin\left(\frac{x_r}{r}\right)}{\delta_s + \delta_d \cos\left(\frac{x_r}{r}\right)} \right) \quad (\text{II.53})$$

Une résolution analytique doit impérativement faire appel à une expression approximative en effectuant un développement en série de Fourier de (II.51) [10], Nous avons constaté qu'un parfait résultat sera obtenu en s'arrêtant au troisième terme, tel que :

$$P(x, x_r) = g^{-1}(x, x_r) \approx P_0 + P_1 \cos\left(\frac{x}{r} - \rho\right) + P_2 \cos\left(2\left(\frac{x}{r} - \rho\right)\right) \quad (\text{II.54})$$

Avec :

$$\begin{aligned} P_0 &= \frac{1}{g_0 \sqrt{1 - \delta^2}} \\ P_1 &= 2P_0 \cdot \left(\frac{1 - \sqrt{1 - \delta^2}}{\delta}\right) \\ P_2 &= 2P_0 \cdot \left(\frac{1 - \sqrt{1 - \delta^2}}{\delta}\right)^2 \end{aligned} \quad (\text{II.55})$$

6 Conclusion :

Nous avons utilisé un modèle multi-enroulement qui tient compte de la structure du rotor. Le choix d'un tel modèle est imposé par l'objectif de pouvoir simuler une cassure de barre. Pour cela, nous avons représenté toutes les équations des barres de rotor, aussi nous avons présenté les inductances en compte des harmoniques d'espace et les inductances en cas d'excentricité. Dans le chapitre suivant, des résultats de simulation de ce modèle pour différents essais (sain et défaillant) seront étudiés et aussi les effets de la variation de la charge sur les défauts. Nous avons exploité un code de calcul préétabli [10]. Fin nous a permis d'effectuer des simulations appropriés.

Chapitre III
Résultats de
Simulation des défauts
Rotoriques

1 Introduction :

Ce chapitre est consacré aux résultats de simulation, la simulation des défauts est effectuée ou changement quelques paramètres pouvant influencer le diagnostic global de la discussion précisera si oui ou non cette influence est apparente.

2 Fonctionnement du moteur sain :

Nous pouvons étudier l'évolution des grandeurs temporelles tels que les courants, le couple et la vitesse rotorique lorsque la cage rotorique ne présente aucune défaillance (sain), dans ce fin suit la simulation correspondent

2.1 Les grandeurs temporelles :

Dans les (Figure III.1), (Figure III.2), (Figure III.3), (Figure III.4) nous présenter les résultats des simulations d'un moteur sain pour les grandeurs temporelles (vitesse, le courant de la maille rotorique (a), le courant des phases statorique (A) et le couple électromagnétique).

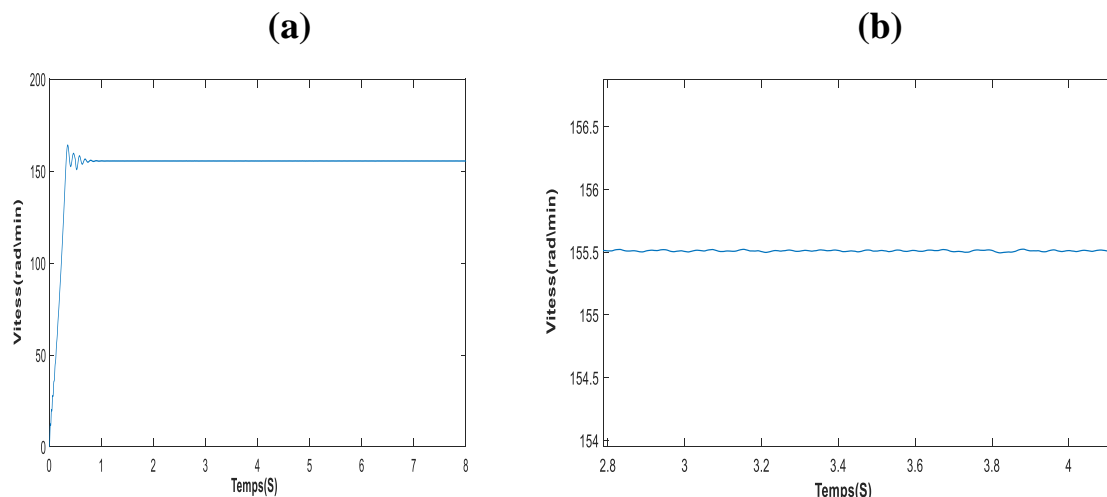


Figure III. 1: Vitesse de rotation d'un moteur sain avec charge 20 Nm (a), et son zoom en régime permanent (b)

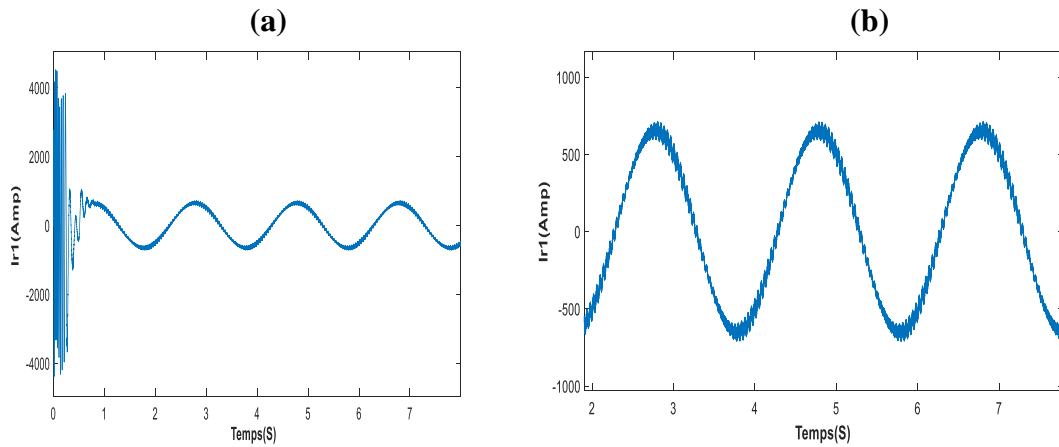


Figure III. 2 : Courant de la maille rotorique (a) avec charge de 20 Nm, et son zoom en régime permanent (b)

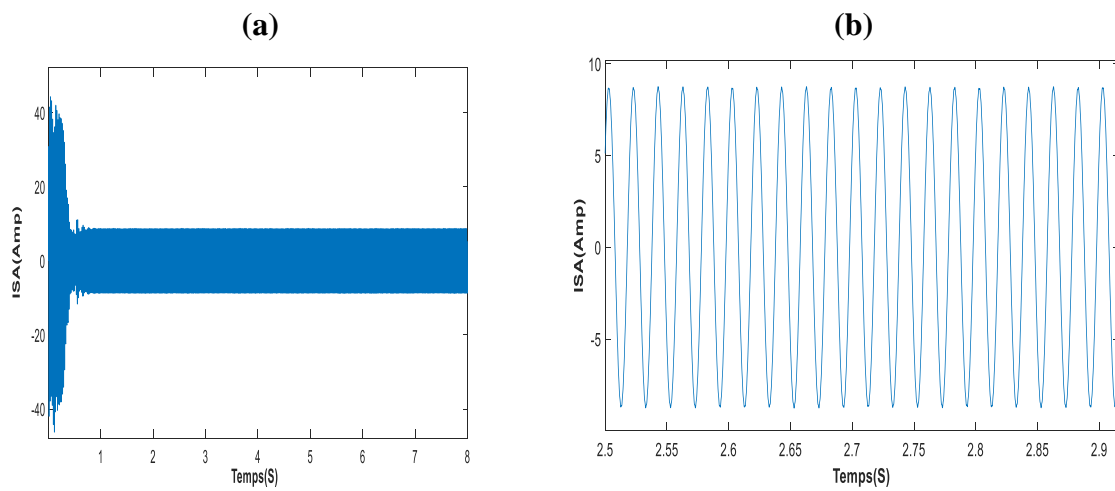


Figure III. 3 : Courant correspondant de la phase A statorique (a) avec charge de 40 Nm, et son zoom en régime permanent (b)

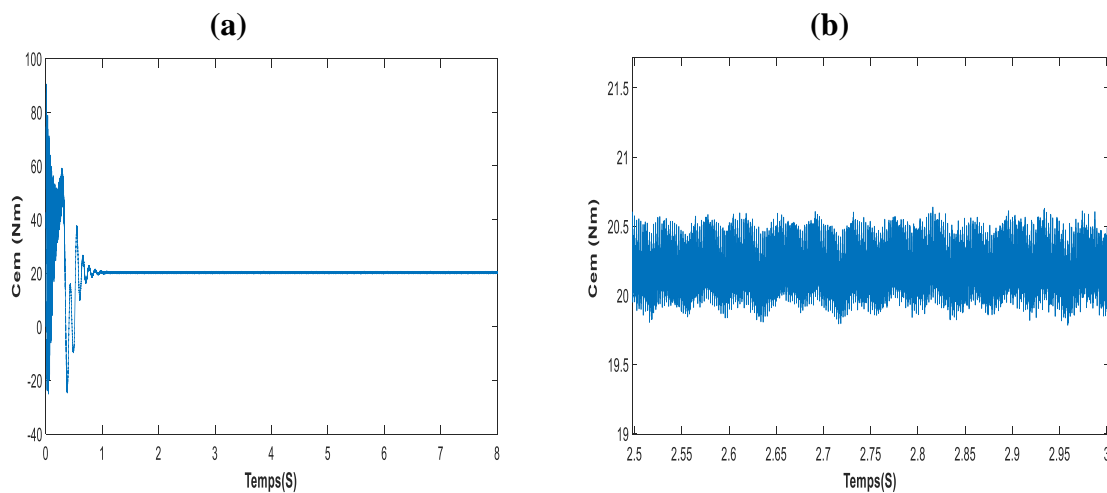


Figure III. 4 : Couple électromagnétique correspondant (a) avec charge de 40 Nm, et son zoom en régime permanent (b)

2.2 Spectre de courant :

A partir la (Figure III.5) n'observe aucune raie latérale autour du fondamentale à 50 Hz dans le cas moteur sain.

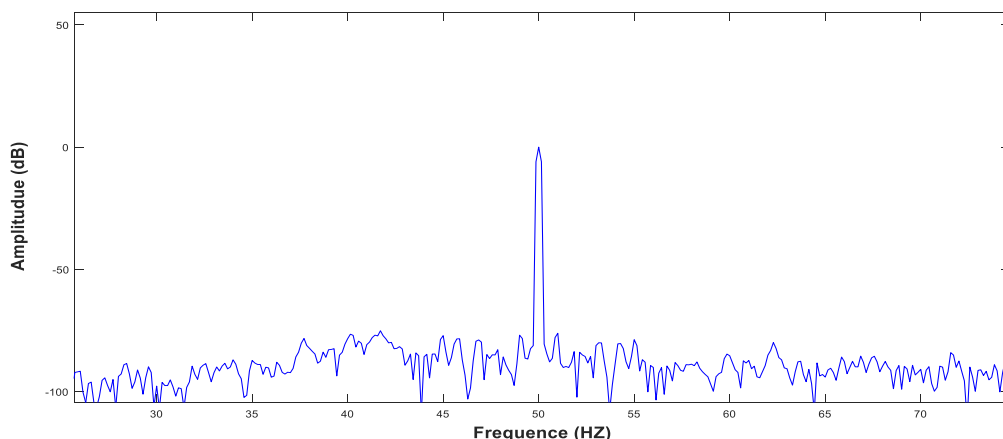


Figure III. 5 : Spectre correspondant du courant avec charge de 40 Nm. Etat sain

Les principaux harmoniques qu'on doit vérifier dans un spectre de courant à l'état sain (Figure III.6) sont les harmoniques d'encoche principales et éventuellement, les autres harmoniques d'espace, les PSHs. Les premières fréquences correspondant aux harmoniques d'encoches rotoriques PSHs sont :

$$f_{psh1} = (20 \cdot (1 - g) - 1) \cdot f_s = 927.21 \text{ Hz.}$$

$$f_{psh2} = (20 \cdot (1 - g) + 1) \cdot f_s = 1027.21 \text{ Hz.}$$

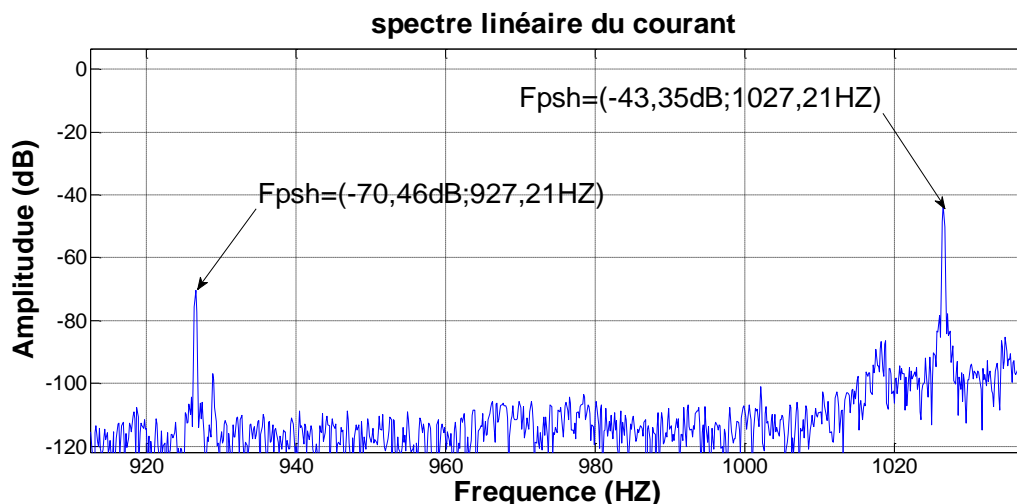


Figure III. 6 : Spectre correspondant du courant avec les PSHs. Etat sain

3 Défauts des barres cassées :

Dans la simulation des défauts de barres, le model du moteur sain sera utilisé tel qu'il est. Il suffit seulement de faire augmenter les résistances des barres en défaut à des valeurs pouvant refléter le degré de rupture partielle voulu.

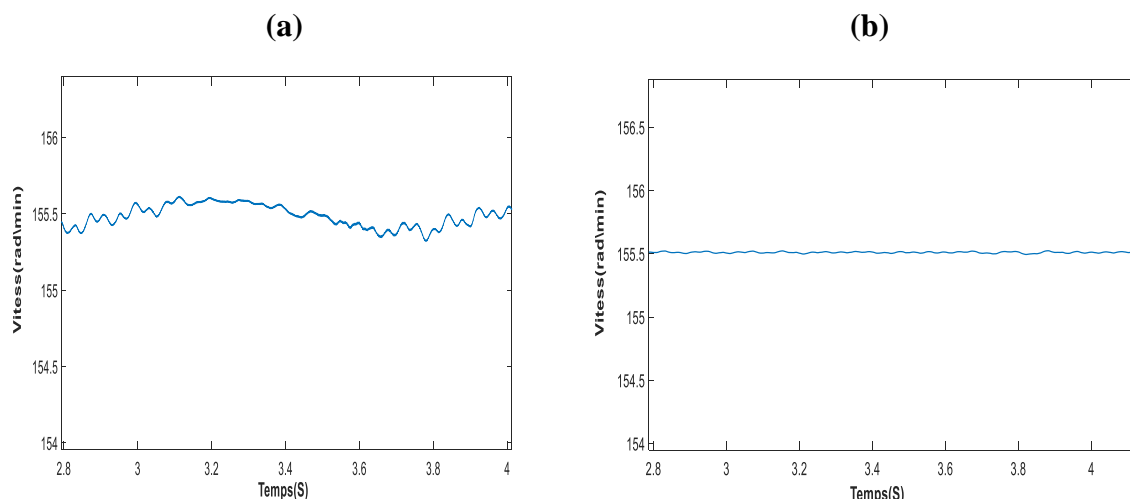


Figure III. 7 : Vitesse de rotation en régime permanent dans défaut deux cassure de barres (a) et d'un moteur sain (b) avec charge 20 Nm

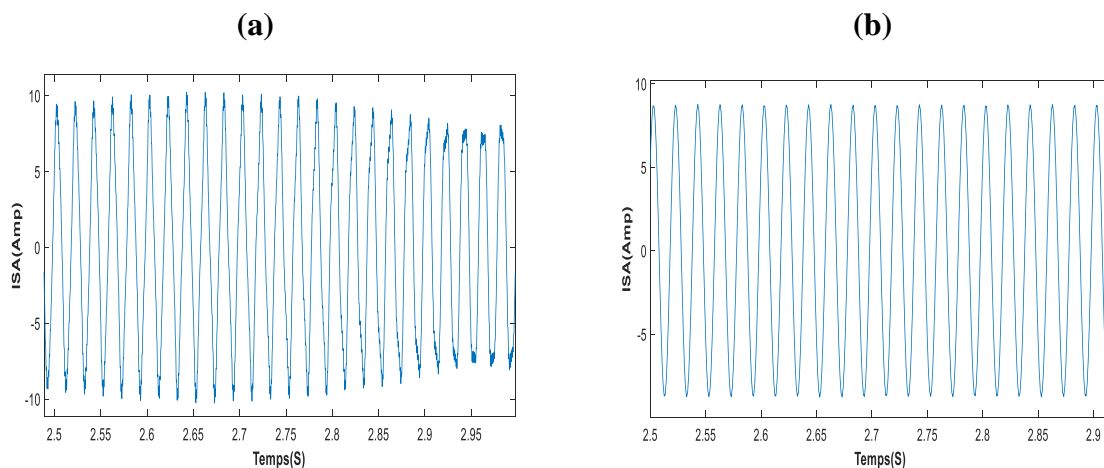


Figure III. 8 : Courant correspondant de la phase A statorique en régime permanent dans défaut deux cassure de barres (a) et d'un moteur sain (b) avec charge 20 Nm

A partir la (figure III.7) et (figure III.8) est difficile pour détecter le défaut.

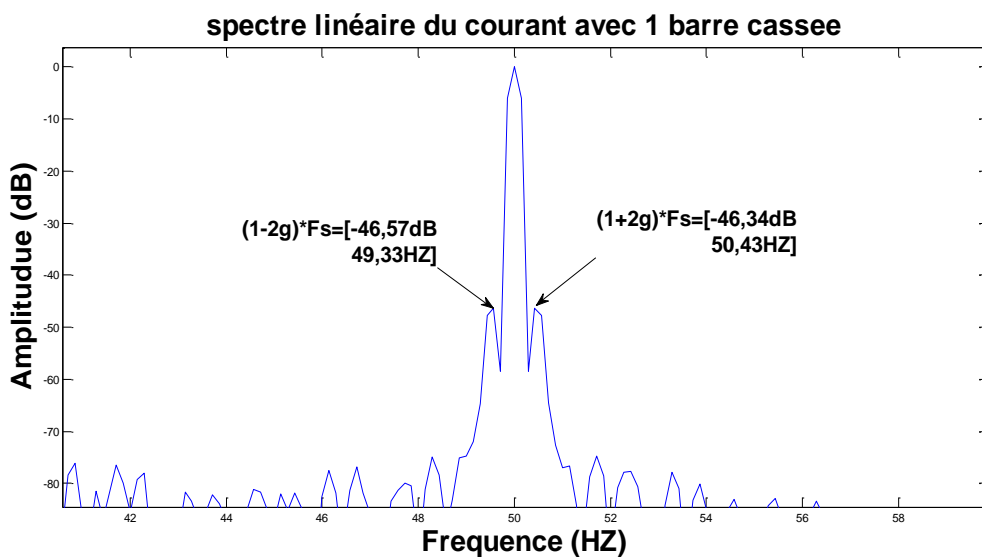


Figure III. 9 : Spectre du courant pour une barre cassée et une charge de 10 Nm

En fonctionnement états sain de la machine, on n’observe aucune raie latérale autour du fondamentale à 50 Hz (**Figure III.5**), qui représente le contenu spectral du courant statorique en régime permanent. Dans le défaut les cassures de barres rotoriques influe sur le courant d’alimentation par la création de nouveaux harmoniques de part et d’autre du fondamental (**Figure III.9**), leurs fréquences sont données par cette expression :

$$f_{b1} = (1 - 2g) f_s \text{ et } f_{b2} = (1 + 2g) f_s$$

$$f_{b1} = (1 - 2g) f_s = 49.33 \text{ Hz}$$

$$f_{b2} = (1 + 2g) f_s = 50.43 \text{ Hz}$$

3.1 Sélection et influence des paramètres :

On étudier quelques paramètres traditionnels comme la sévérité du défaut, la charge et autres paramètres comme influence de nombre barres cassées et le moment d’inertie.

3.1.1 Influence du la augmentation de la sévérité de défaut :

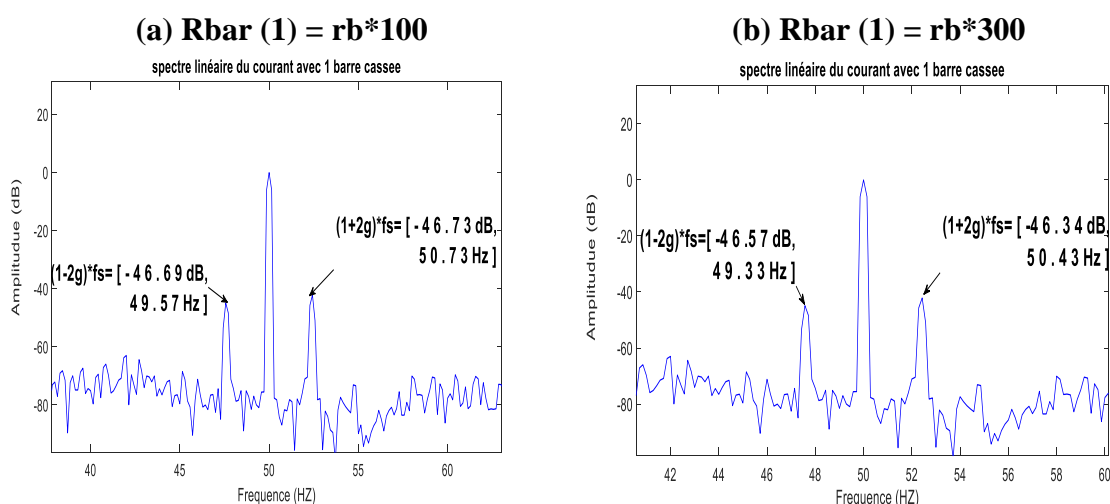


Figure III. 10 : Spectre du courant pour une barre cassée (a) et augmentation de la sévérité du défaut (b)

On remarque dans (**Figure III.10**) que l’augmentation de la sévérité du défaut provoque l’augmentation l’amplitude des harmoniques.

3.1.2 Influence des nombres barres cassées et la charge :

Le tableau ci-dessous regroupe les modules des raies caractérisant le défaut pour différentes charges et pour un nombre de barres cassées allant de 1 jusqu’à 4.

Tableau III. 1 : Amplitudes en dB des raies $(1 \pm 2g) * f_s$ en fonction de la charge, et pour différents nombres de barres cassées

La charge	Nombre de barre cassée	1	2	3	4
10 Nm	$(1-2g) f_s$	-46.57	-39.15	-35.31	-34.22
	$(1+2g) f_s$	-46.34	-38.01	-35.15	-34.07
25 Nm	$(1-2g) f_s$	-43.45	-34.83	-31.76	-31.07
	$(1+2g) f_s$	-42.88	-34.01	-30.71	-30.62
40 Nm	$(1-2g) f_s$	-44.84	-35.74	-34.07	-33.15
	$(1+2g) f_s$	-42.13	-32.18	-29.35	-28.27

3.1.3 Influence des nombres barres cassées :

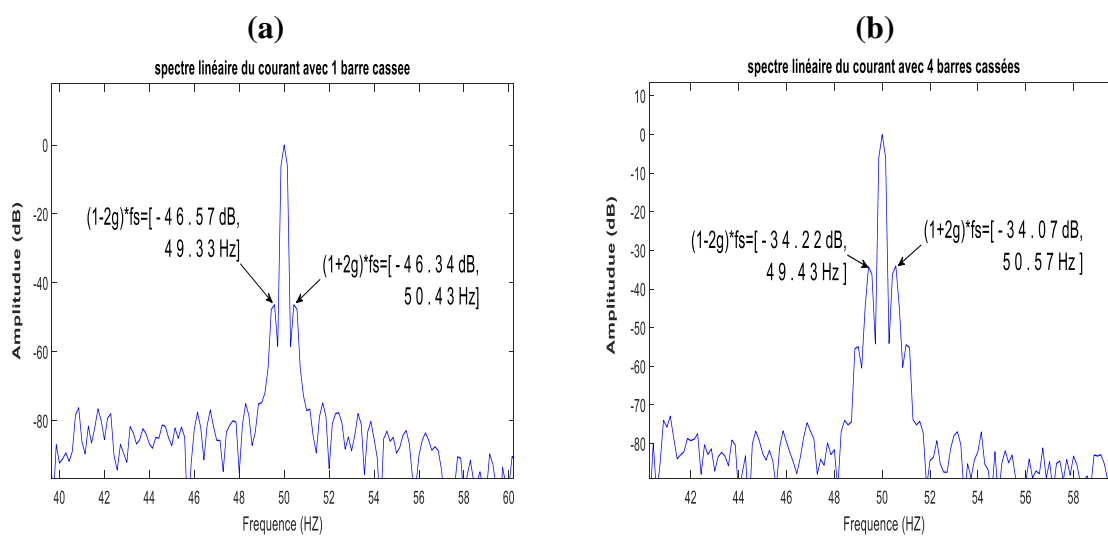


Figure III. 11 : Spectre du courant pour une barre cassée (a) et 4 barres cassées (b).la charge 10 Nm

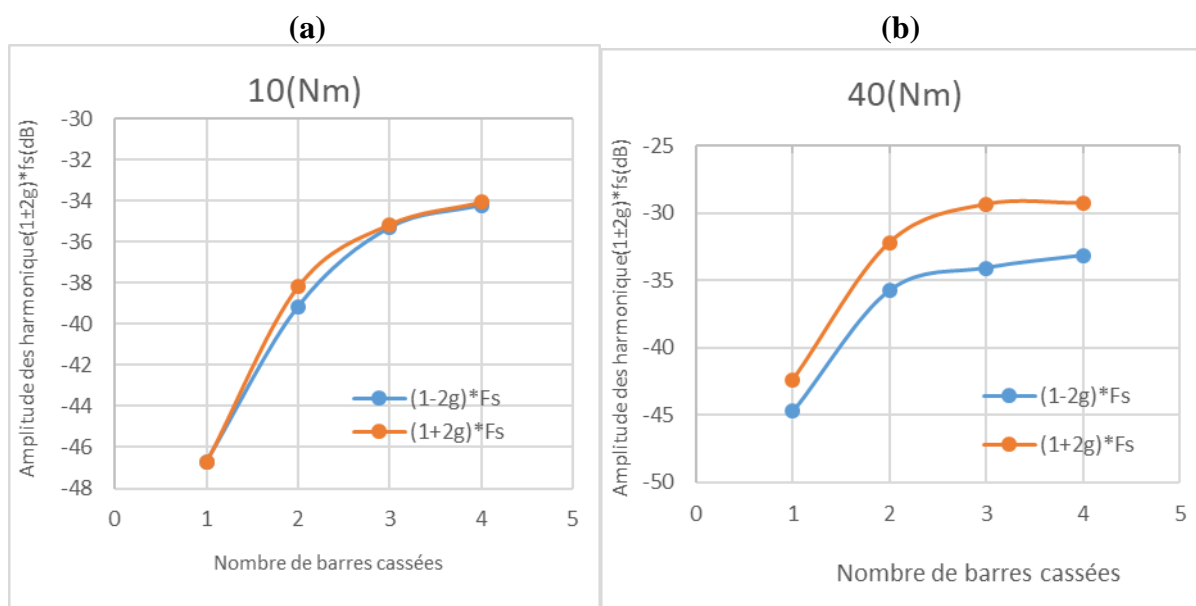


Figure III. 12 : Evolution des raies $(1 \pm 2g) * f_s$ en fonction du nombre de barres cassées pour charge de 10 Nm (a) et pour charge de 40 Nm (b)

A partir la Figure III.12 Il est bien claire à partiel des figures que l’amplitude des harmoniques du défaut le courants de phases statoriques est proportionnelle au nombre de barres cassées pour différent charge.

3.1.4 Influence de la charge :

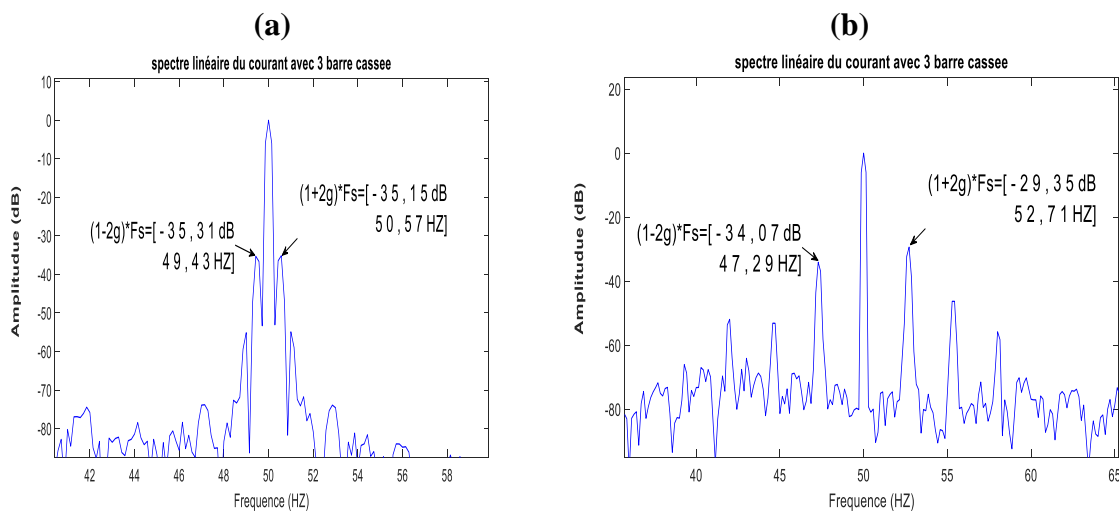


Figure III. 13 : Spectre du courant avec 3 barres cassées pour charge 10 Nm (a) et pour charge 40 Nm (b)

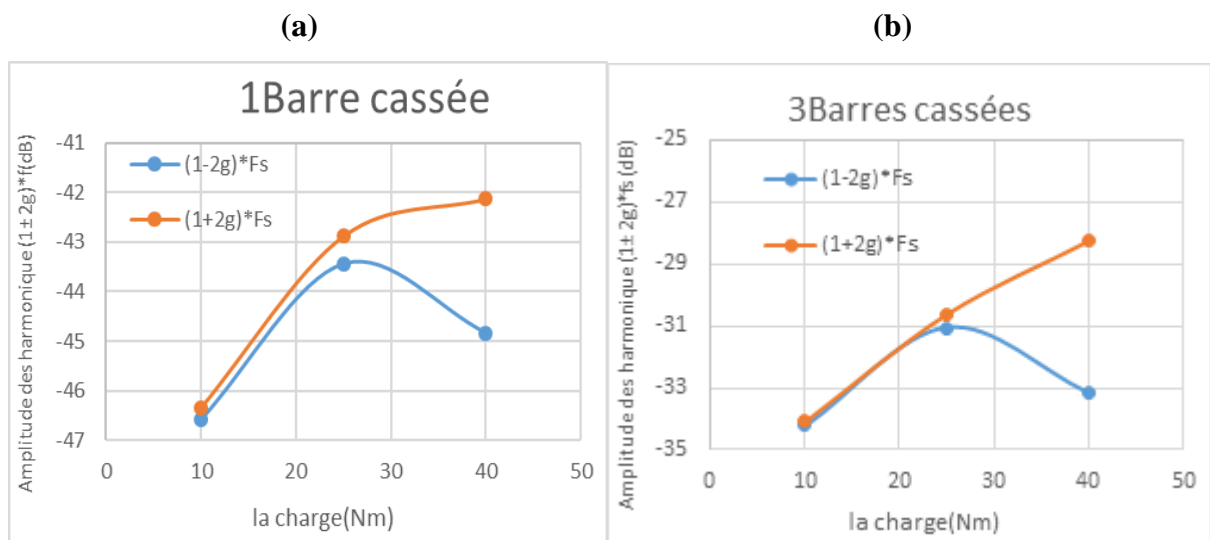


Figure III. 14 : Evolution des raies $(1\pm 2g) * fs$ en fonction de la charge, et pour 1 barre cassée (a) et pour 3 barres cassées (b)

Si la charge tend à augmenter de plus seulement la composant $(1+2g)*fs$ continue son évolution positive tandis que la composant $(1-2g)*fs$ décrois cela justifié que elle est bien fonction des oscillations de vitesse.

3.1.5 Influence de moment d'inertie :

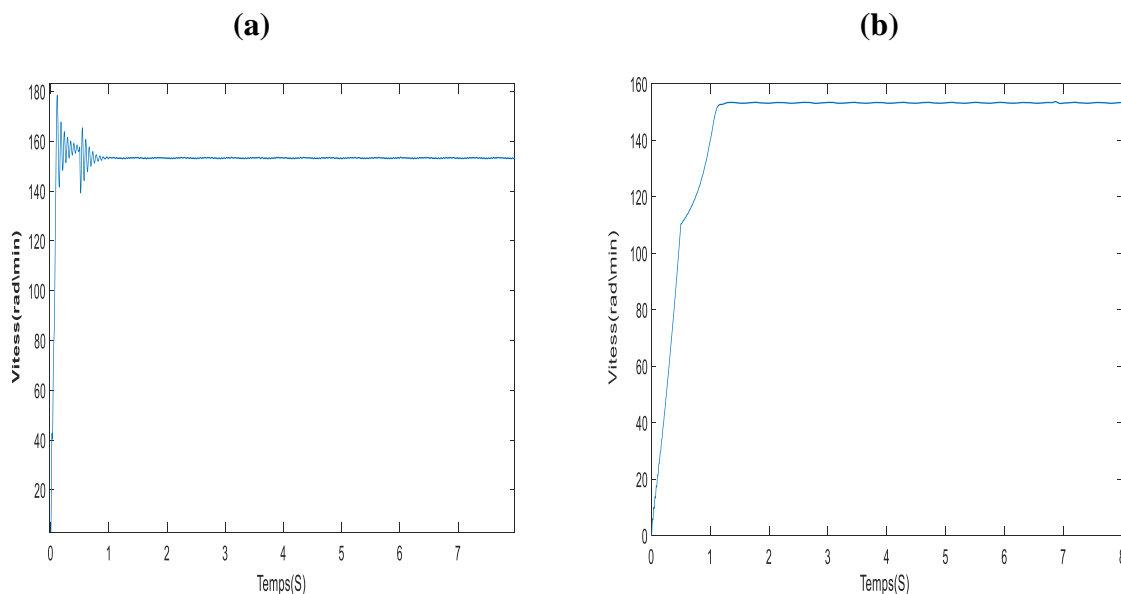


Figure III. 15 : Vitesse de rotation d'un moteur avec 1 barre cassée et charge de 40 Nm pour un moment d'inertie $j_i = 0.2$ (a) et $j_i = 0.15$ (b)

Lors du changement du moment d'inertie dans défaut cassure de barre, la valeur de vitesse de rotation presque reste la même.

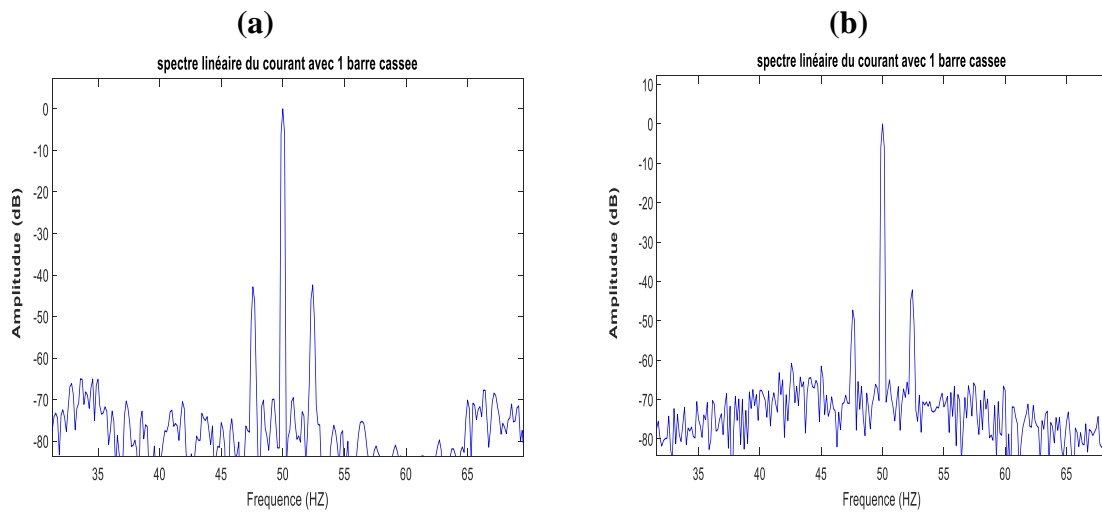


Figure III. 16 : Spectre du courant pour une barre cassée et charge de 40 Nm pour un moment d’inertie $j_i = 0.2$ (a) et $j_i = 0.15$ (b)

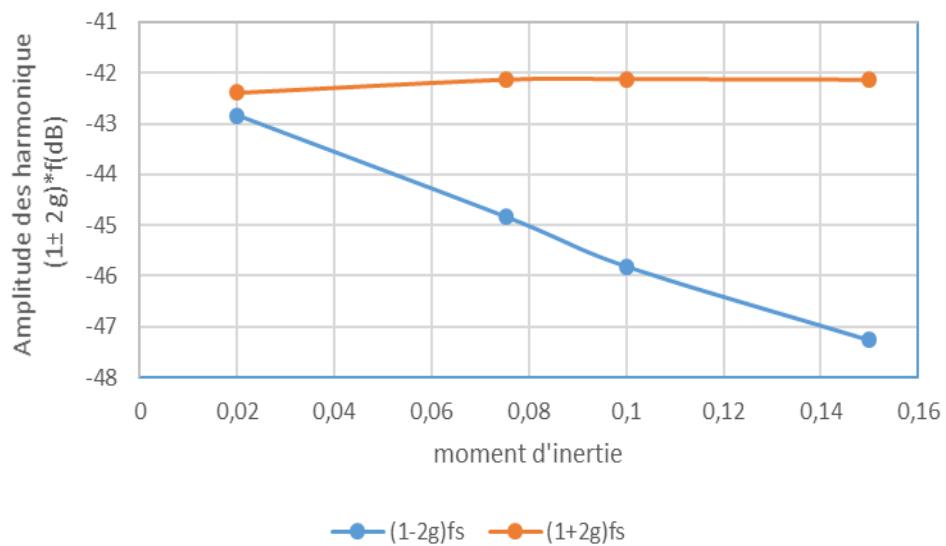


Figure III. 17 : Evolution des raies $(1 \pm 2g) * fs$ en fonction le moment d’inertie, et pour 1 barre cassée. la charge 40 Nm

A partir est la Figure III.16 et les courbes de la Figure III.17 l’augmentation du moment d’inertie inversement proportionnel avec les amplitudes des raies $(1-2g)*fs$ du fait que les oscillations vitesse diminuer dans les grands moments d’inertie.

4 DEFAUTS D'EXCENTRICITE :

4.1 Excentricité statique :

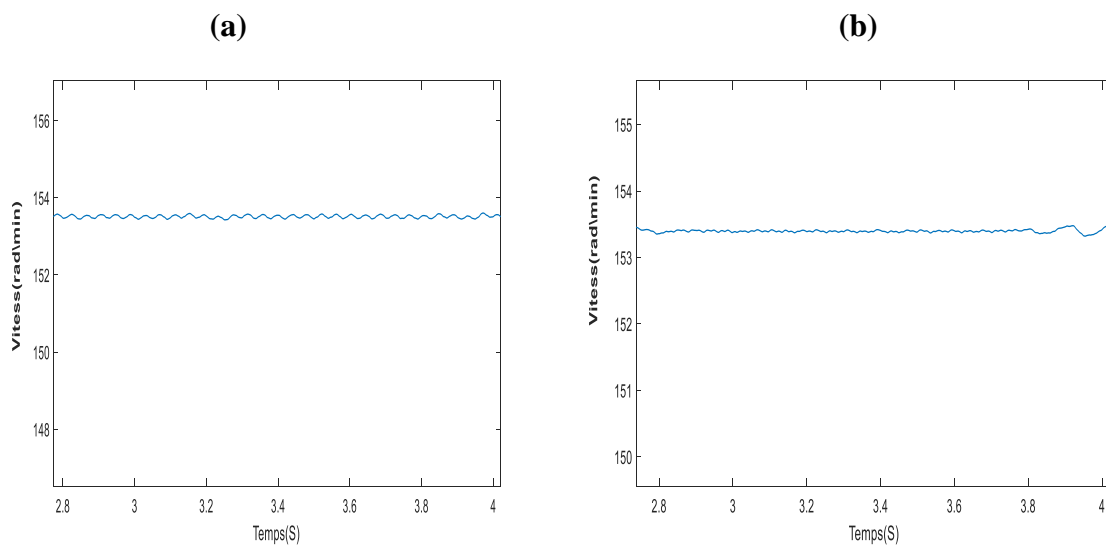


Figure III. 18 : Vitesse de rotation en régime permanent pour un fonctionnement avec un degré d'excentricité statique 40% et 10% dynamique (a) et fonctionnement sain (b).

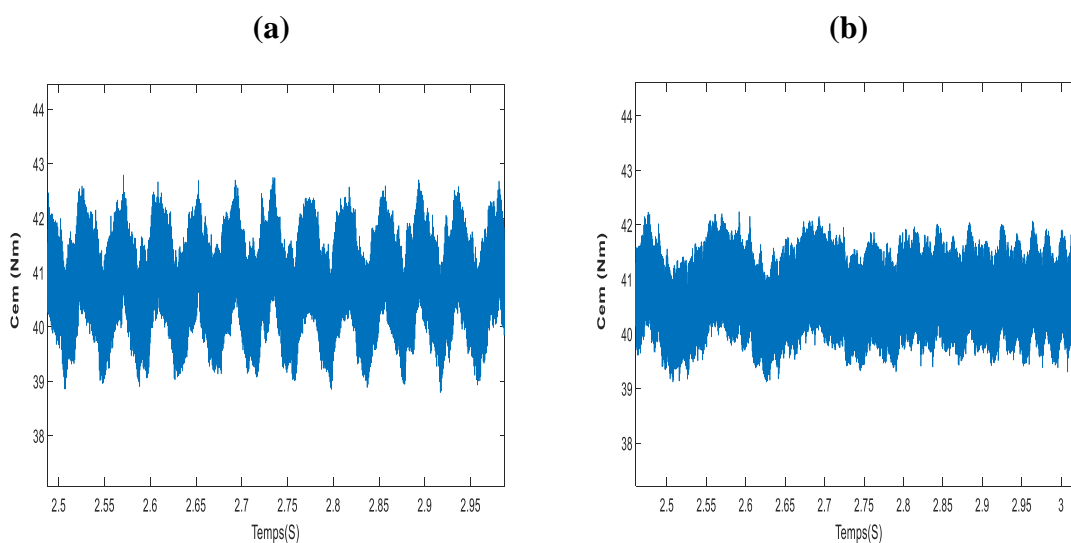


Figure III. 19 : Le couple en régime permanent pour un fonctionnement avec un degré d'excentricité statique 40% et 10% dynamique (a) et fonctionnement sain (b)

On remarque dans la **Figure III.18** et la **Figure III.19** il est difficile de détecter le défaut ou faire un bon diagnostic en analysant les grandeurs temporelles par contre avec le spectre de courant statorique dans la **Figure III.20** il est facile de détecter le défaut.

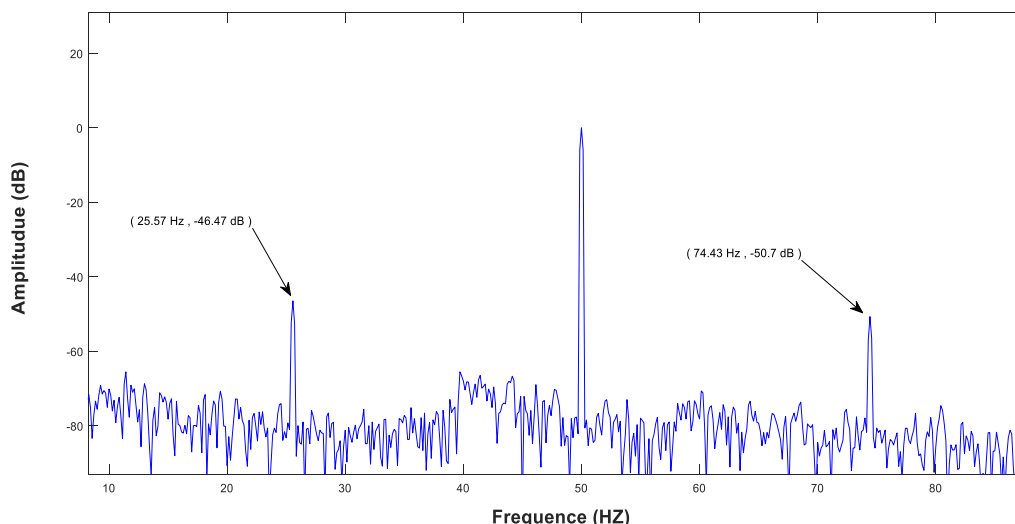


Figure III. 20 : Spectre du courant pour un fonctionnement avec un degré d'excentricité statique 40 % et 10% dynamique, et une charge de 40Nm

Tableau III. 2 : Evolution les amplitudes des harmoniques en fonction du degré d'excentricité statique.

Degré d'excentricité statique (%)	Etat sain 10%	20 %	40%	60%
$(1-(1-g)/p)*fs$	-59.67	-53.31	-46.47	-46.78
$(1+(1-g)/p)*fs$	-66.01	-59.87	-50.7	-45.14

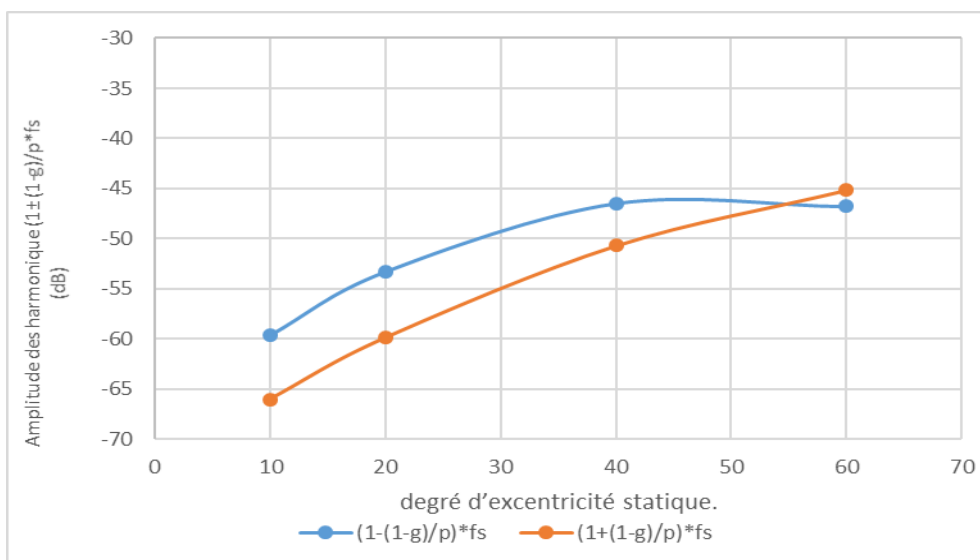


Figure III. 21 : Evolution des harmoniques de défaut en fonction du degré d'excentricité statique

A partir la **Figure III.21** et le **Tableau III.2** les amplitudes des raies $(1 \pm (1-g)/p) \cdot f_s$ évoluent avec l'évolution du degré d'excentricité statique. Ces raies apparaissent du fait un degré d'excentricité dynamique résiduel existe toujours. Il est évalué dans notre simulation à 10%.

4.2 Excentricité mixte :

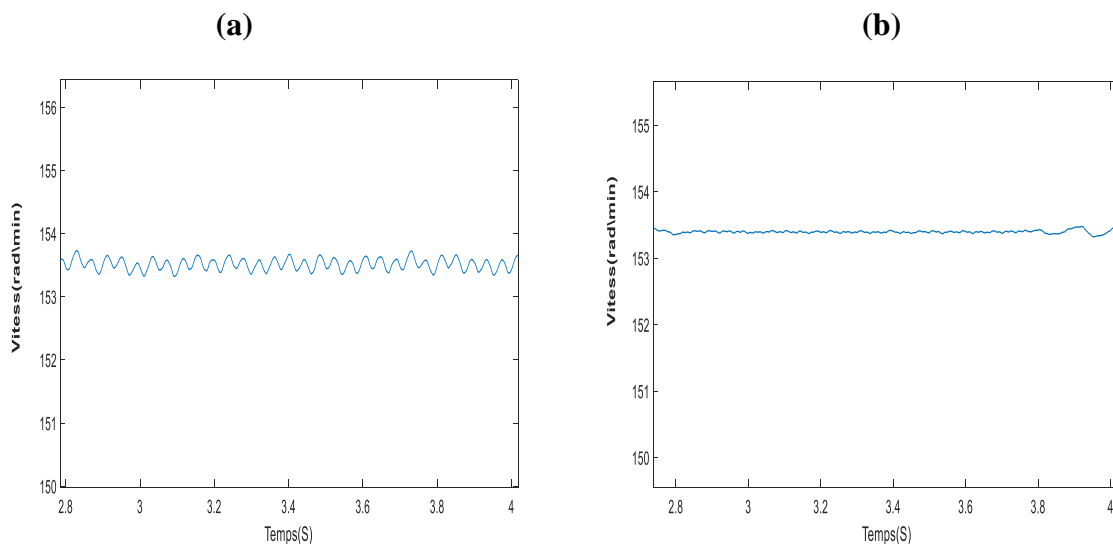


Figure III. 22 : Vitesse de rotation en régime permanent pour un fonctionnement avec un degré d'excentricité dynamique 30% et statique 30% (a) et fonctionnement sain (b)

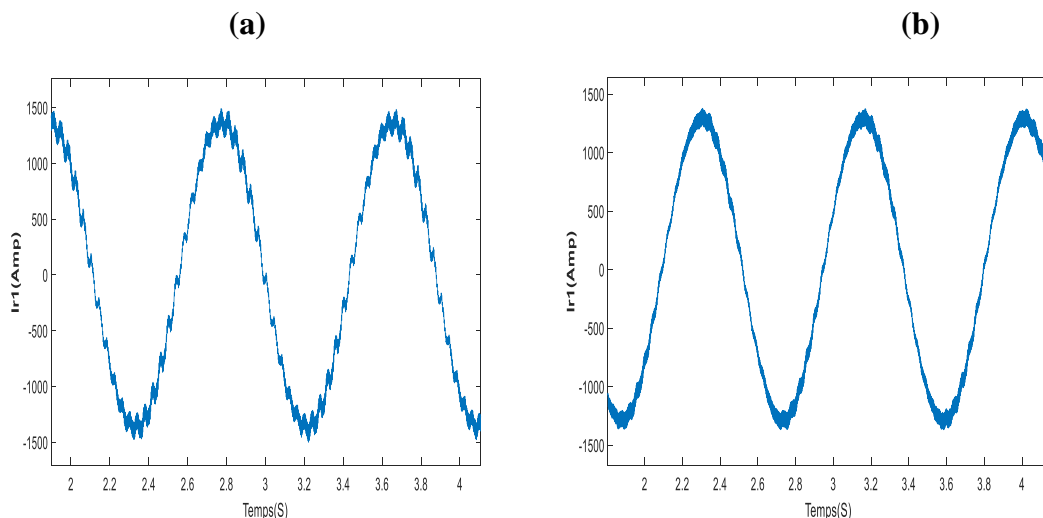


Figure III. 23 : Courant de la maille r1 rotorique, en régime permanent pour un fonctionnement avec un degré d'excentricité dynamique 30% et statique 30% (a) et fonctionnement sain (b)

A partir la **Figure III.22** et la **Figure III.23** peut remarquer une différence entre les signaux de vitesse et le courant de la maille rotorique en régime permanent dans défaut d'excentricité mixte par rapport le moteur à l'état sain.

Le spectre du courant statorique de la **Figure III.24**. Met en évidence les fréquences prédites par :

$$f_{mix} = f_s \pm k f_r$$

$$F_{mix 1} = (1 - (1-g)/p) * f_s$$

$$F_{mix 1} = (1 + (1-g)/p) * f_s$$

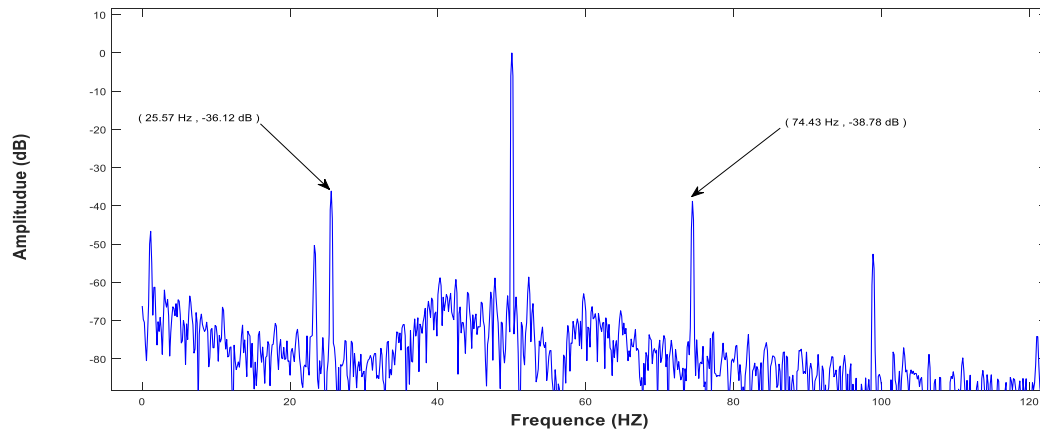


Figure III. 24 : Spectre du courant pour un fonctionnement avec un degré d'excentricité dynamique 30 %, statique 30% et une charge de 40Nm.

4.2.1 Influence du degré d'excentricité :

Tableau III. 3 : Evolution des amplitudes des harmoniques en fonction du degré d'excentricité

Degré d'excentricité (%)	Etat sain			
	10% 10%	20% 20 %	30% 30%	50% 30%
Amplitude des harmoniques (dB)				
$(1 - (1-g)/p) * f_s$	-59.67	-46.84	-38.92	-35.77
$(1 + (1-g)/p) * f_s$	-66.01	-53.24	-43.48	-30.29

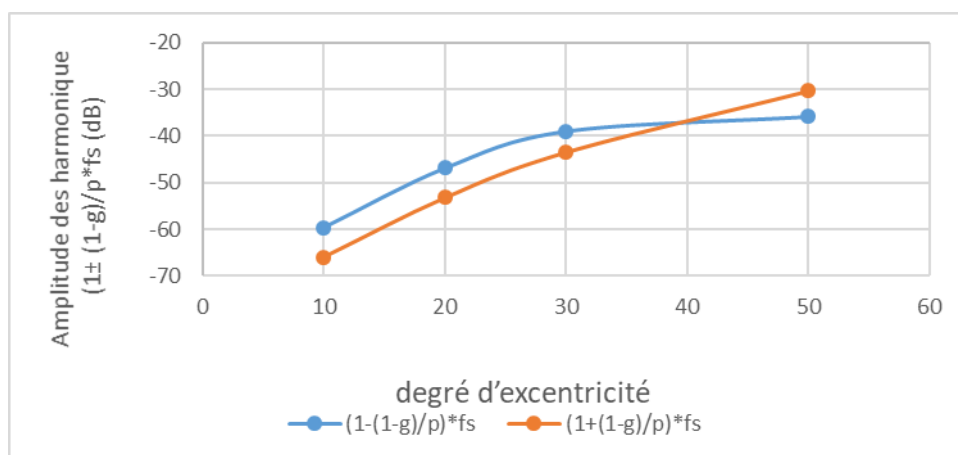


Figure III. 25 : Evolution des harmoniques en fonction du degré d'excentricité mixte

On remarque dans la Figure III.25 l'amplitude des rais développés avec l'augmentation du degré de sévérité du défaut.

4.2.2 Influence de la charge :

Tableau III. 4 : Evolution les amplitudes des harmoniques en fonction du la charge

La charge (Nm)	10	30	40	55
Amplitude Des harmoniques (dB)				
$(1- (1-g)/p)*fs$	-40.11	-40.10	-38.92	-38.43
$(1+ (1-g)/p)*fs$	-45.61	-45.38	-43.48	-43.31

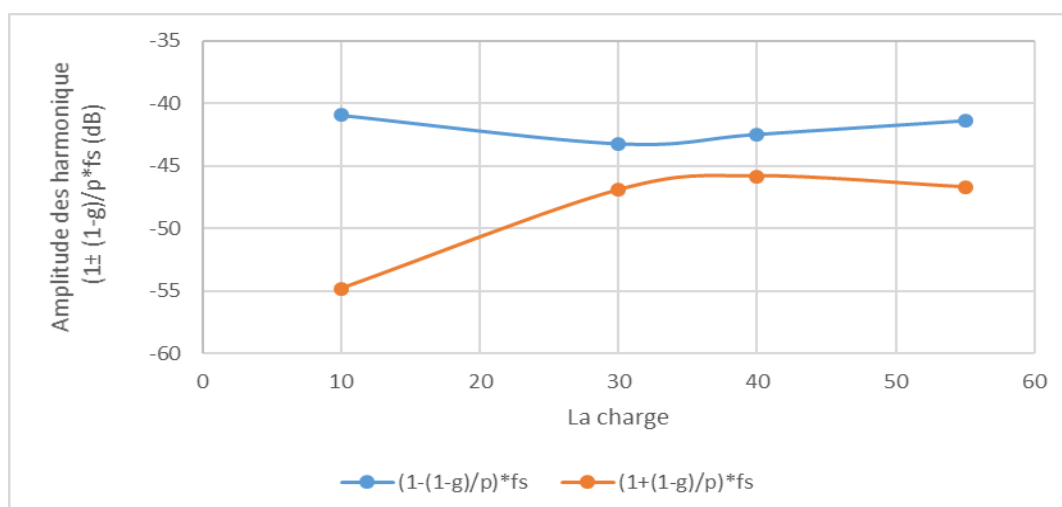


Figure III. 26 : Evolution des harmoniques en fonction du la charge

On remarque la charge affecte peu les amplitudes des harmoniques.

Tableau III. 5 : Evolution les amplitudes des harmoniques en fonction du moment d'inertie

Le moment D'inertie	0.02	0.0754	0.10	0.15
Amplitude Des harmoniques (dB)				
$(1 - (1-g)/p)*fs$	-34.44	-38.92	-39.16	-39.67
$(1 + (1-g)/p)*fs$	-37.55	-43.48	-43.97	-44.38

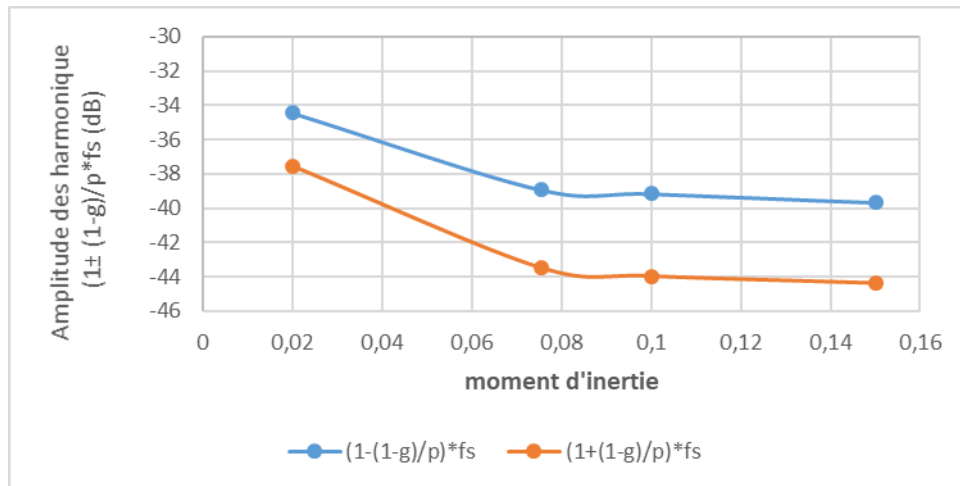


Figure III. 27 : Evolution des harmoniques en fonction du moment d'inertie

A partir le **Figure III.27** le moment d'inertie n'influe pas sur les amplitudes des harmoniques en spécifiquement les grands moments d'inertie.

4.2.3 Influence de l'inclinaison des barres :

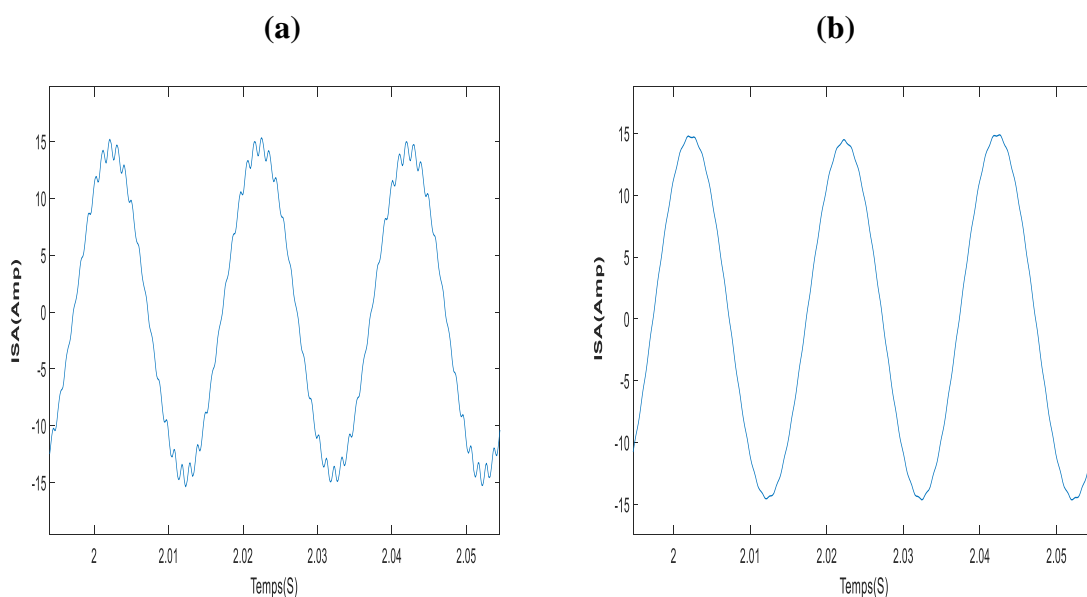


Figure III. 28 : Courant de la phase statorique en régime permanent, pour un fonctionnement non inclinaison (a) et avec inclinaison (b) avec un degré d'excentricité statique 30% et dynamique 30%, Cr=40Nm

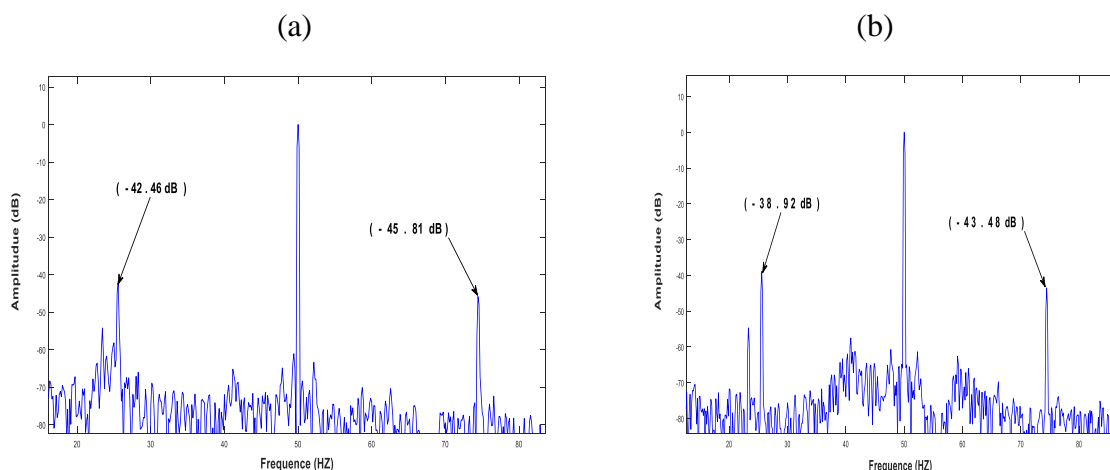


Figure III. 29 : Spectre du courant pour un fonctionnement avec un degré d'excentricité dynamique $\delta d = 30 \%$, et dynamique $\delta \delta = 30\%$, une charge de 40Nm charge pour un fonctionnement non inclinaison (a) et avec inclinaison (b)

On remarque dans la **Figure III.29** les amplitudes des harmonique du défaut presque la même soit barre incliner ou non incliner

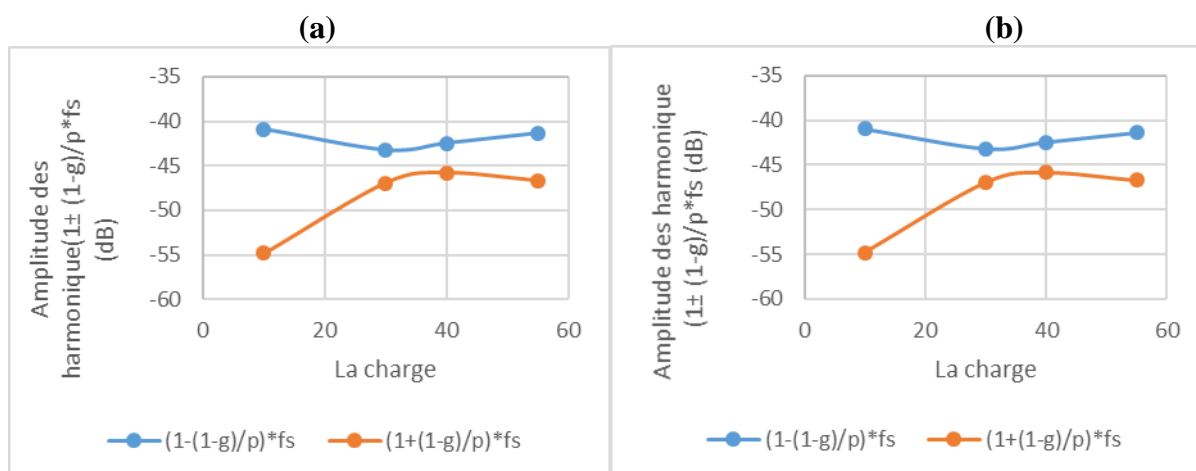


Figure III. 30 : Evolution des harmoniques en fonction du la charge pour un fonctionnement non inclinaison (a) et avec inclinaison (b) avec un degré d'excentricité statique 30% et dynamique 30%

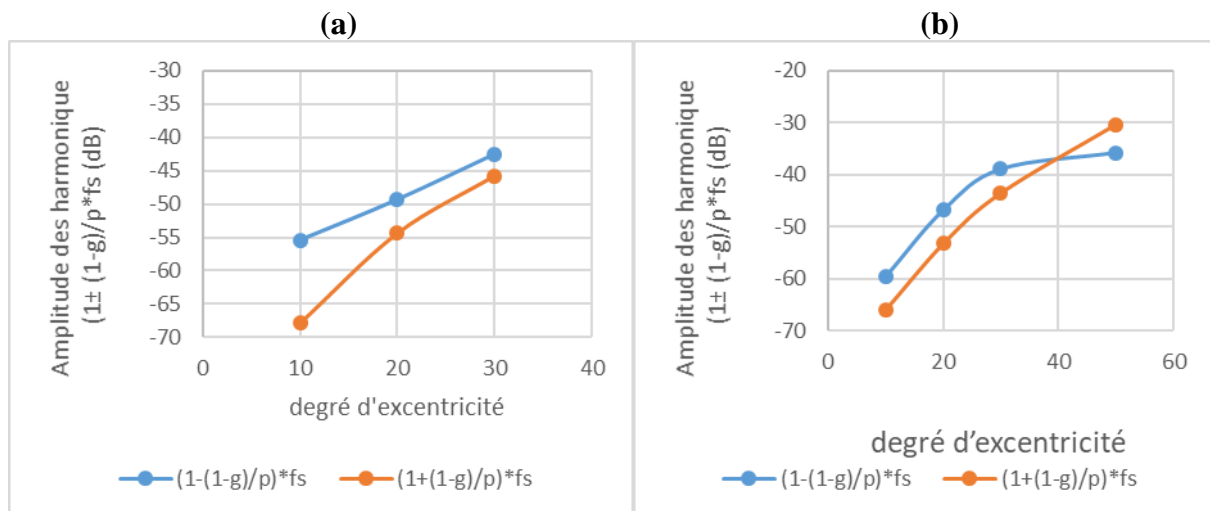


Figure III. 31 : Evolution des harmoniques en fonction du degré d'excentricité pour un fonctionnement non inclinaison (a) et avec inclinaison (b)

A partir la **Figure III.30** et la **Figure III.31** le degré de sévérité du défaut influencer sur les amplitudes des harmoniques soit barre incliner ou non incliner et la charge n'influer pas sur les amplitudes des harmoniques soit barre incliner ou non incliner.

5 Conclusion

Le spectre de courant statorique sont les plus adaptées à être prises comme moyen de détection des défauts soit défaut cassure des barres ou défaut d'excentricité surtout les harmoniques qui a côté la fondamentale, dans le cas cassure des barres rotorique fait apparaître des oscillations sur le courant, le couple et la vitesse. En plus, l'analyse harmonique des courants statoriques permet de constater une corrélation entre le défaut et les amplitudes des composantes à la fréquence $(1\pm 2.g) * f_s$, pour le cas des barres non contiguës affectées par le défaut, on risque de ne rien observer dans les spectres des courants .dans le défaut d'excentricité la charge n'influer pas dans les amplitudes des harmonique $(1\pm(1-g)/p) * f_s$ par contre le degré de sévérité du défaut est proportionnel avec les amplitudes de ces harmoniques.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la maintenance des machines tournantes et plus particulièrement la détection et le diagnostic des défauts rotorique (cassure de barre) dans la machine asynchrone triphasée à cage par analyse vibratoire en utilisant la transformé de Fourier rapide (FFT).

Dans le premier chapitre, nous avons présenté de manière générale la construction de la machine asynchrone à cage ainsi que les différents défauts qui peuvent altérer le fonctionnement ce type de machine. Nous avons cité des défauts qui se produisent au niveau du stator par exemple (court-circuit, circuit ouvert), et des défauts rotoriques par exemple (cassures de barres rotoriques et cassures d'anneaux) ainsi que des défauts mécaniques (défaut d'excentricité, défaut de roulement).

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté la modélisation triphasé multi enroulements d'une machine asynchrone à cage et en fin de ce chapitre les on a présenté ces équations sous forme espace d'état, la simulation sera faire dans le dernière chapitre.

Dans le dernière chapitre : nous avons fait toutes les simulations des cas présentés dans le chapitre deux et trois ainsi que les interprétations sur ces résultats.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] T.Tayeb et A.Imad « Diaganostic des Cassures des barres rotrique d'un Moteur asynchrone à cage » UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, M'Sila, 2020.
- [2] Z. Ahmed, « *Diagnostic des défauts de cassure de barres rotoriques dans la machine asynchrone triphasée,* » chez *Université Mohamed KHIDER*, Biskra. Algérie, 2013.
- [3] B.Abdelghani et B .Abdessattar, « Diagnostic des défauts rotoriques du moteur asynchrone triphasé par l'utilisation du modèle multi-enroulements, » Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued. Algérie, 2017.
- [4] B. Abdelhakim et S.Ayoub et K.Mohammed, « Détection des défauts rotoriques dans la machine asynchrone triphasée par analyse de la vitesse de rotation, » L'Université d'Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued 2020.
- [5] G.Didier (These_Gaetan_DIDIER), « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances, » L'Université Henri Poninacé, Nancy-I. France ,2004.
- [6] R.Djaber et H. Toufik, « Maintenance et Techniques de Diagnostic d'une Machine Asynchronen,» *Université de Ghardaïa. Ghardaïa, 2019.*
- [7] S.Merahi, « Diagnostic de défauts des machines électriques, » *Université Larbi Ben Mehidi,Oumel-Bouaghi 2020* p14 [6].
- [8] D.Belgacem et B.chouaib, « Diagnostic d'un moteur asynchrone d'un compresseur à piston, » *Université Echahid Hamma Lakhder, d'El-Oued ,2021 .*
- [9] H.Cherif, « Détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFTet ondelettes, » chez *Université Mohamed KHIDER*, Biskra. Algérie, 2014.
- [10] G.Adel « Diagnostic de la Machine Asynchrone Triphasée : Modèle Dédié à la Détection des Défauts », thèse de magister, Université de Batna, 2005.

- [11] M.Abdelwahab et D.Abdelhakim, « *Diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage,* » UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF DE M'SILA, M'SILA, 2006.
- [12] H.Sondes et K.Rayane, « Diagnostic des défauts rotoriques de la machine asynchrone par utilisation du modèle réduit issu du modèle multi –enroulements, » L'Université d'Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued, El Oued 2021.
- [13] D.Mohammed et M.Oussama et A.Souhaib, « Diagnostic des défauts rotoriques de la machine asynchrone par utilisation du module de Park,» L'Université d'Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued, El Oued, 2021.
- [14] M .Miloud, « Etude des Défauts dans La Machine Asynchrone à Cage d'Ecureuil par l'Emploi de la Fonction d'Enroulement Modifiée,»Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, Oran, 2009.
- [15] G. Adel, «CONTRIBUTION à la Modélisation de la Machine Asynchrone Triphasée Dédiée au diagnostic, » Université Mohamed KHIDER Biskra,Biskra, 2010.