

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 سعد دحلب بليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الآلية والكهروتقني
Département d'Automatique et d'Électrotechnique



Mémoire de Master

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Machine électrique

Présenté par :

GACEM OUSSAMA

&

TERFAI SIDAHMED

Diagnostic de défaut de la Machine Asynchrone à l'aide des composantes principales

Proposé par : Abdellaziz FERDJOUNI

Année Universitaire 2024-2025

Remerciements

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé, et la patience qu'Il m'a donné pendant toutes ces longues années d'études.

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à **Monsieur A. Ferdjouni**, notre promoteur, pour sa disponibilité, sa bienveillance et la qualité de son encadrement tout au long de ce travail.*

Ses conseils avisés, sa rigueur scientifique et son soutien constant ont été essentiels à la réalisation de ce mémoire.

*Je remercie également **Madame K. El Meraoui**, notre Co-promotrice, pour son accompagnement attentif, ses remarques pertinentes et son engagement tout au long du processus.*

Sa patience, son écoute et ses encouragements ont grandement contribué à la qualité de ce travail.

*Mes remerciements s'adressent aussi à l'ensemble des enseignants du **département d'Automatique et Électrotechnique**, qui ont su, au fil des années, transmettre leur savoir avec passion et exigence.*

*Je tiens à adresser mes sincères remerciements à **l'ensemble de l'administration du Département d'Automatique et Électrotechnique** pour les conditions favorables qu'elle a su offrir tout au long de notre parcours universitaire.*

En fin, je tiens à exprimer mes remerciements à tous ceux qui ont Contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

À ma mère, Tu as quitté ce monde, mais jamais mon cœur. À travers chaque ligne, chaque effort, tu es là. Invisible, mais essentielle. Qu'Allah, dans Sa grande miséricorde, lui accorde Son pardon, l'apaise dans Sa lumière, et l'élève parmi les croyants vertueux.

À mon père, pour sa force tranquille, sa patience et son soutien inébranlable. Malgré les difficultés, tu as su maintenir le cap, nous protéger, nous encourager, et nous transmettre l'importance de l'effort et de la dignité. Ce mémoire t'est aussi dédié, avec une immense gratitude.

À mes sœurs, pour leur affection, leur soutien constant et leur présence dans les bons comme les mauvais moments. Vous êtes un repère, une source de stabilité et de réconfort dans mon parcours.

À mon frère, compagnon de route dans cette vie, pour sa discrétion, ses encouragements sincères et sa confiance en moi. Merci d'avoir toujours été là.

À mes camarades de promotion, avec qui j'ai partagé non seulement des connaissances mais aussi des moments humains forts, faits de solidarité, de rire, de stress collectif et de petites victoires. Ensemble, nous avons grandi, chacun à notre rythme.

À tous mes amis, pour leur présence sincère et leurs mots justes. Merci d'avoir toujours été là quand j'avais besoin de souffler et à tous ceux qui m'aiment et tous ceux que j'aime.

À mes enseignants, et en particulier à ceux qui m'ont accompagné durant la réalisation de ce mémoire, pour leur disponibilité, leurs conseils éclairés et leur rigueur académique.

Enfin, je me dédie aussi ce mémoire. À moi-même. Pour avoir tenu bon malgré les échecs passés. Ce mémoire représente bien plus qu'un simple travail académique ; il incarne un cheminement personnel fait de remises en question, d'apprentissage, de croissance. Que ce travail soit, je l'espère, le début d'un futur encore plus riche en découvertes, en projets ambitieux, et en rêves réalisés

OUSSAMA.

Dédicace

À ma chère mère,

Ton amour inconditionnel, ta patience infinie tes prières silencieuses ont été ma lumière dans les moments sombres. Tu as toujours cru en moi, même lorsque moi-même j'en doutais. Merci pour ta tendresse et ton courage... Je t'aime.

À mon père,

Ton sens du devoir, ta rigueur et tes sacrifices discrets ont tracé la voie de mon engagement. Merci pour tes conseils, ton exemple et ton soutien constant.

À mes frères et sœurs,

Votre affection, vos encouragements et votre présence ont été une source de réconfort et d'inspiration. Chacun de vous, à sa manière, m'a aidé à avancer.

À mes enseignants,

Pour votre engagement, votre bienveillance et la qualité de votre accompagnement tout au long de mon parcours. Vous m'avez transmis bien plus que des connaissances : une méthode, une vision, et une passion pour ce domaine.

À vous tous, je dois une partie de ce que je suis devenu aujourd'hui.

Ce mémoire vous est dédié, avec toute ma gratitude, mon respect, et mon affection sincère.

SIDAHMED.

Résumé

ملخص: يتناول هذا البحث تشخيص الأعطال في المحركات الحثية ثلاثية الطور باستخدام التحليل في المكونات الرئيسية (ACP) للكشف وتحديد موقع الأعطال الداخلية بين اللفات (ITSC). يهدف البحث إلى تطوير طريقة موثوقة لتشخيص هذه الأعطال وتحسين الصيانة الوقائية للمحركات. تم تقديم نموذج للمحرك الحثي السليم. ومن بعد تم تطوير واستخدام طريقة ACP لتقليص أبعاد البيانات مع الحفاظ على المعلومات الأساسية، مما يسهل تشخيص الأعطال. أظهرت النتائج أن تحليل المركبات الرئيسية هو أسلوب فعال في تحليل وكشف الأعطال الستاتورية، وقد تم تأكيد ذلك من خلال التجارب المعملية.

الكلمات المفتاحية: المحرك الحثي ; العطل الستاتيوري ; MATLAB/Simulink; التحليل في المكونات الرئيسية (ACP) .

Résumé : Ce mémoire explore le diagnostic des défauts dans les machines asynchrones triphasées en utilisant l'Analyse en Composantes Principales (ACP) pour détecter et localiser les défauts de court-circuit entre spires (ITSC). L'objectif est de développer une méthode fiable pour diagnostiquer ces défauts et améliorer la maintenance préventive des machines. D'abord, la modélisation de la machine asynchrone saine est présentée. Par la suite, la méthode ACP est développée et appliquée pour réduire la dimensionnalité des données tout en préservant les informations essentielles. Les résultats montrent que l'ACP est une méthode efficace pour analyser et détecter les défauts statoriques. Une validation par des essais expérimentaux et réalisée.

Mots clés : Machine asynchrone ; Défaut statorique ; MATLAB/ Simulink ; Analyse en Composantes Principales (ACP).

Abstract: This thesis focuses on fault diagnosis in three-phase asynchronous machines using Principal Component Analysis (PCA) to detect and locate inter-turn short-circuit faults (ITSC). The goal is to develop a reliable method for diagnosing these faults and improving the preventive maintenance of machines. Firstly, a model of the healthy asynchronous machine is presented. Then, the PCA method is developed and used to reduce the dimensionality of data while preserving essential information. The results show that PCA is an effective method for analyzing and detecting stator faults. Finally, experimental tests validate these results.

Keywords: Asynchronous machine; Stator fault; MATLAB/ Simulink; Principal Component Analysis (PCA).

Liste des acronymes et abréviations

Acronymes et abréviations

d, q : Axes longitudinal et transversal (transformations de Park)

V : Tension (V)

i : Courant (i)

R_s : Résistance statorique

R_r : Résistance rotorique

L_s : inductance statorique

L_r : inductance rotorique

L_m : inductance mutuelle

Φ : Flux.

Φ_s : Flux statorique

Φ_r : Flux rotoriques

p_r : Matrice de transformation de Park

p_s : Matrice de transformation de Park liée au stator

θ : Angle décrivant une position particulière dans l'espace, mesuré par rapport à une référence fixée par rapport au stator.

ω_s : la vitesse angulaire des axes d-q dans le repère lié au stator

ω_r : la vitesse angulaire des axes d-q dans le repère lié au rotor

ω : la vitesse angulaire électrique de rotor

p : Nombre de pair de pôles

Ω_r : la vitesse mécanique

c_e : Couple électromagnétique

c_r : Couple de charge résistant

J : Moment d'inertie des masses tournantes

MAS : Machine asynchrone triphasé

$ITSC$: court-circuit entre spires statoriques

$[R_s]$: Matrice des résistances statoriques.

$[R_r]$: Matrice des résistance rotoriques.

$[V]$: le vecteur de commande

Liste des acronymes et abréviations

$[L_s]$: Matrice des inductances propres et mutuelles entre phases statoriques.

$[L_r]$: Matrice des inductances propres et mutuelles entre phases rotoriques.

$[L_{sr}]$: Matrice des inductances mutuelles entre phases statoriques.

$[L_{rs}]$: Matrice des inductances mutuelles entre phases rotoriques.

$[A]$: le vecteur d'état.

$[X]$: la matrice de système.

$[B]$: la matrice d'entrée.

Table des matières

Table des matières

Introduction générale	1
1. Chapitre 1 : Modélisation D'une MAS Saine.....	3
1.1 Constitution de la MAS	4
1.1.1 Le stator.....	5
1.1.2 Le rotor	6
1.1.3 Les paliers	6
1.1.4 Arbre.....	6
1.1.5 La carcasse	7
1.2 Le principe de fonctionnement de la MAS	7
1.3 Défauts électriques possible sur les machines asynchrones	8
1.3.1 Défauts statoriques	8
1.3.2 Défauts rotoriques	8
a. <i>Excentricité Statique</i>	8
b. <i>Excentricité Dynamique</i>	9
c. <i>Excentricité Mixte</i>	9
1.3.3 Défauts mécaniques.....	10
1.3.4 Défauts magnétiques	10
1.3.5 Autres défauts courants	10
1.4 Hypothèse simplificatrice.....	10
1.5 Modélisation de la MAS	11
1.6 Application de la transformation de Park à la MAS.....	13
1.6.1 Choix du repère d-q.....	16
1.6.2 Les équations électriques dans un référentiel lié au stator	16

Table des matières

1.6.3	Les équations magnétiques dans un référentiel lié au stator	17
1.7	Couple électromagnétique	17
1.8	L'équation mécanique	17
1.9	Modèle d'état de la MAS saine dans un référentiel lié au stator	18
1.10	Résultats de simulation.....	19
1.11	Interprétation des résultats	22
1.12	Conclusion	22
2.	Chapitre 2 : Analyse composantes principales (ACP)	23
2.1.	Introduction	24
2.2.	Le principe de la méthode ACP	24
2.3.	Les axes principaux	24
2.3.1.	La première composante principale (PC1).....	24
2.3.2.	La deuxième composante principale (PC2)	25
2.4.	Les étapes de la méthode des composantes principales (ACP).....	25
2.4.1.	Étape 1 : Collecte des données.....	25
2.4.2.	Étape 2 : Création de la matrice de données	26
2.4.3.	Étape 3 : Centrage des données.....	27
2.4.4.	Étape 4 : Calcul de la matrice de covariance	28
2.4.5.	Étape 5 : Les valeurs propres et les vecteurs propres.....	29
2.4.6.	Étape 6 : Projection des données sur PC1.....	31
2.4.7.	Étape 7 : Interprétation.....	32
2.5.	Détection et diagnostic basés sur l'ACP	33
2.5.1	Acquisition des courants statoriques	33

Table des matières

2.5.2	Analyse spectrale par vecteurs et valeurs propres.....	33
2.5.3	Détection de défauts et évaluation de leur sévérité	33
2.6.	Acquisition des courants.....	34
2.7.	Détection de défauts dans la MAS.....	35
2.7.1.	Cas sans défauts :	35
2.7.2.	Défaut d'enroulement statorique :.....	36
2.7.3.	Rupture de barres du rotor :.....	37
2.8.	Calcul de l'indice de gravité.....	38
2.9.	Conclusion	38
3.	Chapitre 3 :Application de l'ACP au diagnostic de défaut.....	40
3.1	Introduction	41
3.2	Simulation de la MAS saine.....	41
3.2.1	<i>Interprétation des graphes de simulation.....</i>	45
3.2.2	<i>Application de l'ACP pour l'analyse des données</i>	46
3.3	Simulation de la MAS avec défaut.....	48
3.3.1	Interprétation des graphes de simulation.....	52
3.3.2	Application de l'ACP dans l'Analyse des Données	53
3.4	Simulation d'uneMASavec défautITSC sur plusieurs phases statoriques	55
3.4.1	Défauts ITSC dans la phase A.....	55
a.	<i>Interprétation des graphes de simulation.....</i>	57
3.4.2	Défaut ITSC dans la phase B.....	58
a.	<i>Interprétation des graphes de simulation.....</i>	60
3.4.3	Défaut ITSC dans la phase C	60
a.	<i>Interprétation des graphes de simulation.....</i>	62

Table des matières

3.5	Analyse expérimentale pour différents cas de fonctionnement	63
3.5.1	Description de banc d'essai	63
3.6	Conclusion	75
	Conclusion générale.....	76
	Bibliographie	77
	Annexe	79

Liste des figures

Liste des Figures

Figure 1.1 – Éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil	4
Figure 1.2 – Structure des moteurs asynchrone avec un rotor à cage d'écureuil.....	7
Figure 1.3 – Excentricité Statique	8
Figure 1.4 – Excentricité Dynamique.....	9
Figure 1.5 – Excentricité Mixte.....	9
Figure 1.6 – Position des axes d-q par rapport aux axes de la machine	13
Figure 1.7 – Schéma de simulation sous Simulink	18
Figure 1.8 – Courants statoriques de Park	19
Figure 1.9 – Flux rotoriques	19
Figure 1.10 – Couple électromagnétique	19
Figure 1.11 – Vitesse mécanique	20
Figure 1.12 – Courants statoriques triphasés	20
Figure 2. 1. Les axes (PC 1/PC 2) avec nuage des individus dans l'espace affine	24
Figure 2. 2. Structure d'algorithme proposes	33
Figure 2. 3. Modèle de courant 3D pour une MAS saine.....	34
Figure 2. 4. Modèle de courant 3D pour une MAS avec défaut ITSC	35
Figure 2. 5. Modèle de courant 3D pour une MAS avec des barres de rotor cassées.....	36
Figure 2.6. Algorithme de détection et de diagnostic de défaut.....	36
Figure 3. 1. Courants Statoriques triphasés i_{as}, i_{bs}, i_{cs}	40
Figure 3. 2. Courants Rotoriques triphasés i_{ar}, i_{br}, i_{cr}	40
Figure 3. 3. couple électromagnétique (C_e)	41
Figure 3. 4. Vitesse Mécanique	41
Figure 3. 5. Courants Statoriques de Park i_{ds}, i_{qs}	41
Figure 3. 6. Courants Rotoriques de Park i_{dr}, i_{qr}	42
Figure 3. 7. Flux Rotoriques de Park Φ_{dr}, Φ_{qr}	42
Figure 3. 8. Flux Statoriques de Park Φ_{ds}, Φ_{qs}	42
Figure 3. 9. projections des composantes principales en fonction de variation de couple de charge (C_r)	45
Figure 3. 10. projection les l'Indices des sévérité SS_t, SS_p et SS_v en fonction de C_r	45

Liste des figures

Figure 3. 11. Courants Statoriques triphasé i_{as}, i_{bs}, i_{cs}	46
Figure 3. 12. Courants Rotoriques triphasé i_{ar}, i_{br}, i_{cr}	47
Figure 3. 13. Courants Statoriques de Park i_{dsiqs}	47
Figure 3. 14. Courants Rotoriques de Park i_{dr}, i_{qr}	48
Figure 3. 15. Flux Rotoriques de Park Φ_{dr}, Φ_{qr}	48
Figure 3. 16. Flux statoriques de Park Φ_{ds}, Φ_{qs}	49
Figure 3. 17. couple électromagnétique.	49
Figure 3. 18. Vitesse Mécanique.	49
Figure 3. 19. projection dans le plan des composantes principales z_1 en fonction de z_2 en fonction de variation de couple de charge (Cr)	52
Figure 3. 20. projection les l'Indices des sévérité SSt, SSp et SSv en fonction de Cr	52
Figure 3. 21. évolution des indices SSt (indice de sévérité statorique) pour la phase A avec différentes spires	54
Figure 3. 22. projection dans le plan des composantes principales z_1 en fonction de z_2 dans différentes Cr avec 6 spires.....	54
Figure 3. 23. projection dans le plan des composantes principales z_1 en fonction de z_2 dans différentes Cr avec 24 spires.....	55
Figure 3. 24. projection dans le plan des composantes principales z_1 en fonction de z_2 dans différentes Cr avec 30 spires.....	55
Figure 3. 25. évolution les indices sévérité statorique SSt pour la phase B avec différentes spires.....	57
Figure 3. 26. projection dans le plan des composantes principales z_1 en fonction de z_2 dans différentes Cr avec 6 spires.	57
Figure 3. 27. projection dans le plan des composantes principales z_1 en fonction de z_2 dans différentes Cr avec 24 spires.	57
Figure 3. 28. projection dans le plan des composantes principales z_1 en fonction de z_2 dans différentes Cr avec 30 spires.	58
Figure 3. 29. évolution les indices de sévérité statorique SSt pour la phase C avec différentes spires.....	59
Figure 3. 30. projection dans le plan des composantes principales z_1 en fonction de z_2 dans différentes Cr avec 6 spires	60
Figure 3. 31. projection dans le plan des composantes principales z_1 en fonction de z_2 dans différentes Cr avec 24 spires	60

Liste des figures

Figure 3. 32. projection dans le plan des composantes principales z_1 en fonction de z_2 dans différentes Cr avec 30 spires	60
Figure 3. 33. présente le banc d'essais utilisé pour les mesures expérimentales sur la MAS.	62
Figure 3. 34. Tension Statoriques triphasé v_{as}, v_{bs}, v_{cs}	63
Figure 3. 35. Courants Statoriques triphasé i_{as}, i_{bs}, i_{cs}	63
Figure 3. 36. Projection dans le plan des composantes principales z_1 et z_2	64
Figure 3. 37. Tension Statoriques triphasé v_{as}, v_{bs}, v_{cs}	65
Figure 3. 38 Courants Statoriques triphasé i_{as}, i_{bs}, i_{cs}	66
Figure 3. 39. Projection dans le plan des composantes principales z_1 et z_2	66
Figure 3. 40. Courants Statoriques triphasé i_{as}, i_{bs}, i_{cs}	68
Figure 3. 41. Projection dans le plan des composantes principales z_1 et z_2	68
Figure 3. 42. Courants Statoriques triphasé i_{as}, i_{bs}, i_{cs}	70
Figure 3. 43. Projection dans le plan des composantes principales z_1 et z_2	70
Figure 3. 44. Courants Statoriques triphasé i_{as}, i_{bs}, i_{cs}	72
Figure 3. 45. Projection dans le plan des composantes principales z_1 et z_2	72
Figure 3. 46. Comparaison des indices SS_t, SS_v pour différents cas	74

Liste des Tableaux

C

Liste des Tableaux

Tableau 2.1 Trois courants de la machine asynchrone triphasé	25
Tableau 2.2 les données centrées	27
Tableau 3.1. Résultats de simulation de la méthode ACP (cas sain)	44
Tableau 3.2. Résultats de simulation de la méthode ACP (cas défaut dans la phase B de 50 spires) ..	51
Tableau 3.3. Résultats de simulation de la méthode ACP (cas défaut dans la phase A de 6 spires)	53
Tableau 3.4. Résultats de simulation de la méthode ACP (cas défaut dans la phase B de 24 spires) ..	56
Tableau 3.5. Résultats de simulation de la méthode ACP (cas défaut dans la phase C de 30 spires) ..	58
Tableau 3.6. Résultats expérimentaux de la méthode ACP (cas sain)	62
Tableau 3.7. Résultats expérimentaux de la méthode ACP cas de 30 spires dans la phase A.....	65
Tableau 3.8. Résultats expérimentaux de la méthode ACP cas de 30 spires dans la phase B	67
Tableau 3.9. Résultats expérimentaux de la méthode ACP cas de 30 spires dans la phase C	69
Tableau 3. 10. Résultats expérimentaux de la méthode ACP cas de 30 spires dans la phase C et 24spires dans la phase B.....	71

Introduction générale

Introduction générale

Les machines électriques sont au cœur de la plupart des processus de production dans l'industrie. L'une des plus couramment utilisées est la machine asynchrone, également appelée machine à induction. Cela est dû à ses nombreux avantages, notamment la simplicité de construction, la résistance mécanique, le rendement élevé et le faible coût, ce qui la rend idéale dans de nombreuses applications.

Cependant, malgré leur fiabilité ces machines peuvent développer des défauts, notamment au niveau du stator et du rotor. Ces défauts peuvent entraîner des perturbations majeures dans les processus de production et des arrêts imprévus. Parmi les défauts les plus complexes à détecter se trouve les courts circuits internes entre spires statoriques. Pour éviter de telles défaillances, il est crucial de développer des méthodes efficaces de diagnostic permettant de détecter ce défaut de manière précoce.

Ce mémoire a pour objectif de développer une méthode de diagnostic des défauts statoriques dans les machines asynchrones, en utilisant l'Analyse en Composantes Principales (ACP), est une méthode statistique qui permet de simplifier l'analyse des données tout en conservant l'essentiel de l'information. L'objectif est de proposer une approche fiable pour la détection et la localisation de défauts dans les machines asynchrones.

Plan du mémoire :

Chapitre 1- Aperçu général de la machine asynchrone :

Ce chapitre présente la machine asynchrone, ses composants (stator et rotor), ainsi que son principe de fonctionnement. Il aborde également les différents types de défauts qui peuvent affecter la machine, en mettant l'accent sur les défauts statoriques. Il se termine par la modélisation de la machine saine. Pour l'analyse de la MAS en présence de défaut de court-circuit entre spires statoriques (ITSC) on utilise un modèle dédié et le programme associé.

Chapitre 2 - La méthode d'Analyse en Composantes Principales (ACP):

Le deuxième chapitre introduit la méthode de l'ACP. Nous y expliquons son principe, ses avantages et son utilisation dans l'analyse des données complexes. Ce chapitre sert à poser les bases de l'utilisation de l'ACP dans le diagnostic de défaut ITSC dans la MAS.

Introduction générale

Chapitre 3 -Application de l'ACP pour le diagnostic des défauts statoriques :

Ce chapitre présente l'application de l'ACP pour le diagnostic de défaut ITSC dans la MAS. Des simulations sont réalisées pour collecter les données et les analyser. Nous évaluons l'efficacité de cette méthode pour détecter et localiser les défauts dans les différentes phases d'une MAS. Les résultats des simulations sont confrontés à des résultats expérimentaux pour valider l'approche adoptée [1].

Chapitre 1 : Modélisation D'une MAS **Saine**

Introduction

Aujourd'hui, Les machines électriques tournantes occupent une place prépondérante dans tous les domaines industriels , Les MAS sont les plus fréquemment utilisées grâce à leur robustesse, leurs qualités, leur simplicité de construction, leur masse réduite et leur coût qui est relativement moins cher à celui des autres machines, sa grande robustesse au niveau électromagnétique, et sa bonne standardisation entre les différents fabricants , Son principal avantage réside dans l'absence de contacts électriques glissants, ce qui conduit à une structure simple, robuste mécanique et facile à construire ,elles sont aujourd'hui utilisées dans de nombreuses applications, notamment dans le transport (métro, trains, propulsion des navires, automobiles électriques), dans l'industrie (machines-outils)[2]

1.1 Constitution de la MAS

La MAS se compose de deux éléments principaux : le stator, qui est la partie fixe contenant des enroulements disposés en p paires de pôles, et le rotor, qui est la partie mobile et peut être de type cage d'écureuil ou bobiné.

Son fonctionnement repose sur le principe de l'induction électromagnétique. Le champ tournant produit par le stator induit des courants dans le rotor, mais cela nécessite une différence de vitesse entre les deux. Cette différence, appelée glissement, est essentielle à la génération du couple électromagnétique et explique le caractère asynchrone de la machine, c'est-à-dire l'absence de synchronisme entre le rotor et le champ statorique.[3]



Figure1. 1 Rotor à cage d'écureuil et les enroulements statoriques.[4].

1.1.1 Le stator

Le stator est la partie statique et extérieure de la MAS. Il se compose d'une carcasse sur laquelle est fixée une couronne de tôles d'acier ferromagnétique, dont l'épaisseur varie généralement entre 0,35 et 0,50 mm. Ces tôles sont de qualité spéciale et sont munies d'encoques afin de réduire les pertes par courants de Foucault et les échauffements excessifs.

Le stator contient un certain nombre d'encoques qui accueillent les bobines constituant les enroulements statoriques triphasés, destinés à produire le champ tournant. Ces enroulements peuvent être connectés en étoile ou en triangle au niveau de la plaque à bornes fixée à l'extérieur du stator.

Ces trois bobines génèrent un champ magnétique tournant à la pulsation de synchronisme, qui se répartit de manière sinusoïdale dans l'entrefer (l'espace entre le rotor et le stator de la machine).[5]

Ω_s est donnée par la relation :

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p} \quad (1.1)$$

Avec : Ω_s : La vitesse angulaire champ magnétique en [rad/s]

$$\omega = 2\pi f \text{ en [rad/s]}$$

p : Le nombre de paires de ples

La vitesse de rotation synchronisme du champ magnétique tournant noté n_s , est donnée Par la relation :

$$n_s = \frac{f}{p} = \frac{\Omega_s}{2\pi} \quad (1.2)$$

Avec : n_s : La vitesse synchronisme en $\left[\frac{tr}{s}\right]$

f : La fréquence [Hz]

p: Le nombre de paires de poles

1.1.2 Le rotor

Selon la configuration du bobinage du rotor, on distingue deux grandes catégories de machines asynchrones : la machine asynchrone à rotor bobiné (anneau) et la machine à cage d'écureuil.[5]

a. Rotor à cage d'écureuil

Le rotor à cage d'écureuil est un noyau cylindrique en tôle d'acier monté sur un arbre. Il contient à l'intérieur des barres conductrices longitudinales (généralement en aluminium ou en cuivre) placées dans des rainures et reliées aux deux extrémités par des anneaux de court-circuit formant une forme de cage d'écureuil.[6]

b. Rotor bobiné

La conception d'un rotor bobiné est plus complexe que celle d'un rotor à cage d'écureuil. En plus d'un noyau en fer laminé, il y a des enroulements triphasés connectés à des bagues collectrices montées sur l'arbre du rotor. Les balais sont en contact avec ces bagues collectrices, fournissant une connexion externe pour fournir de l'électricité au rotor bobiné.[6]

1.1.3 Les paliers

Les paliers soutiennent et permettent la rotation libre du rotor. L'un d'eux est fixé pour empêcher les déplacements axiaux, tandis que l'autre reste libre afin de compenser les dilatations thermiques de l'arbre.[7]

1.1.4 Arbre

L'arbre de la machine électrique est un élément central pour la transmission du mouvement de rotation. Il sert de support mécanique au rotor, au circuit magnétique tournant et aux enroulements associés. Sa conception garantit la liaison entre les différentes parties mobiles de la machine.

L'arbre est maintenu en position par un ou plusieurs paliers, selon la configuration mécanique de l'ensemble. Dans certaines applications, il peut également accueillir d'autres composants tels que

des collecteurs, des ventilateurs, une bague de glissement ou divers accessoires fonctionnels, contribuant ainsi à l'intégration complète de l'ensemble rotorique.[3]

1.1.5 La carcasse

La carcasse sert de support, transmet les efforts à l'assise de la MAS, joue le rôle d'enveloppe, assure la protection contre les agents extérieurs et guide l'air de ventilation ; elle agit aussi parfois comme échangeur thermique ; c'est le cas des carcasses coulées des moteurs à ailettes ou des moteurs fermés à tubes[2]. Le figure1.2 donne les autres éléments de la MAS.

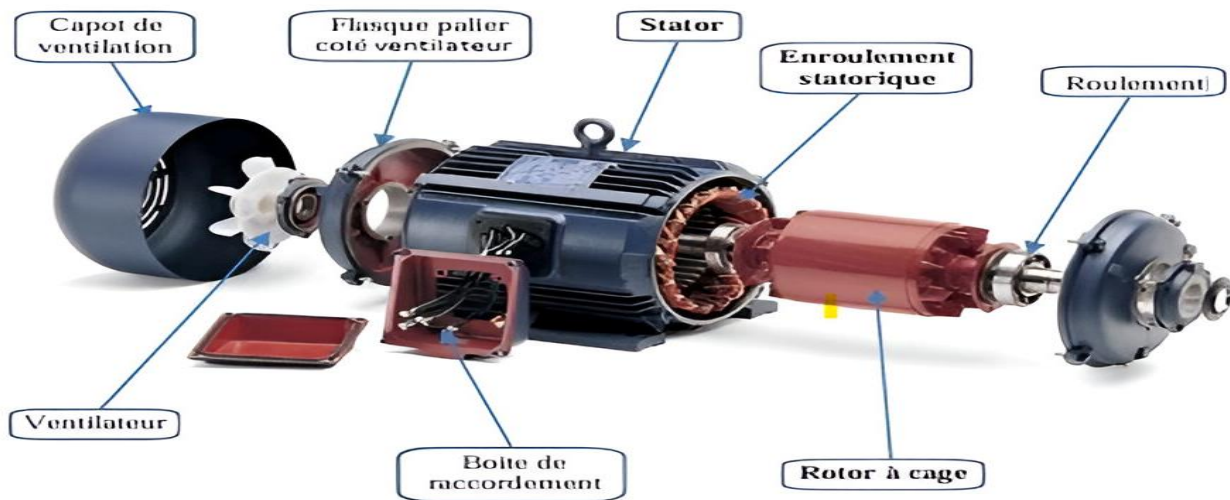


Figure 1. 2 Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.[5]

1.2 Le principe de fonctionnement de la MAS

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

En fonctionnement normal, le rotor de la MAS tourne à la vitesse Ω exprimée en radians par seconde, et la force magnétomotrice produite par les courants statoriques tourne à la vitesse de

synchronisme exprimée en radians par seconde, mais la vitesse Ω est généralement inférieure à Ω_s où :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{P} = \frac{2\pi f_s}{P} \quad (1.3)$$

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

P : Nombre de paire de pôle de la force magnétomotrice résultante.

f : Fréquence de la vitesse statorique.[6]

1.3 Défauts électriques possible sur les machines asynchrones

1.3.1 Défauts statoriques

- Court-circuit entre spires (dû à l'isolation dégradée).
- Court-circuit phase-phase ou phase- neutre.
- Défaut d'isolation (fuite de courant vers la masse).
- Ouverture d'une phase (câble coupé, connexion desserrée). [8]

1.3.2 Défauts rotoriques

- Barres de rotor cassées (provoque des oscillations de couple).
- Anneau(s) de court-circuit endommagé(s).
- Défaut d'excentricité :[8]

a. Excentricité Statique

Le rotor est décalé de façon permanente par rapport au stator.[8]

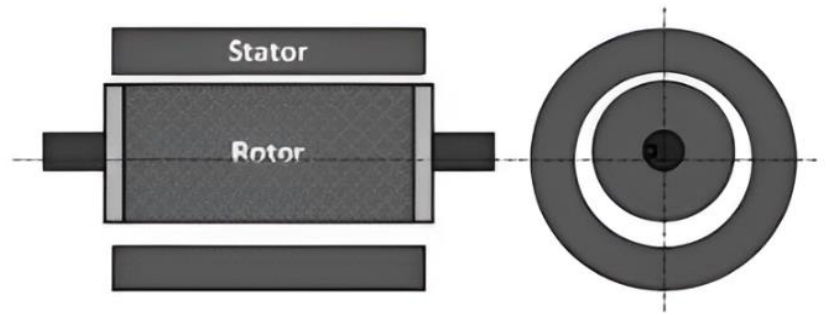


Figure 1. 3 Excentricité Statique.

b. Excentricité Dynamique

Le rotor tourne de manière irrégulière, comme un pneu voilé qui vibre en roulant. [8]

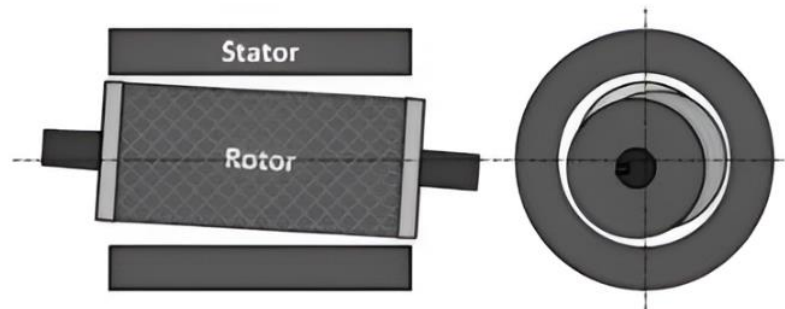


Figure 1. 4 Excentricité Dynamique.

c. Excentricité Mixte

Un mélange des deux. Le rotor est à la fois mal centré et se déplace en tournant.[8]

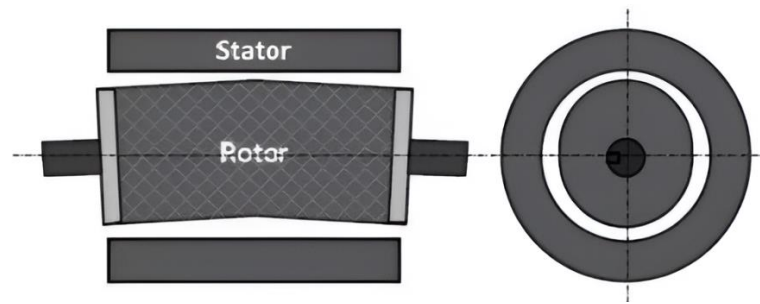


Figure 1. 5 Excentricité Mixte.

1.3.3 Défaits mécaniques

- Usure des roulements (bruit anormal, vibrations).
- Grippage du roulement.[8]

1.3.4 Défaits magnétiques

- Déséquilibre magnétique (provoqué par un entrefer irrégulier).
- Courants de Foucault excessifs (échauffement localisé).
- Saturation magnétique (si la tension est trop élevée).

1.3.5 Autres défauts courants

- Échauffement anormal
- Surcharge prolongée.
- Problème de refroidissement (ventilateur défectueux).

1.4 Hypothèse simplificatrice

La modélisation de la MAS repose sur un ensemble d'hypothèses simplificatrices, facilitant ainsi l'analyse et la formulation mathématique de son comportement. Ces hypothèses sont les suivantes :[9]

- Les circuits magnétiques sont considérés comme parfaitement symétriques.

- La distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer est supposée purement sinusoïdale.
- La longueur de l'entrefer est constante.
- Les phénomènes de saturation magnétique sont négligés, ce qui permet d'établir une relation linéaire entre le flux magnétique et les courants.
- L'influence de l'effet de peau et celle de l'échauffement sur les caractéristiques de la machine ne sont pas prises en compte.

Ces hypothèses entraînent plusieurs conséquences notables sur la modélisation, notamment :

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

1.5 Modélisation de la MAS

1.5.1 Les équations électriques

- Au stator:

$$[V_{abcs}] = [R_{abcs}][i_{abcs}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{abcs}] \quad (1.4)$$

- Au rotor:

$$[V_{abcr}] = [R_{abcr}][i_{abcr}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{abcr}] \quad (1.5)$$

- Résistance de stator

$$[R_{abcs}] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

- Resistance de rotor

$$[R_{abcr}] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

Avec :

$$[v_{abcs}] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}, [i_{abcs}] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}, [\Phi_{abcs}] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

$$[v_{abcr}] = \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix}, [i_{abcr}] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}, [\Phi_{abcr}] = \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

1.5.2 Les équations magnétiques

- Au stator:

$$[\Phi_{abcs}] = [L_s][i_{abcs}] + [L_{sr}][i_{abcr}] \quad (1.10)$$

- Au rotor:

$$[\Phi_{abcr}] = [L_r][i_{abcr}] + [L_{sr}][i_{abcs}] \quad (1.11)$$

- Inductance de stator :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{L_{ms}}{2} & -\frac{L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}}{2} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}}{2} & -\frac{L_{ms}}{2} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

- Inductance de rotor:

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{mr} & -\frac{L_{mr}}{2} & -\frac{L_{mr}}{2} \\ -\frac{L_{mr}}{2} & L_{lr} + L_{mr} & -\frac{L_{mr}}{2} \\ -\frac{L_{mr}}{2} & -\frac{L_{mr}}{2} & L_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

- Inductance de mutuelle :

$$[L_{sr}] = [L_{rs}]^T = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & -\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

Avec:

$[L_s]$: Matrice des inductances propres et mutuelles entre phases statoriques.

$[L_r]$: Matrice des inductances propres et mutuelles entre phases rotoriques.

$[L_{sr}]$: Matrice des inductances mutuelles entre phases statoriques.

$[L_{rs}]$: Matrice des inductances mutuelles entre phases rotoriques.

L_{sr} : Maximum de l'inductance mutuelles entre phase du stator et une phase de rotor. [12]

1.6 Application de la transformation de Park à la MAS

La transformation de Park consiste à remplacer les enroulements physiques d'une machine électrique par des enroulements fictifs disposés selon deux axes orthogonaux, notés d (direct) et q (quadrature). Cette méthode permet d'analyser les grandeurs électriques dans un repère tournant, facilitant ainsi leur modélisation.[10]

Dans ce contexte, deux repères tournants ($d - q$) sont définis :

- L'un est associé au stator, caractérisé par l'angle θ_s ,
- L'autre est associé au rotor, caractérisé par l'angle θ_r .

La figure 1.6 illustre les différents systèmes de référence dans l'espace. En alignant les axes fictifs des deux repères, les angles θ_s et θ_r représentent respectivement la position de l'axe direct d par rapport aux axes statorique et rotorique.

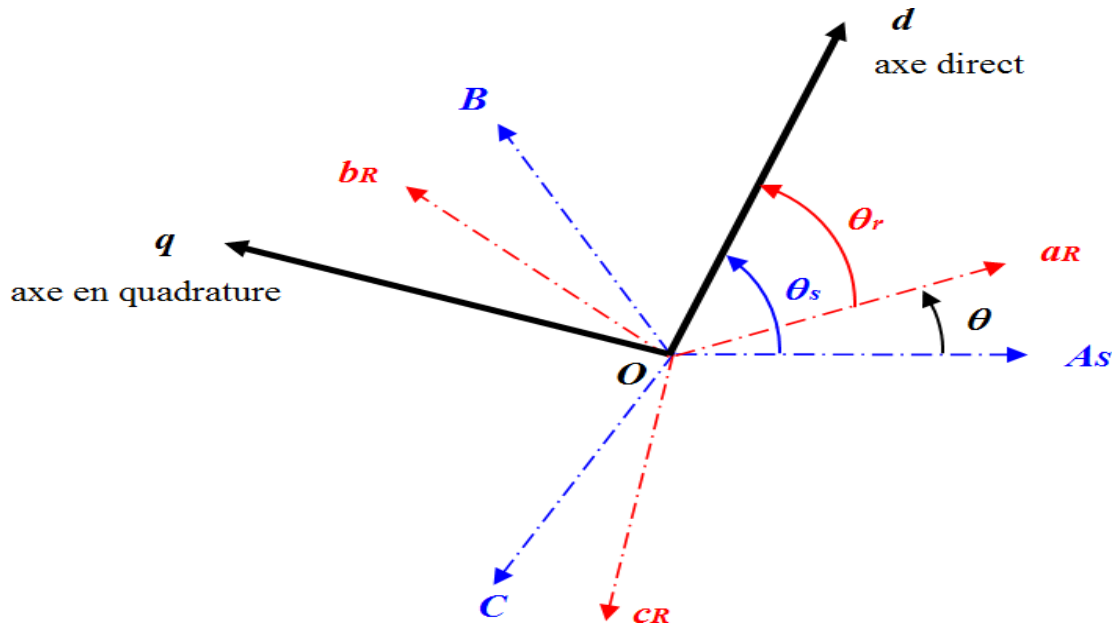


Figure 1. 6 Position des axes d-q par rapport aux axes de la MAS.[10]

Les angles θ_s et θ_r sont liés par la relation

suivante : $\theta_s = \theta_r + \theta$

La relation entre une grandeur X_{dqo} et une grandeur X_{abc} est donnée par l'équation 1.12.

(1.15)

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} = [p_r] \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}$$

La matrice de transformation de Park $[p_r]$ est définie comme suit :

$$p_r = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & \cos\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta - \theta_r) & -\sin\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

C'est -à-dire :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & \cos\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta - \theta_r) & -\sin\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (1.17)$$

La transformation de Park inverse est définie par :

$$[p_r]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & \cos(\theta - \theta_r) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos\left(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

Donc la transformé inverse elle est définie par :

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = [p_r]^{-1} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} \quad (1.19)$$

C'est-à-dire :

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & \cos(\theta - \theta_r) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos\left(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} \quad (1.20)$$

Si $\theta = 0$:

$$p_s = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

La matrice de Park et son inverse (équations 1.13 et 1.15) permet de conserver l'invariance de la puissance instantanée.[10]

1.6.1 Choix du repère d-q

Il existe trois choix importants, le repère $d - q$ peut être fixé au stator, au rotor ou au champ tournant, selon l'objectif de l'application :[9]

- Repère d'axes $d - q$ fixe lié au stator ou repère stationnaire($\theta_s = 0$).
- Repère d'axes $d - q$ fixé au rotor($\theta_s = -\theta$).
- Repère d'axes $d - q$ lié au champ tournant($\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$).

1.6.2 Les équations électriques dans un référentiel lié au stator

$$\begin{aligned} \omega_s &= \frac{d\theta_s}{dt} = 0 & , & \quad \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} = -\omega\theta_r = -\theta \\ \omega &= \frac{d\theta_s}{dt} = p\Omega & , & \quad \theta_s = 0 \end{aligned}$$

Avec :

ω_s :la vitesse angulaire des axes $d - q$ dans le repère lie au stator.

ω_r :la vitesse angulaire des axes $d - q$ dans le repère lie au rotor.

ω :la vitesse angulaire électrique de rotor.

p : nombre de pair de pole.

Ω : la vitesse mécanique.

Les équations électriques sont définies comme suit :

$$v_{dqos} = R_{dqos} i_{dqos} + \frac{d\Phi_{dqos}}{dt} \quad (1.22)$$

$$0 = R_{dqor} i_{dqor} + \frac{d\Phi_{dqor}}{dt} - \omega_r \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \Phi_{dqor} \quad (1.23)$$

1.6.3 Les équations magnétiques dans un référentiel lié au stator

Les équations des flux sont définies par : [11]

$$\Phi_{dqos} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} i_{dqos} + \begin{bmatrix} L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} i_{dqor} \quad (1.24)$$

$$\Phi_{dqor} = \begin{bmatrix} L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} i_{dqos} + \begin{bmatrix} L_r & 0 & 0 \\ 0 & L_r & 0 \\ 0 & 0 & L_r \end{bmatrix} i_{dqor} \quad (1.25)$$

$$L_s = L_{ls} + \frac{3}{2} L_{ms} \quad (1.26)$$

$$L_r = L_{lr} + \frac{3}{2} L_{mr} \quad (1.27)$$

$$L_m = \frac{3}{2} L_{sr} \quad (1.28)$$

1.7 Couple électromagnétique

Le couple électromagnétique est donné par : [12]

$$c_e = \frac{3PL_m}{2L_r} [\Phi_{dr} i_{qs} - \Phi_{qr} i_{ds}] \quad (1.29)$$

1.8 L'équation mécanique

La dynamique de la partie mobile de la machine est exprimée par l'équation du mouvement suivante : [11]

$$\Omega_r = \frac{d\theta}{dt} \quad (1.30)$$

$$J \cdot \frac{d\Omega_r}{dt} + f_v \cdot \Omega_r = c_e - c_r \quad (1.31)$$

1.9 Modèle d'état de la MAS saine dans un référentiel lié au stator

Finalement, le modèle d'état de la MAS triphasée saine est résumé ci – dessous:

$$\frac{di_{ds}}{dt} = -\frac{1}{L_s\sigma} \left(R_s + \frac{L_m^2 R_r}{L_r^2} \right) i_{ds} + \frac{1}{L_s\sigma} \left(\frac{L_m R_r}{L_r^2} \right) \Phi_{dr} + \frac{1}{L_s\sigma} \left(\frac{L_m \omega_r}{L_r} \right) \Phi_{qr} + \frac{1}{L_s\sigma} v_{ds} \quad (1.32)$$

$$\frac{di_{qs}}{dt} = -\frac{1}{L_s\sigma} \left(R_s + \frac{L_m^2 R_r}{L_r^2} \right) i_{qs} + \frac{1}{L_s\sigma} \left(\frac{L_m R_r}{L_r^2} \right) \Phi_{qr} - \frac{1}{L_s\sigma} \left(\frac{L_m \omega_r}{L_r} \right) \Phi_{dr} + \frac{1}{L_s\sigma} v_{qs} \quad (1.33)$$

$$\frac{d\Phi_{dr}}{dt} = \left(\frac{L_m R_r}{L_r} \right) i_{ds} - \left(\frac{R_r}{L_r} \right) \Phi_{dr} + (\omega_r) \Phi_{qr} \quad (1.34)$$

$$\frac{d\Phi_{qr}}{dt} = \left(\frac{L_m R_r}{L_r} \right) i_{qs} - \left(\frac{R_r}{L_r} \right) \Phi_{qr} - (\omega_r) \Phi_{dr} \quad (1.35)$$

$$J \cdot \frac{d\Omega_r}{dt} + f_v \cdot \Omega_r = c_e - c_r \quad (1.36)$$

On peut écrire le système d'équations sous forme matricielle comme suit :

$$\frac{d[X]}{dt} = [A][X] + [B][V] \quad (1.37)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_s\sigma} \left(R_s + \frac{L_m^2 R_r}{L_r^2} \right) & 0 & \frac{1}{L_s\sigma} \left(\frac{L_m R_r}{L_r^2} \right) & \frac{1}{L_s\sigma} \left(\frac{L_m \omega_r}{L_r} \right) \\ 0 & -\frac{1}{L_s\sigma} \left(R_s + \frac{L_m^2 R_r}{L_r^2} \right) & -\frac{1}{L_s\sigma} \left(\frac{L_m \omega_r}{L_r} \right) & \frac{1}{L_s\sigma} \left(\frac{L_m R_r}{L_r^2} \right) \\ \left(\frac{L_m R_r}{L_r} \right) & 0 & -\left(\frac{R_r}{L_r} \right) & (\omega_r) \\ 0 & \left(\frac{L_m R_r}{L_r} \right) & -(\omega_r) & -\left(\frac{R_r}{L_r} \right) \end{bmatrix} \quad (1.38)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s\sigma} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s\sigma} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad [v] = \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad [x] = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} \quad (1.39)$$

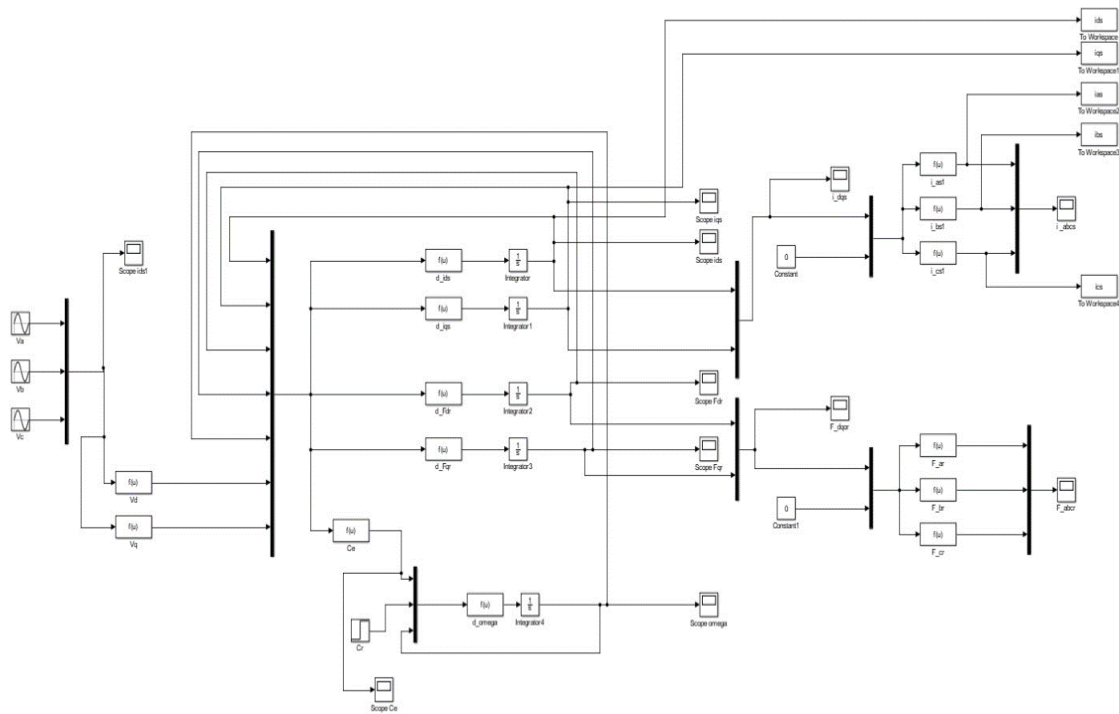


Figure 1. 7 Schéma de simulation sous Simulink.

1.10 Résultats de simulation

La simulation de la machine dont les paramètres sont donnés en annexe est effectuée comme suit :

Démarrage à vide pour $t = [0, 0.4]$ s.

Application d'un couple de charge de 3.8 N.m pour $t = [0.4, 0.8]$ s. Il faut noter que cette MAS est alimentée par le réseau triphasé.

Les figures 1.8, 1.9, 1.10, 1.11 et 1.12 montrent les résultats de simulation de la MAS saine.

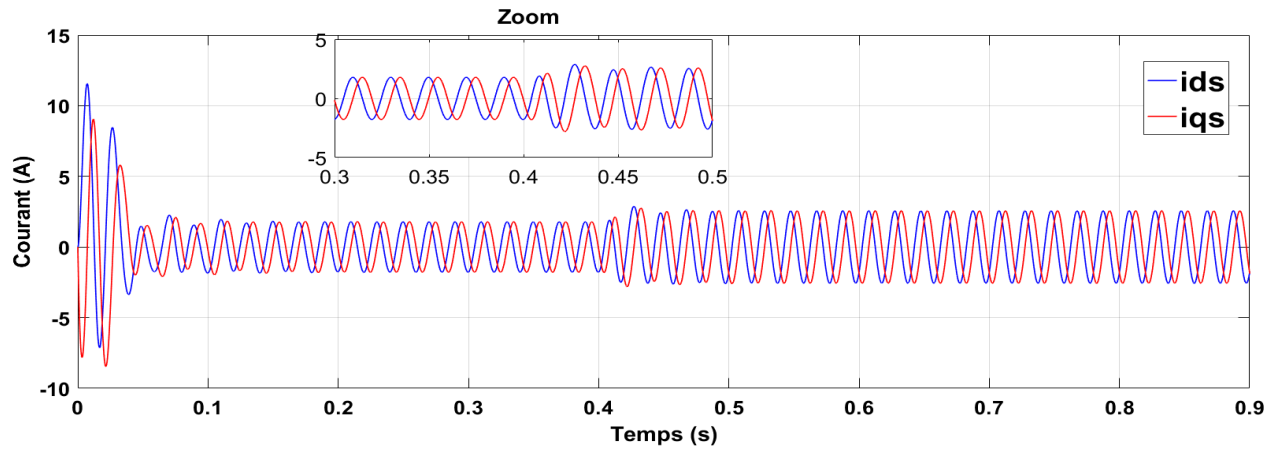


Figure1. 8 Courants statoriques de Park i_{ds}, i_{qs} .

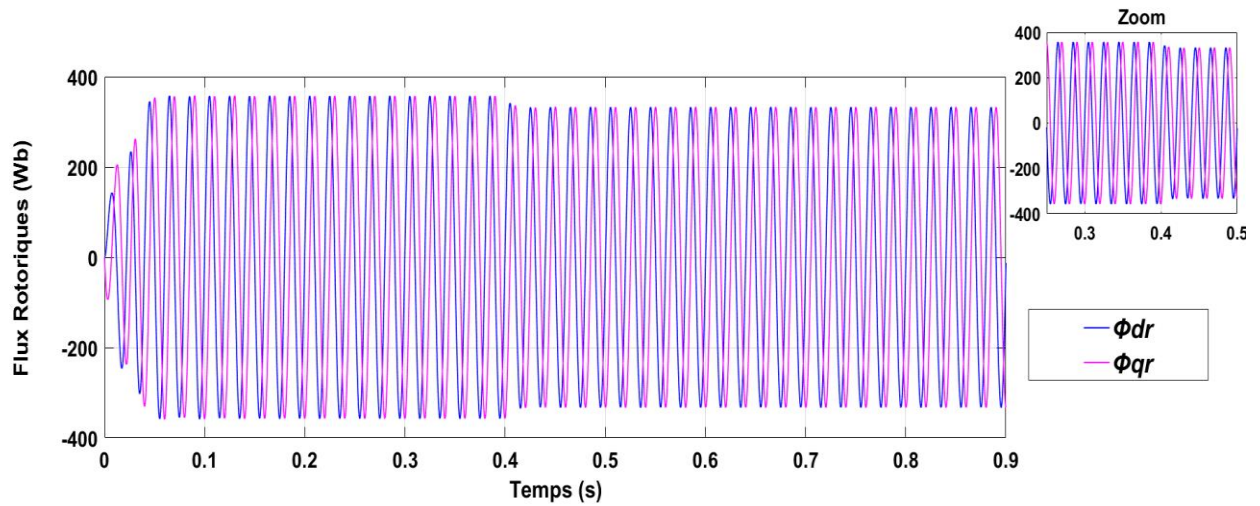


Figure1. 9 Flux rotoriques ϕ_{dr}, ϕ_{qr} .

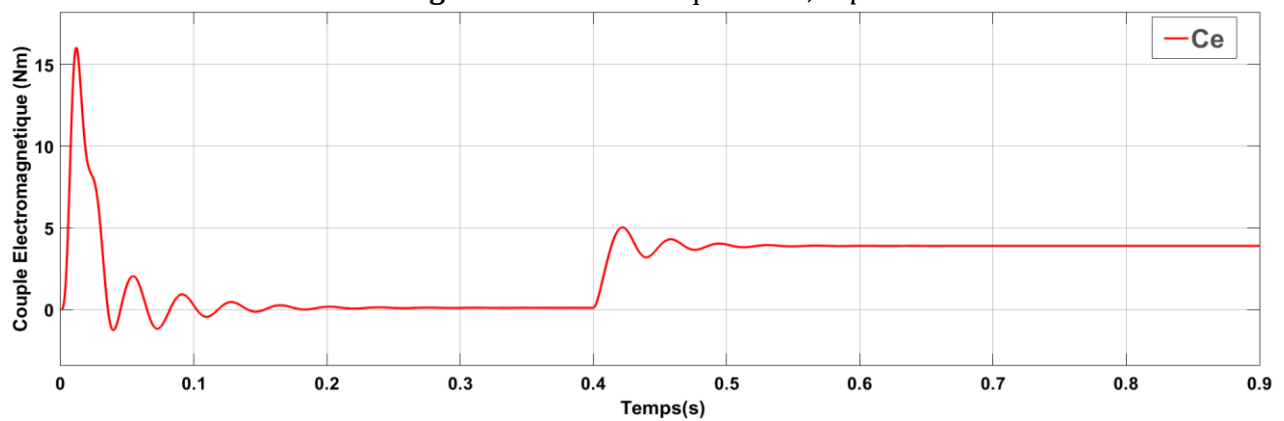


Figure1. 10 Couple électromagnétique C_e .

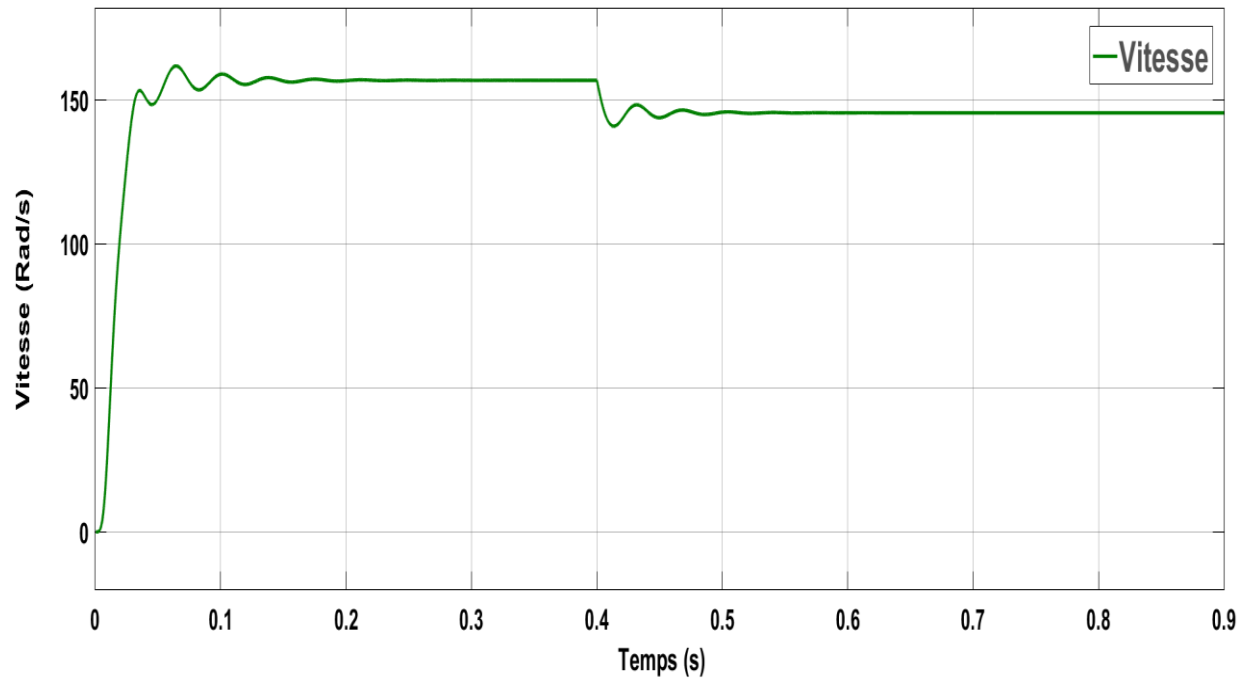
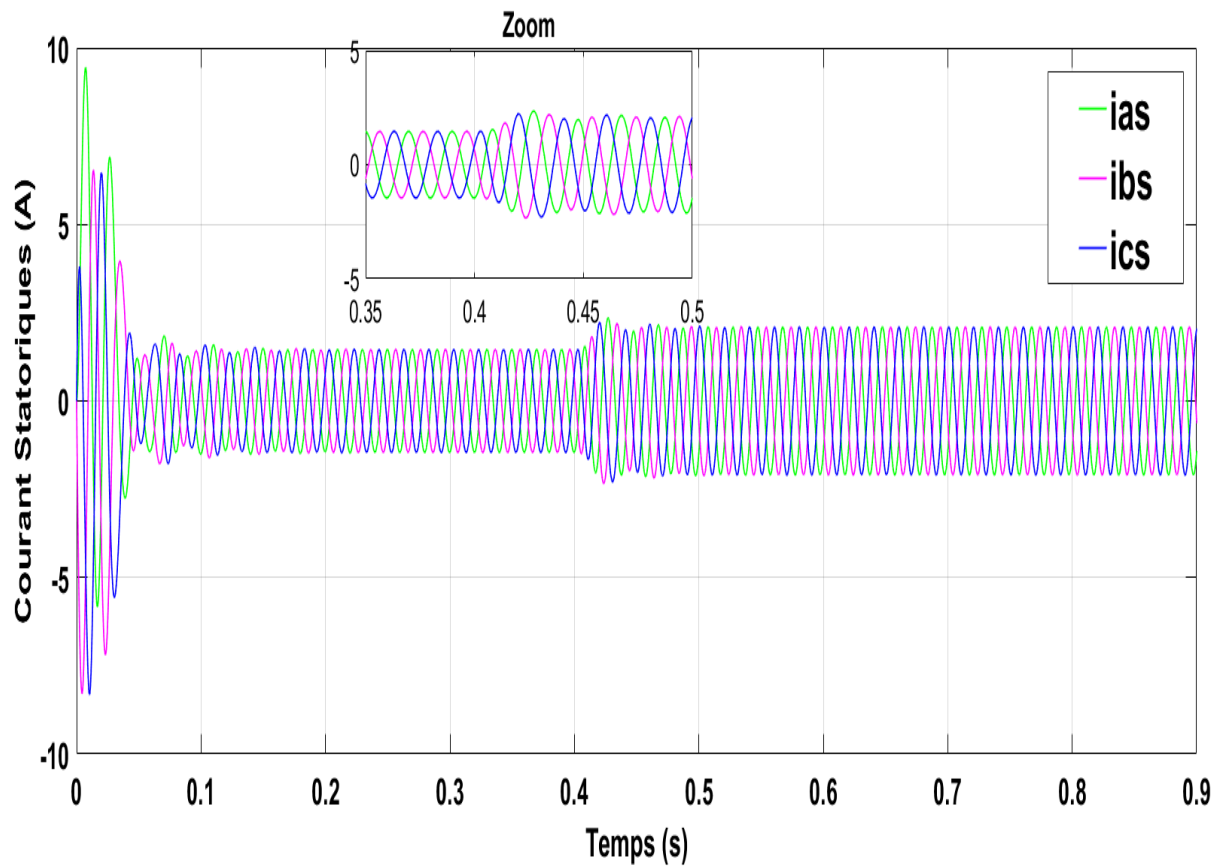


Figure 1. 11 Vitesse mécanique.

Figure1. 12 Les courants statoriques triphasés i_{as} , i_{bs} , i_{cs} .

L'appel du courant est de $9.5A$, le courant en régime permanent à vide est égal à $1.45A$, ce qui représente 64% du courant nominal. Le courant en régime permanent en charge est de $1.85A$. Il est à noter que le couple résistant est de $3Nm$, auquel il faut ajouter le couple de frottement visqueux, donc ces résultats sont conformes à la théorie.

1.11 Interprétation des résultats

Les courants et les flux sont en quadrature, où leurs valeurs à vide sont successivement égales à $1.78A$ et $1.14 Wb$. Nous observons un couple de démarrage important dans l'intervalle $t = [0: 0.1]$ puis, il se stabilise. Lors de l'application du couple résistant $C_r = 3Nm$ à l'instant $t = 0.4s$, la MAS répond en augmentant les courants statoriques ce qui entraîne une faible réduction des flux rotoriques ; ceci permet de vaincre le couple de charge.

La vitesse démarre à partir de $0 rad/s$, puis se stabilise en régime permanent à $156 rad/s$, en appliquant le couple de charge C_r , elle diminue vers $148 rad/s$.

1.12 Conclusion

Nous avons réalisé dans ce premier chapitre la modélisation et la simulation de la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil dans le cas sain, basée sur la transformation de Park.

Cette modélisation nous sera utile pour le développement du modèle de court-circuit statoriques, qui fera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre 2: Analyse composantes principales (ACP)

2.1. Introduction

L'analyse en composantes principales (ACP), est une méthode de statistique multivariée performante. Elle permet de traiter des données complexes s'appuyant sur un grand nombre de variables. Son but est d'obtenir les dimensions les plus porteuses d'information à l'intérieur d'un projet tout en éliminant les variables ayant moins d'information. Ce qui permet d'éclaircir l'information sans perdre en qualité. En tant que technique de réduction de dimension, l'ACP permet la visualisation, le traitement et l'interprétation des données, tout en étant particulièrement adaptée à l'extraction de caractéristiques dans des domaines comme la reconnaissance d'images, l'apprentissage automatique ou le pré-traitement d'ensembles de données. Son autre intérêt consiste à réduire le bruit, afin d'optimiser les performances de certains algorithmes, car seuls les éléments essentiels sont conservés. [14]

2.2. Le principe de la méthode ACP

L'ACP est une méthode souvent utilisée pour réduire la dimensionnalité de grands ensembles de données. Elle consiste à transformer un grand ensemble de variables en un ensemble plus petit, contenant néanmoins la majeure partie de l'information. Réduire le nombre de variables d'un ensemble de données se fait naturellement au détriment de la précision, mais la technique de la réduction de dimensionnalité consiste à accepter une perte de précision pour obtenir la simplicité. En effet, les petits ensembles de données sont plus faciles à explorer et à visualiser, ce qui simplifie et accélère grandement l'analyse des points de données par les algorithmes d'apprentissage automatique, sans variables externes à traiter.

En résumé, le principe de l'ACP est simple : réduire le nombre de variables d'un ensemble de données tout en préservant un maximum d'informations. [15].

2.3. Les axes principaux

2.3.1. La première composante principale (PC1)

C'est la direction dans l'espace dans laquelle les points de données présentent la plus grande variance. La ligne qui représente le mieux la forme des points projetés est considérée. Plus cette composante représente de variance, plus d'informations sont conservées à partir de l'ensemble de données d'origine. Aucune autre composante principale ne peut avoir une variance plus élevée [16].

2.3.2. La deuxième composante principale (PC2)

La deuxième composante principale (PC2) est déterminée de la même manière que la première composante principale (PC1). PC2 représente la variance la plus élevée suivante dans l'ensemble de données et ne doit pas être corrélée avec PC1. Cela signifie que la composante PC2 doit être perpendiculaire à la composante PC1. Cette relation peut également être exprimée comme la corrélation entre la première composante principale et la deuxième composante principale étant nulle [16].

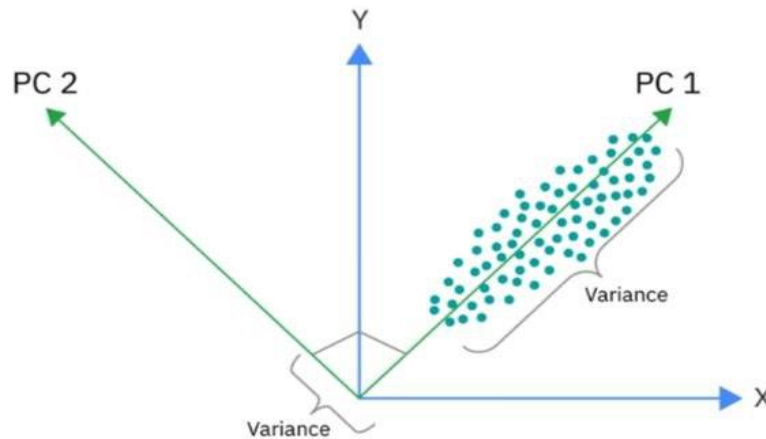


Figure 2. 1 Les axes (PC 1/PC 2) avec nuage des individus dans l'espace affine.

2.4. Les étapes de la méthode des composantes principales (ACP)

Il est nécessaire que toutes les variables soient sur la même échelle. Sinon, celles avec de grandes valeurs (ou des unités différentes) risquent d'avoir trop d'influence sur le résultat. La normalisation permet donc d'équilibrer leurs poids dans l'analyse [16].

2.4.1. Étape 1 : Collecte des données

La collecte de données est la première étape cruciale pour analyser le fonctionnement du système à diagnostiquer. Les données collectées peuvent être des mesures de courant telles que le courant du stator, la tension, les vibrations ou d'autres signaux électriques et mécaniques. Ces mesures sont généralement effectuées à l'aide de capteurs appropriés et de systèmes d'acquisition de données, puis stockées pour analyse.

Il est très important que les données caractérisent toutes les conditions opérationnelles possibles du système considéré, y compris ses états de fonctionnement sans défauts ainsi que tous les états de défaut possibles. Cela permet à l'ACP d'extraire efficacement les caractéristiques pertinentes associées aux défauts[17] .

Pour illustrer la méthode ACP, un exemple est utilisé pour clarifier chaque étape. Les données sont regroupées dans le tableau 2.1.

Temps	$Ia(A)$	$Ib(A)$	$Ic(A)$
$t1$	10	9.8	10.2
$t2$	10.1	9.9	10.3
$t3$	10.2	10	10.4
$t4$	11.5	8.5	10.1
$t5$	10	9.8	10.2
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$

Tableau 2.1 Trois courants de la machine asynchrone triphasé

2.4.2. Étape 2 : Création de la matrice de données

L'élaboration du modèle ACP commence avec la construction d'une matrice où se trouve réuni le jeu de données d'entrées/sorties, c'est-à-dire le jeu de données relevées sur le système en fonctionnement. Cette matrice de dimension $(n \times m)$, est constituée de m variables du processus, n étant le nombre de mesures et les observations pour chaque variable. La matrice de données X est alors construite selon les modalités présentées dans[18].

On forme la matrice X ($n \times m$) :

- A chaque ligne correspond un instant de mesure ($n = \text{nombre d'observations}$).
- Chaque colonne est une variable ($m = \text{nombre de variables mesurées}$).

$$X = \begin{pmatrix} x_1(1) & \cdots & x_m(1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1(n) & \cdots & x_m(n) \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Suite de l'exemple :

A partir du tableau 2.1, la matrice X est formée comme suit :

$$X = \begin{bmatrix} 10 & 9.8 & 10.2 \\ 10.1 & 9.9 & 10.3 \\ 10.2 & 10 & 10.4 \\ 10.5 & 8.5 & 10.1 \\ 10 & 9.8 & 10.2 \end{bmatrix}$$

2.4.3. Étape 3 : Centrage des données

Le centrage des données est une étape essentielle avant l'application de l'ACP. Elle consiste à soustraire la moyenne de chaque variable à toutes les observations correspondantes, afin que chaque variable ait une moyenne nulle.

L'objectif de cette étape est de supprimer le biais dû aux moyennes différentes des variables, pour que l'analyse se concentre uniquement sur les variations relatives entre les données. Sans cette étape, l'ACP pourrait donner trop d'importance aux variables ayant de grandes valeurs moyennes, ce qui fausserait l'interprétation.

Le centrage est indispensable pour que la matrice de covariance (calculée à l'étape suivante) représente fidèlement les corrélations et dispersions entre les variables [19]. Cette opération est représentée par la formule donnée par l'équation (2.2).

$$x_{i-centre}(j) = x_i(j) - x_{i-moy}, j = 1..n, i = 1..m \quad (2.2)$$

x_{i-moy} : La valeur moyenne de la variable x_i

Dans l'exemple du tableau 2.1, on calcule les valeurs moyennes.

$$x_{i-moy} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (2.3)$$

$$I_{a-moy} = 10.36$$

$$I_{b-moy} = 9.6$$

$$I_{c-moy} = 10.24$$

Le centrage des données donne le tableau 2.2

Temps	$Ia(A)_{\text{centre}}$	$Ib(A)_{\text{centre}}$	$Ic(A)_{\text{centre}}$
$t1$	-0.36	0.2	-0.04
$t2$	-0.26	0.3	0.06
$t3$	-0.16	0.4	0.16
$t4$	1.14	-1.1	0.14
$t5$	-0.36	0.2	-0.04

Tableau 2.2 les données centrées

2.4.4. Étape 4 : Calcul de la matrice de covariance

Une fois les données centrées, l'étape suivante consiste à calculer la matrice de covariance, qui joue un rôle fondamental. Cette matrice permet de mesurer les relations linéaires entre les différentes variables du jeu de données.

La matrice de covariance est une matrice symétrique $m \times m$, où m est le nombre de variables. Chaque élément $Cov(x_{i-centre}^T \cdot x_{i-centre})$ de la matrice représente la covariance entre les variables $x_{i-centre}$ et $x_{i-centre}^T$.

La covariance est calculée à l'aide de 2.5.

$$Cov(x_{i-centre}^T \cdot x_{i-centre}) = \left(\frac{1}{n-1}\right) * \sum (x_{i-centre}^T \cdot x_{i-centre}) \quad (2.4)$$

$x_{i-centre}$ = les données centrées

On calcule la matrice de covariance C :

La matrice de covariance permet de déterminer les directions principales de variation des données (axes principaux), le degré de liaison entre les variables (corrélations), ainsi que les composantes principales obtenues par le calcul des valeurs propres et des vecteurs propres associés.

La matrice de covariance possède les propriétés suivantes :

- Elle est toujours symétrique.
- Ses valeurs propres sont réelles et associées à des vecteurs propres orthogonaux.
- Elle est positive semi-définie, c'est-à-dire que toutes ses valeurs propres sont positives ou nulles.

Suite de l'exemple :

La matrice de covariance est donnée ci-dessous :

$$C = \begin{pmatrix} 0.413 & -0.385 & -0.043 \\ -0.385 & 0.388 & 0.055 \\ -0.043 & 0.055 & 0.013 \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

2.4.5. Étape 5 : Calcul des valeurs propres et des vecteurs propres

L'analyse des valeurs propres et des vecteurs propres est utilisée pour extraire des informations pertinentes à partir des données mesurées. Ces outils mathématiques permettent d'identifier les directions principales de variation du signal (vecteurs propres) ainsi que l'importance de ces variations (valeurs propres). On construit un espace à m dimensions dans lequel la distribution des données est analysée. Les vecteurs propres indiquent les axes le long desquels les données varient le plus, tandis que les valeurs propres quantifient cette variation. En cas de défaut la structure du signal change, ce qui se reflète dans les vecteurs et valeurs propres calculés[21].

La suite de l'exemple :

Une matrice de covariance est toujours symétrique , donc :

$$C^T = C \quad (2.6)$$

Résoudre l'équation caractéristique

$$\det (C - \lambda I) = 0 \quad (2.7)$$

Cela donne une équation de degré 3, que l'on résout pour obtenir les valeurs propres λ_i .

Résultat numérique :

$$\lambda_1 = 0.7918$$

$$\lambda_2 = 0.0215$$

$$\lambda_3 = 0.0006$$

On peut calculer le pourcentage de variance expliquée par chaque composante :

$$\text{Total variance} = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 0.814$$

$$\text{PC1} = \frac{0.7918}{0.814} * 100 \approx 97.3 \%$$

$$\text{PC2} = \frac{0.0215}{0.814} * 100 \approx 2.6 \%$$

$$\text{PC3} = \frac{0.0006}{0.814} * 100 \approx 0.07 \%$$

La première composante principale explique plus de 97% de la variance, donc, elle est dominante.

La deuxième composante explique un petit complément ($\sim 2.6\%$).

La troisième composante est négligeable.

Calcul des vecteurs propres :

Pour chaque valeur propre λ_i on résout :

$$(C - \lambda_i I) \vec{z}_i = 0 \quad (2.8)$$

Ce système d'équation homogène donne un vecteur propre $\vec{z}_i$ solution de l'équation (2.8).

Normaliser les vecteurs propres

On normalise chaque vecteur propre pour que :

$$\|\vec{z}_i\| = 1$$

$$\vec{z} = (x, y, z)^T \quad (2.9)$$

Cela facilite l'interprétation géométrique (les vecteurs ont alors une longueur unitaire).

Alors les vecteurs propres :

$$\vec{z}_1 = \begin{bmatrix} -0.7149 \\ 0.6936 \\ 0.0885 \end{bmatrix}$$

$$\vec{z}_2 = \begin{bmatrix} 0.6180 \\ 0.5676 \\ 0.544 \end{bmatrix}$$

$$\vec{z}_3 = \begin{bmatrix} -0.3271 \\ -0.4436 \\ 0.8344 \end{bmatrix}$$

Les vecteurs propres donnent les axes principaux.

2.4.6. Étape 6 : Projection des données sur PC1

Après avoir obtenu les vecteurs propres (ou composantes principales) et leurs valeurs propres associées, l'étape suivante consiste à projeter les données initiales sur ces nouveaux axes. Cette projection permet de transformer les données pour qu'elles soient exprimées en fonction des directions principales de variation. [19]

On multiplie les données centrées par le vecteur propre correspondant à PC1, mathématiquement :

$$q_i = x_{centré} * z_i \quad (2.10)$$

$x_{centré}$: la matrice des données après centrage.

z_i : Le vecteur propre de la composante principale (PC_i).

q_i : Le nouveau jeu de données projeté sur PC1.

Cela donne une nouvelle série de données à une seule dimension, qui représente la variation la plus significative dans le système. Ces données peuvent ensuite être analysées ou comparées entre états normaux et défectueux[19].

Pourquoi cette projection est utile dans le diagnostic ?

- Elle permet de réduire les dimensions sans perdre beaucoup d'information.
- Elle met en évidence les changements dans le comportement de la MAS (dus à un défaut) en suivant l'évolution de la composante PC1.
- On peut ensuite tracer des graphiques simples (1D ou 2D) qui montrent clairement les

différences entre états sains et défectueux.

La suite de l'exemple :

Depuis (2.11) on a les résultats suivants :

$$q_1 = \begin{bmatrix} 0.39256 \\ 0.39931 \\ 0.4060 \\ -1.5903 \\ 0.39256 \end{bmatrix} ; \quad q_2 = \begin{bmatrix} -0.1307 \\ 0.0422 \\ 0.2152 \\ 0.0040 \\ -0.1307 \end{bmatrix} ; q_3 = \begin{bmatrix} -0.00434 \\ 0.00203 \\ 0.00840 \\ -0.00175 \\ -0.00434 \end{bmatrix}$$

- q_1 : est la composante principale la plus informative : elle explique à elle seule la majorité de la variance des données (et met en évidence un possible défaut ou une anomalie — l'observation 4)
- q_2 : apporte une information complémentaire mais moins forte.
- q_3 : n'apporte pratiquement rien de significatif : elle peut être négligée dans une réduction de dimension à 2D.

2.4.7. Étape 7 : Interprétation

L'étape d'interprétation consiste à analyser les composantes principales pour détecter et distinguer les éventuels défauts en observant comment les données projetées varient selon les états de fonctionnement de la MAS[22].

- Chaque composante principale est une combinaison linéaire des variables initiales.
- Par exemple, la première composante

$$z_1 = [-0.7149, 0.6936, 0.0885]^T$$

Indique que :

La variable 1 et la variable 2 ont une influence forte et opposée (un est négatif, l'autre positif),

La variable 3 a une influence faible sur cette composante.

- Les valeurs positives ou négatives sur une composante principale indiquent la position relative des observations le long de cet axe.
- Ici, on remarque que la 4ème observation a une valeur très négative (−1.59) sur la première composante, alors que les autres sont proches de 0.4 cela signifie que la 4ème observation est

très différente des autres sur l'axe principal q_1 alors le défaut est détecté.

- Les observations 1, 2, 3 et 5 sont proches entre elles, ce qui indique qu'elles partagent des caractéristiques similaires dans l'espace défini par la première composante.

2.5. Détection et diagnostic basés sur l'ACP

L'approche proposée pour le diagnostic en ligne des MAS repose sur une méthodologie en trois étapes principales[21].

2.5.1 Acquisition des courants statoriques

Dans un premier temps, les courants des trois phases de MAS sont mesurés en temps réel. Ces signaux constituent la base de l'analyse à venir.

2.5.2 Analyse par vecteurs et valeurs propres

À partir du référentiel tridimensionnel formé par les courants statoriques, une analyse mathématique est réalisée pour extraire les directions principales de variation des données représentées par les vecteurs propres ainsi que leur importance relative, exprimée par les valeurs propres. Cette étape permet de capturer la structure intrinsèque du signal en identifiant les directions dominantes.

2.5.3 Détection de défauts et évaluation de leur sévérité

En exploitant les vecteurs et valeurs propres extraits, il est possible de détecter la présence d'anomalies dans le fonctionnement du moteur. Une classification du type de défaut peut être effectuée, accompagnée du calcul d'un indice de gravité, permettant de quantifier l'importance du défaut détecté.

La Figure 2.2 illustre la structure conceptuelle de cette approche. Les notations $\mathbf{z}$ et λ y désignent respectivement l'ensemble des vecteurs propres et des valeurs propres associées.

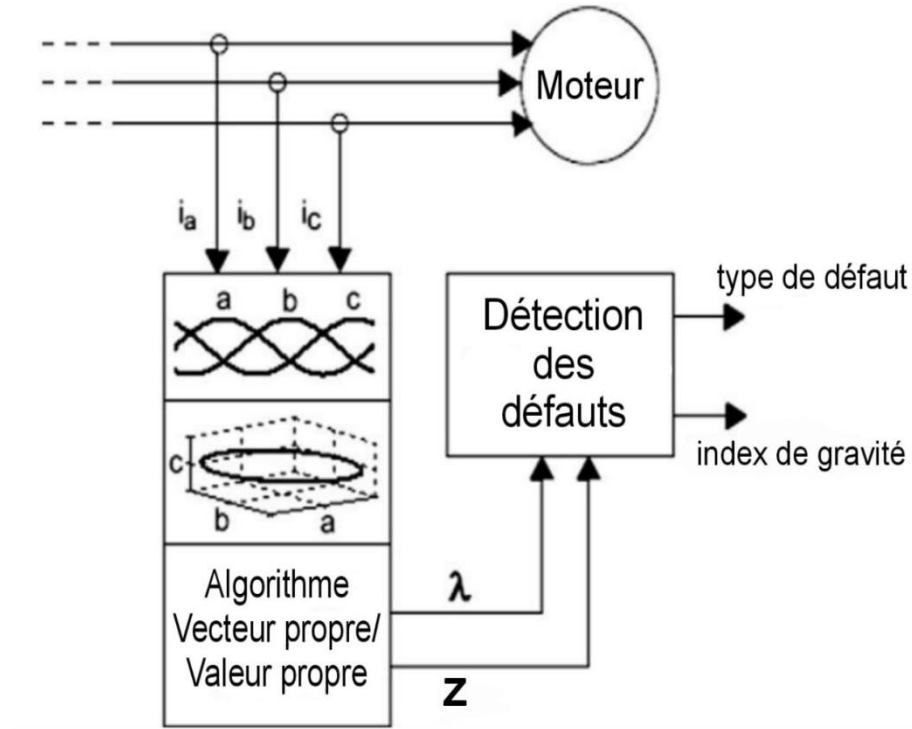


Figure 2. 2 Structure de l'algorithme proposé.

2.6. Acquisition des courants

Dans une MAS triphasé sans connexion du neutre et compte tenu des conditions idéales et avec une alimentation de tension équilibrée, les courants doivent être équilibrés.

$$\begin{cases} i_a = i * \sin(\omega t - \varphi) \\ i_b = i * \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi\right) \\ i_c = i * \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \varphi\right) \end{cases} \quad (2.11)$$

La relation 2.12 suivante est vérifiée. Elle représente un cercle centré à l'origine des coordonnées, où R désigne son rayon, comme présenté à la Figure 2.3.

$$i_a^2 + i_b^2 + i_c^2 = R^2 \quad (2.12)$$

En conditions normales de fonctionnement, le motif formé par les courants statoriques de la MAS prend la forme d'un cercle. Toutefois, en présence d'un défaut d'enroulement du stator, ce motif se déforme et adopte une forme elliptique, dont l'orientation de l'axe principal indique la phase défectueuse (voir la Figure 2.4). [21]

En revanche, lorsqu'il s'agit de barres cassées dans le rotor, certaines composantes de fréquence supplémentaires apparaissent dans le courant statorique. Ces composantes sont données par la relation :

$$f = f_1(1 \pm ks) \quad (2.13)$$

Où f est la fréquence d'alimentation, s le glissement du rotor, et k un entier.

Dans ce cas, le motif du courant ne forme plus un cercle, mais plutôt une forme en anneau comme illustré dans la Figure 2.5. Ce changement de forme permet de distinguer le type de défaut présent dans la MAS.

2.7. Détection de défauts dans la MAS

L'analyse des valeurs propres permet de déterminer l'état de la MAS à partir de la forme du nuage de points dans l'espace des courants statoriques (3D).

2.7.1. Cas sans défauts :

Lorsque les deux principales valeurs propres sont égales et constantes, cela signifie que la forme du signal dans l'espace est circulaire. Ce comportement indique un fonctionnement normal de la MAS, sans court-circuit d'enroulement statoriques ni rupture de barre rotorique (voir Figure 2.3)[21].

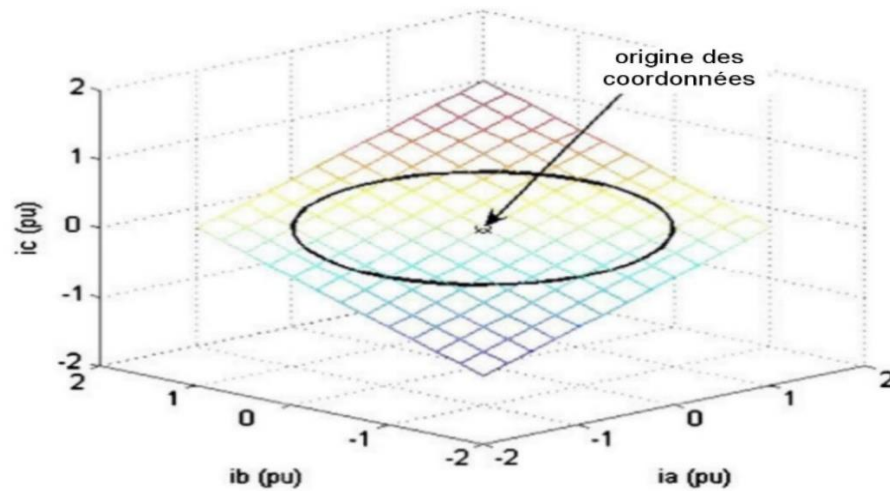


Figure 2.3. Modèle de courant 3D pour une MAS saine.

2.7.2. *Défaut d'enroulement statorique :*

Si les valeurs propres sont différentes, cela reflète une forme elliptique du signal. La direction principale (grand axe de l'ellipse) est alignée avec la phase concernée par le défaut. Dans ce cas, la première composante principale (associée à la plus grande valeur propre) domine, indiquant une concentration de l'énergie sur une seule direction (voir Figure 2.4).

Cette orientation varie selon la phase défectueuse, ce qui permet d'identifier précisément la phase impactée[21].

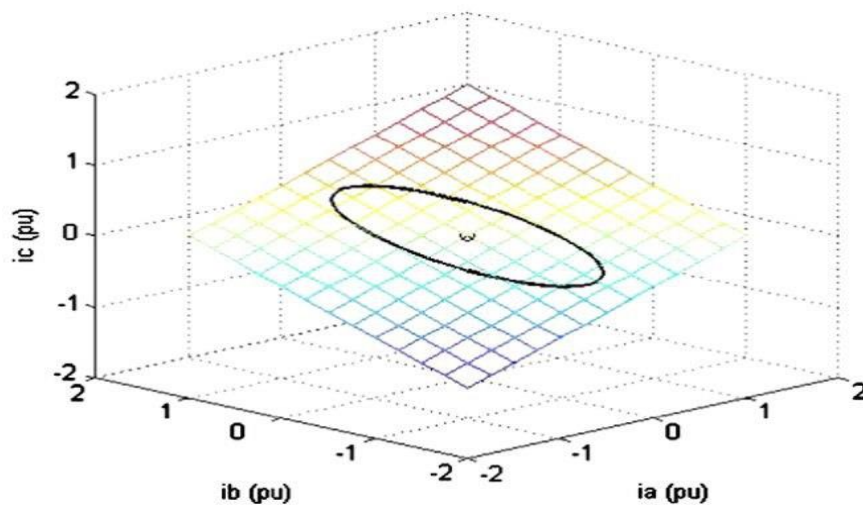


Figure 2.4 Modèle de courant 3D pour une MAS avec défaut ITSC.

2.7.3. Rupture de barres du rotor :

Si les valeurs propres restent égales, mais changent d'un cycle à l'autre, cela suggère une variation périodique du rayon du cercle dans l'espace de courant. On observe alors une forme en anneau qui traduit une instabilité due à des barres cassées dans le rotor (voir Figure 2.5).

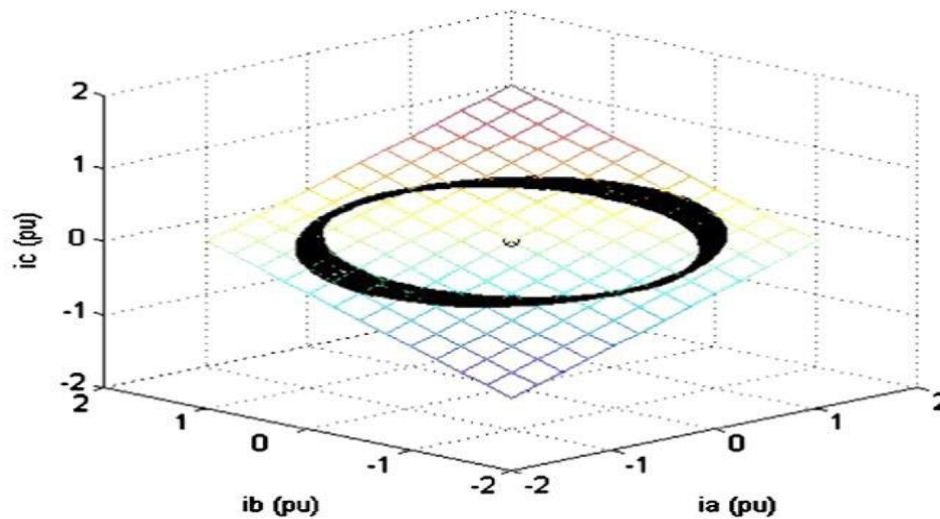


Figure 2 .5 Modèle de courant 3D pour une MAS avec des barres de rotor cassées.

L'orientation du premier vecteur propre correspond à la direction du grand axe de l'ellipse, ce qui est particulièrement utile pour localiser un défaut de spire dans une phase donnée[20].

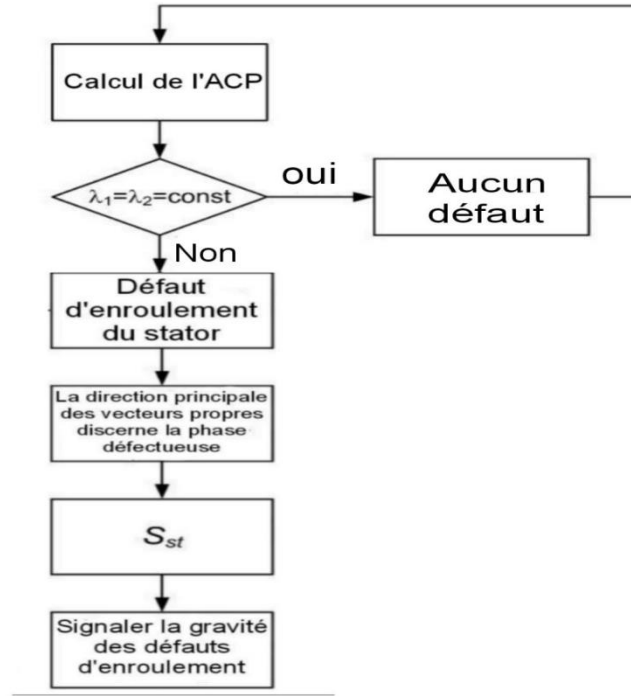


Figure 2.6 Algorithme de détection et de diagnostic de défaut.

2.8. Calcul de l'indice de gravité

Un indice de gravité, SSt , est calculé par l'algorithme proposé sur les valeurs propres obtenues. Pour un défaut d'enroulement du stator, l'indice de gravité sera donné par (2.14). Dans cette équation λ_{max} et λ_{min} désignent respectivement les deux valeurs propres. Il est important de noter que λ_{max} fait référence à l'axe où le défaut survient, la direction principale portant plus d'énergie. L'indice de gravité varie entre zéro et un. L'absence de toute défaillance est signalée par un indice de gravité nul [21].

$$SSt = 1 - \frac{\lambda_{min}}{\lambda_{max}} \quad (2.14)$$

2.9. Conclusion

L'ACP constitue une méthode mathématique rigoureuse et efficace pour la réduction de la dimensionnalité, particulièrement adaptée à l'analyse des signaux issus de la MAS. Au cœur de cette méthode se trouve le calcul des valeurs propres et des vecteurs propres de la matrice de covariance des données. Cette étape fondamentale permet d'identifier les directions principales (les composantes

principales) dans lesquelles la variance des données est maximale. Les valeurs propres indiquent l'importance relative de chaque composante, tandis que les vecteurs propres définissent les axes de projection dans le nouvel espace. En sélectionnant les composantes associées aux plus grandes valeurs propres, on peut projeter les données dans un espace réduit, tout en conservant les caractéristiques essentielles nécessaires à la détection de défauts. Cette approche permet ainsi de simplifier les données, de réduire le bruit et de révéler plus clairement les anomalies caractéristiques des dysfonctionnements.

Chapitre 3 : Application de l'ACP au diagnostic de défaut

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons simuler la machine asynchrone pour plusieurs cas de fonctionnement et analyser son comportement à l'aide de la méthode d'analyse en composantes principales (ACP). La définition des indices de sévérité permettra d'analyser le comportement de la MAS dans diverses conditions, principalement :

- Une MAS saine, pour différentes valeurs du couple résistant.
- Une MAS présentant un défaut ITSC avec variation de couple résistant.

Cette étude simulation est réalisée dans l'environnement Matlab/Simulink. Les résultats obtenus par simulation sont interprétés et commentés.

Par la suite, les résultats expérimentaux obtenus avec une MAS, avec stator rebobiné, alimentée par un réseau triphasé sont présentés.

3.2 Simulation de la MAS saine

La MAS, connectée en étoile, est alimentée par un système équilibré de tensions triphasées, défini comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = 220 * \sqrt{2} \begin{bmatrix} \sin(2\pi f * t) \\ \sin\left(2\pi f * t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(2\pi f * t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Nous avons simulé un démarrage à vide sous une tension sinusoïdale, suivi de l'application d'un couple résistant ($C_r = 3.8 \text{ Nm}$) à l'instant $t = 0.4 \text{ s}$. Lors de l'application de cette charge, nous observons que la machine réagit à cette perturbation par une diminution de la vitesse. Parallèlement, le couple électromagnétique augmente et atteint la valeur du couple de charge nominale (3.8 Nm).

On a utilisé le Modèle Simulink développé par [13] pour simuler la MAS avec défaut ITCS.

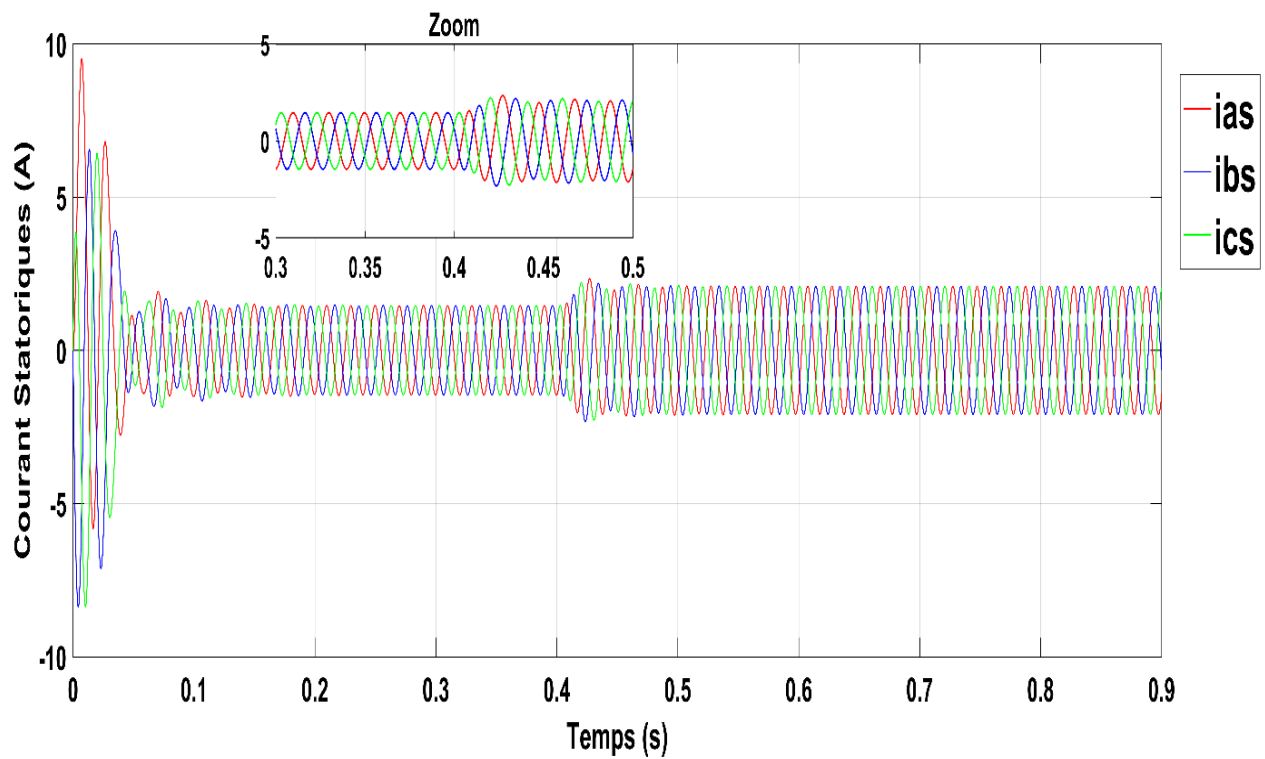


Figure 3. 1 Les Courants Statoriques triphasés i_{as} , i_{bs} , i_{cs} .

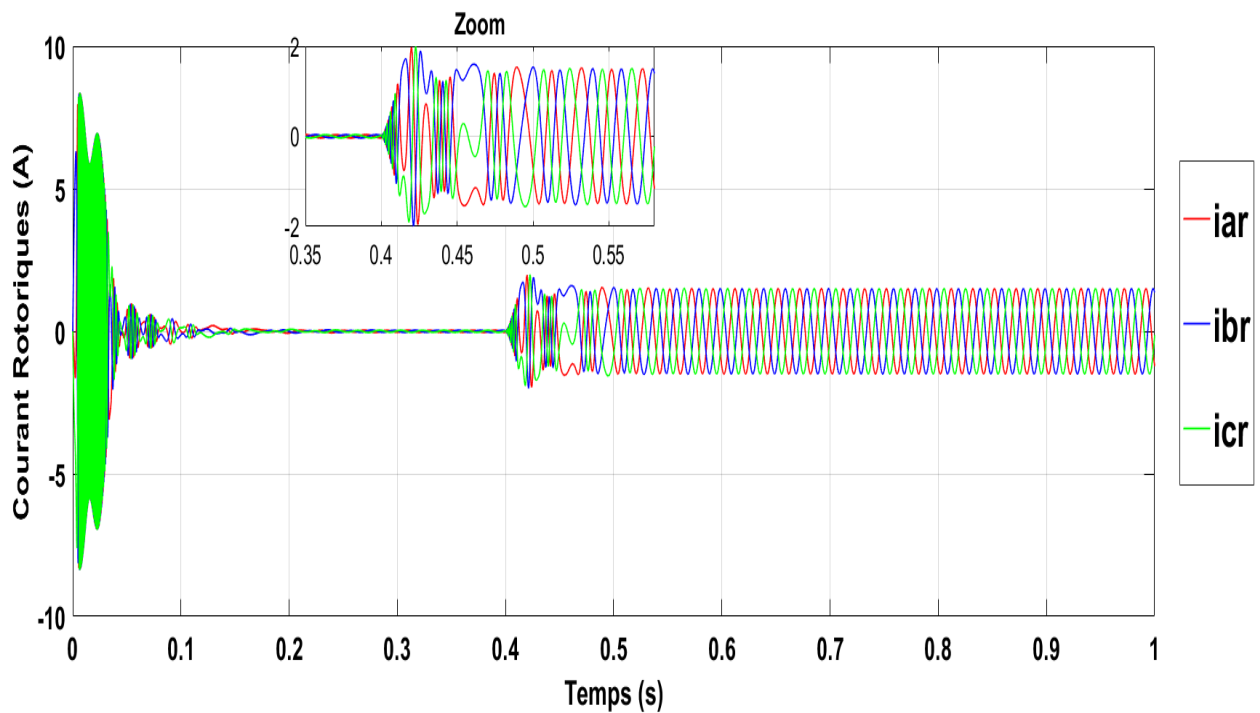


Figure 3. 2 Les Courants Rotoriques triphasés i_{ar} , i_{br} , i_{cr} .

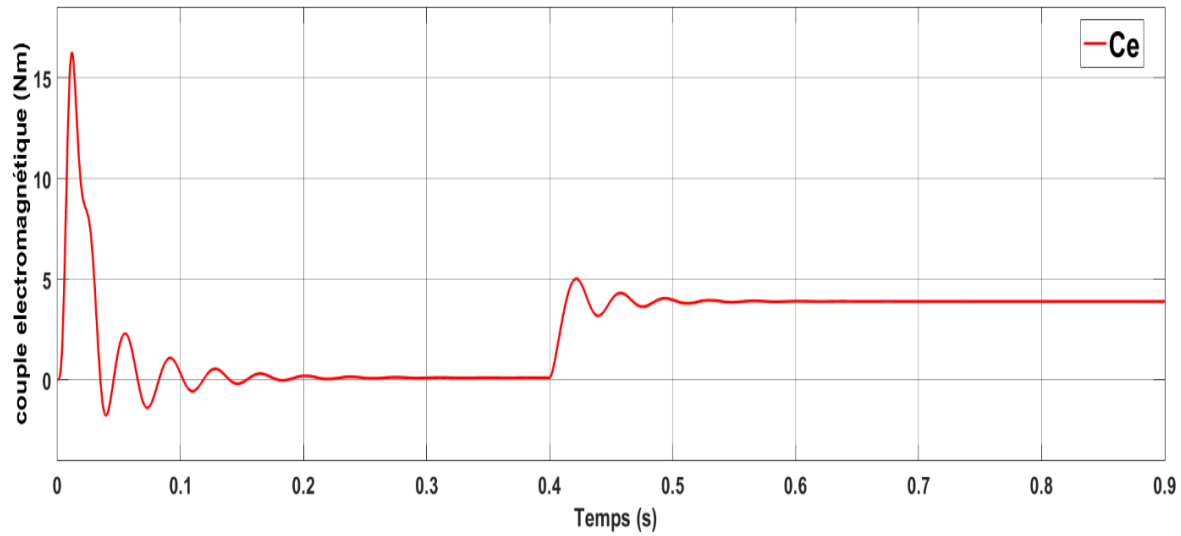


Figure 3. 3 LeCouple électromagnétique (C_e).

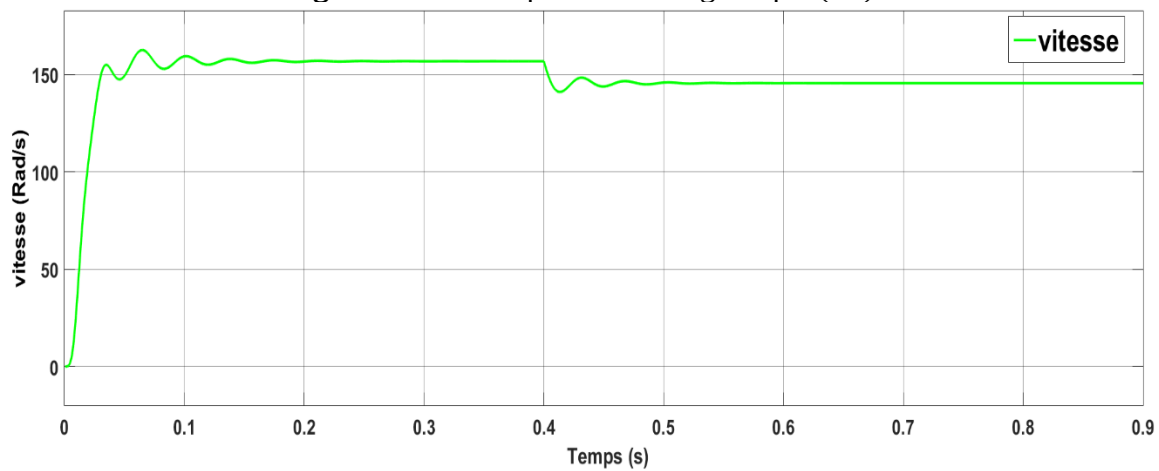


Figure 3. 4 LaVitesse Mécanique.

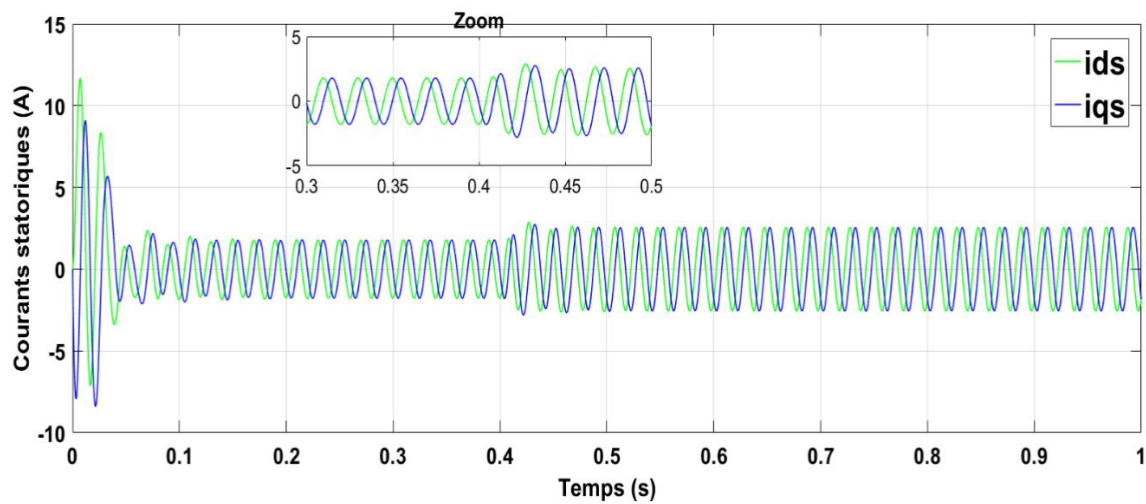


Figure 3. 5 Les Courants Statoriques de Park ids , iqs .

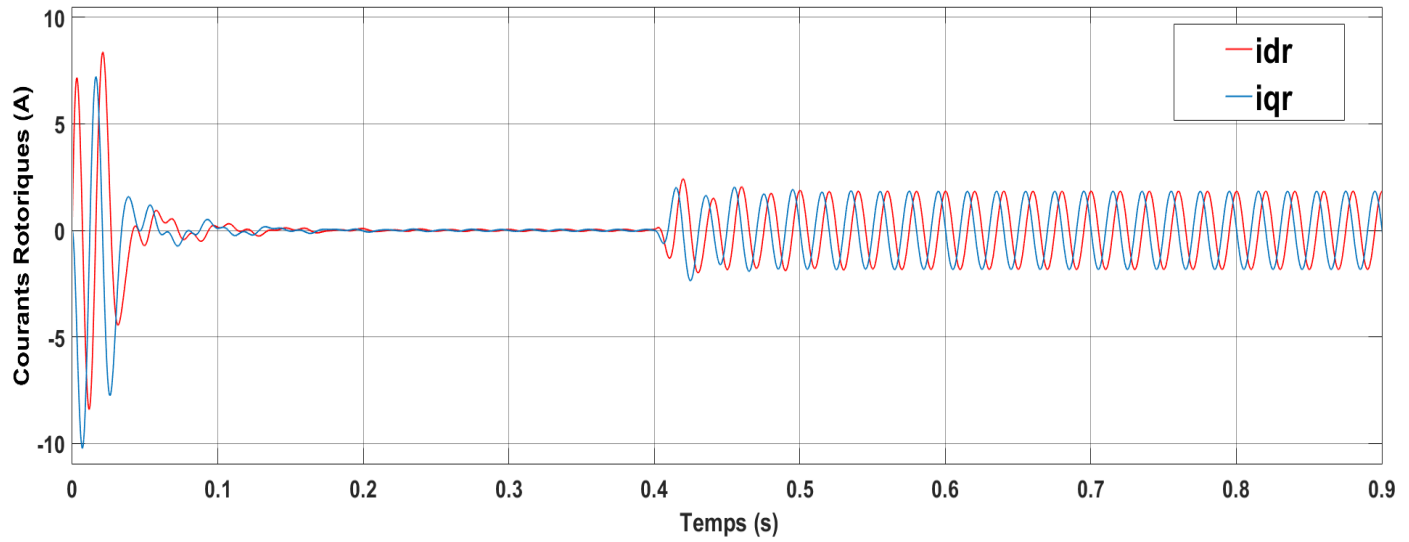


Figure 3. 6 Les Courants Rotoriques de Park i_{dr} , i_{qr} .

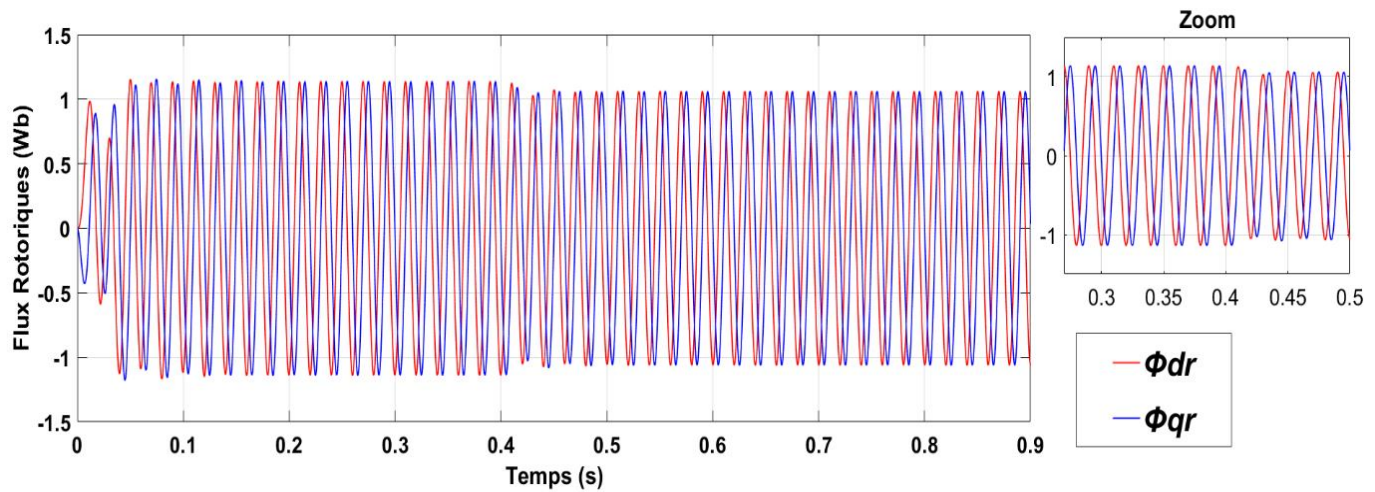


Figure 3. 7 Les Flux Rotoriques de Park ϕ_{dr} , ϕ_{qr} .

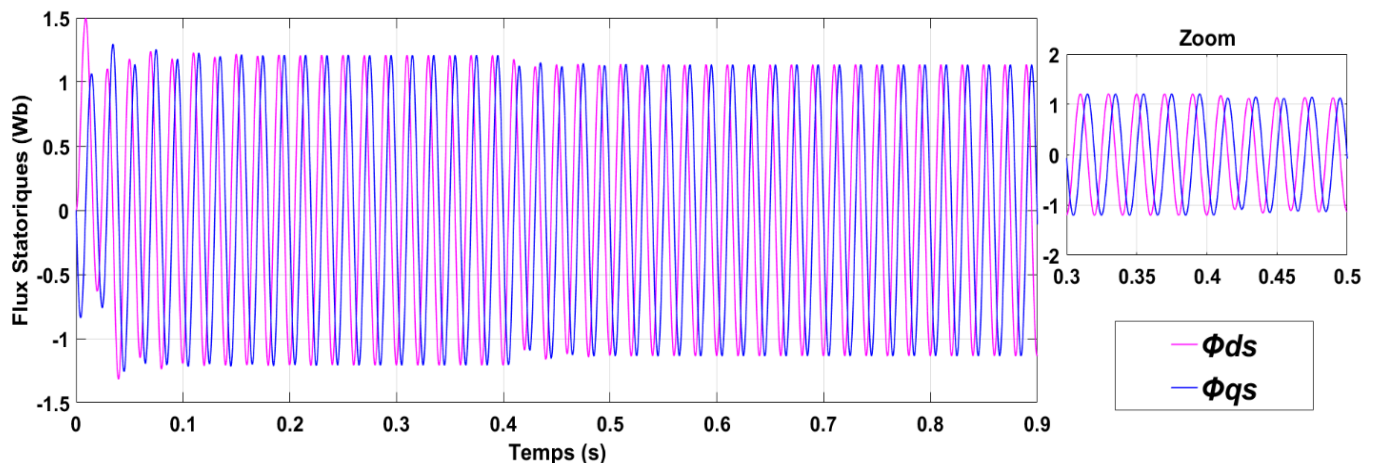


Figure 3. 8 Les Flux Statoriques de Park ϕ_{ds} , ϕ_{qs} .

3.2.1 Interprétation des graphes de simulation

La Figure 3. 1 présente les courants statoriques triphasé sous une forme sinusoïdale, déphasée de 120° entre les phases, confirmant une alimentation triphasée équilibrée. À $t = 0.4\text{ s}$, une augmentation des courant est observée, correspondant à l'application d'un couple résistant.

La figure 3. 2 présente l'évolution temporelle des courants rotoriques triphasés de la MAS. À $t=0.4\text{ s}$, l'application d'un couple résistant engendre une perturbation visible par une augmentation des oscillations dans les courants, comme le montre le zoom. Cette réaction traduit une modification dynamique du système, cette observation souligne l'impact direct du couple résistant sur le comportement électrique du rotor, ce qui est essentiel pour le diagnostic et la surveillance du fonctionnement de la MAS.

La figure 3. 3 montre la réponse du couple électromagnétique avec un pic initial suivi d'oscillations amorties, puis une stabilisation autour de 4 N.m après l'application d'un couple résistant à $t = 0.4\text{ s}$.

La vitesse mécanique illustrée dans la Figure 3. 4 présente une légère chute suite à l'application d'un couple résistant, puis retrouve rapidement un régime stationnaire.

Les figures 3.5 et 3.6 présentent respectivement l'évolution temporelle des courants statoriques i_{ds} et i_{qs} , et des courants rotoriques i_{dr} et i_{qr} dans le référentiel de Park. On observe dans les deux cas une phase transitoire initiale caractérisée par des oscillations, À $t = 0.4\text{ s}$. L'application d'un couple résistant provoque une perturbation marquée des courants, visible par une augmentation de l'amplitude des composantes directe et quadrature, Cette réaction dynamique traduit une réponse du système au couple résistant appliqué.

Les figures 3.7 et 3.8 illustrent respectivement l'évolution temporelle des flux rotoriques Φ_{dr} et Φ_{qr} , ainsi que des flux statoriques Φ_{ds} et Φ_{qs} dans le référentiel de Park. On observe une variation sinusoïdale régulière des flux avant $t = 0.4\text{ s}$, confirmant un fonctionnement sain de la machine. À partir de $t = 0.4\text{ s}$, l'application d'un couple résistant induit une légère modification de l'amplitude des flux. Cette variation témoigne d'une réaction dynamique de la machine face au couple résistant appliqué.

3.2.2 Application de l'ACP pour l'analyse des données

Après avoir présenté dans le chapitre 2 les notions fondamentales et les bases de la méthode ACP, l'objectif principal de cette section se concentre sur son application aux données recueillies, représentés par les courants statoriques et sur l'interprétation des résultats obtenus. Les indices de sévérité sont calculés. On obtient :

$$SS_t = 1 - \frac{\lambda_{min}}{\lambda_{max}} = 1 - \frac{3.2768}{3.2772} \approx 0.0001$$

$$SS_v = 1 - \frac{\lambda_{min}}{\lambda_{max}}$$

Les résultats obtenus sont présentés dans Tableau 3. 1, facilitant la visualisation des composantes principales, des valeurs propres associées et de l'indice de sévérité statorique. Cette approche analytique fournit un cadre solide pour évaluer l'état de la MAS.

Vecteur propre principal z1	Vecteur propre secondaire z2	Valeurs propres associées	Indice de sévérité statorique
+0.5654 <i>ia</i> , -0.7928 <i>ib</i> , +0.2274 <i>ic</i>	-0.5890 <i>ia</i> , -0.1952 <i>ib</i> , +0.7842 <i>ic</i>	$\lambda_{max} = 3.2772$, $\lambda_{min} = 3.2768$	$SS_t = 0.0001$

Tableau 3. 1 Les Résultats de simulation de la méthode ACP (cas sain)

Le vecteur propre principal (z1) représente une direction dans l'espace tridimensionnel (*ia, ib, ic*) la variance du signal est maximale équilibrée indique une dispersion énergétique distribuée entre les trois phases, sans dominance(+0.5654 *ia*, -0.7928 *ib*, +0.2274 *ic*).

Le vecteur propre secondaire(z2), orthogonal à (z1), représente une direction indépendante dans le même espace, avec des composantes (0.5890*ia*, -0.1952*ib*, +0.7842*ic*). Cette orientation reflète une répartition homogène de la variance énergétique entre les phases, sans phase dominante, caractéristique d'un état sain de la machine.

Les valeurs propres associées $\lambda_{max} = 3.2772$ et $\lambda_{min} = 3.2768$ sont pratiquement égales.

L'indice de sévérité statorique $SS_t = 0.0001$ très proche de zéro confirme l'absence de défaut au niveau des enroulements statoriques.

Ces observations sont caractéristiques du comportement sain d'un MAS équilibré.

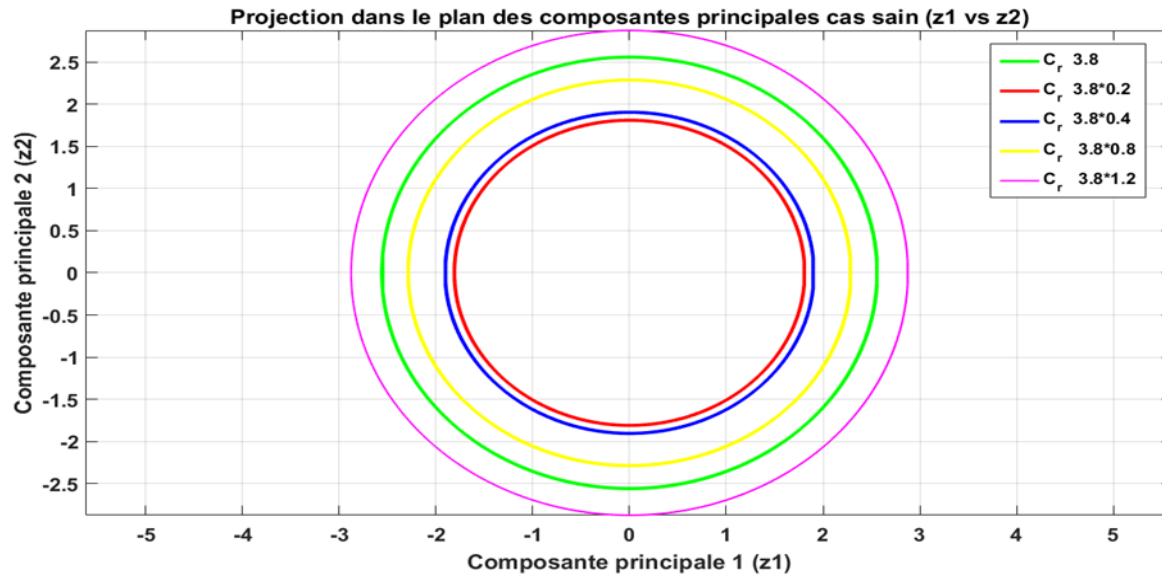


Figure 3. 9 projection des composantes principales en fonction de variation de couple de charge (C_r).

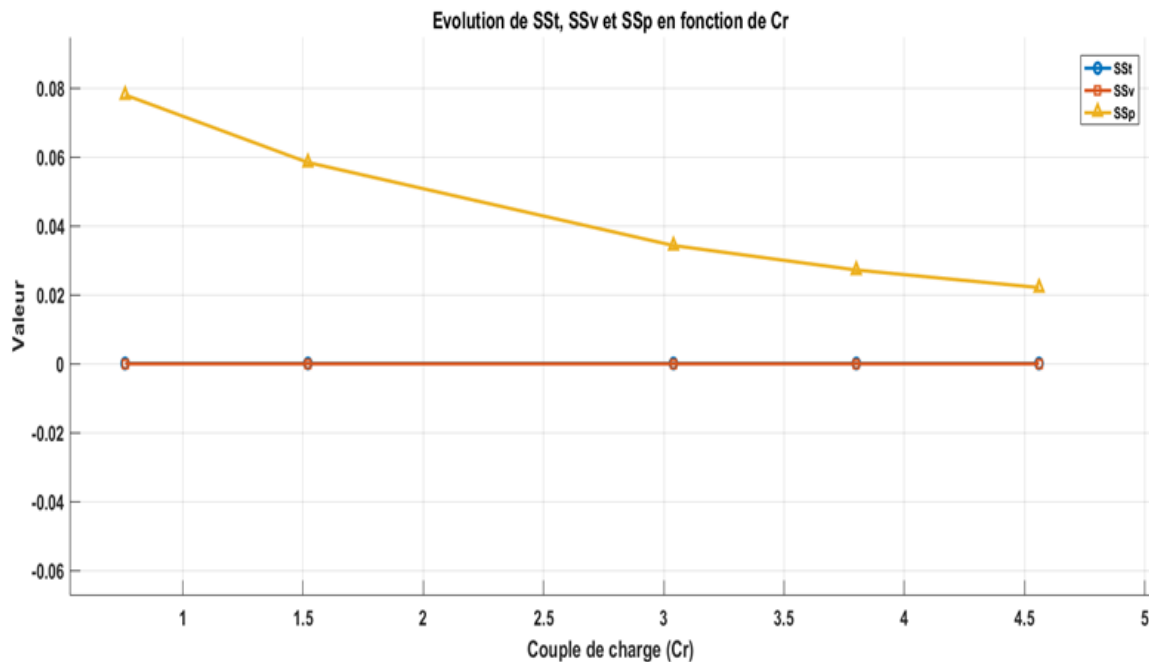


Figure 3. 10 projections les indices des sévérité SS_t , SS_p et SS_v en fonction de C_r .

La figure 3.9 illustre que, malgré l'augmentation progressive du couple de charge, les projections des composantes principales restent concentriques et symétriques autour de l'origine. Cette constance dans la forme circulaire et la position des projections confirme l'absence de perturbations significatives dans le fonctionnement de la MAS.

Les courbes dans la figure 3. 10montrent que les indices SS_t et SS_v présentent une constance, même en cas de variation du couple de charge, ce qui indique que la machine reste dans un état de fonctionnement sain, où les courants statorique et les tensions demeurent bien équilibrés.

Concernant l'indice SS_p , bien qu'il soit relativement constant, il peut réagir à de légères variations liées à la MAS.

3.3 Simulation de la MAS avec défaut

Dans la simulation suivante, la machine présentant un défaut de court-circuit interne affectant 50 spires de l'enroulement statorique dans la phase B , sous l'application d'un couple de charge nominal ($Cr = 3,8$) à $t = 0.4$ et l'application du défaut ITSC à $t = 0.6$ s.

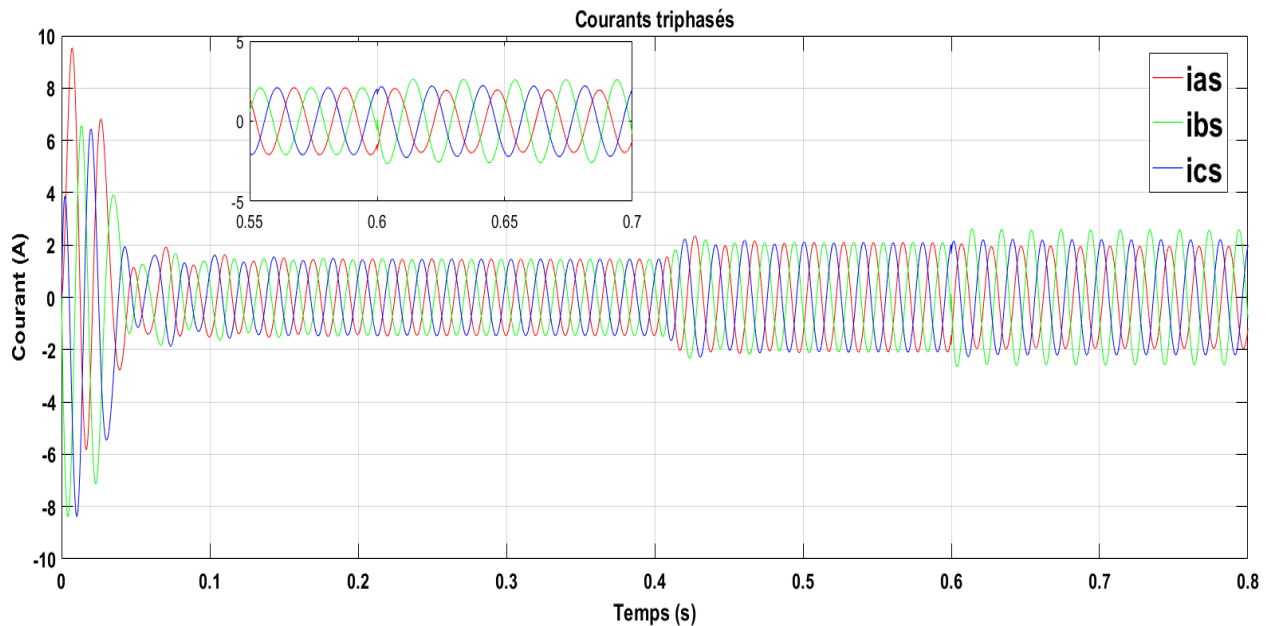


Figure 3. 11 Les Courants Statoriques triphasé ias , ibs , ics .

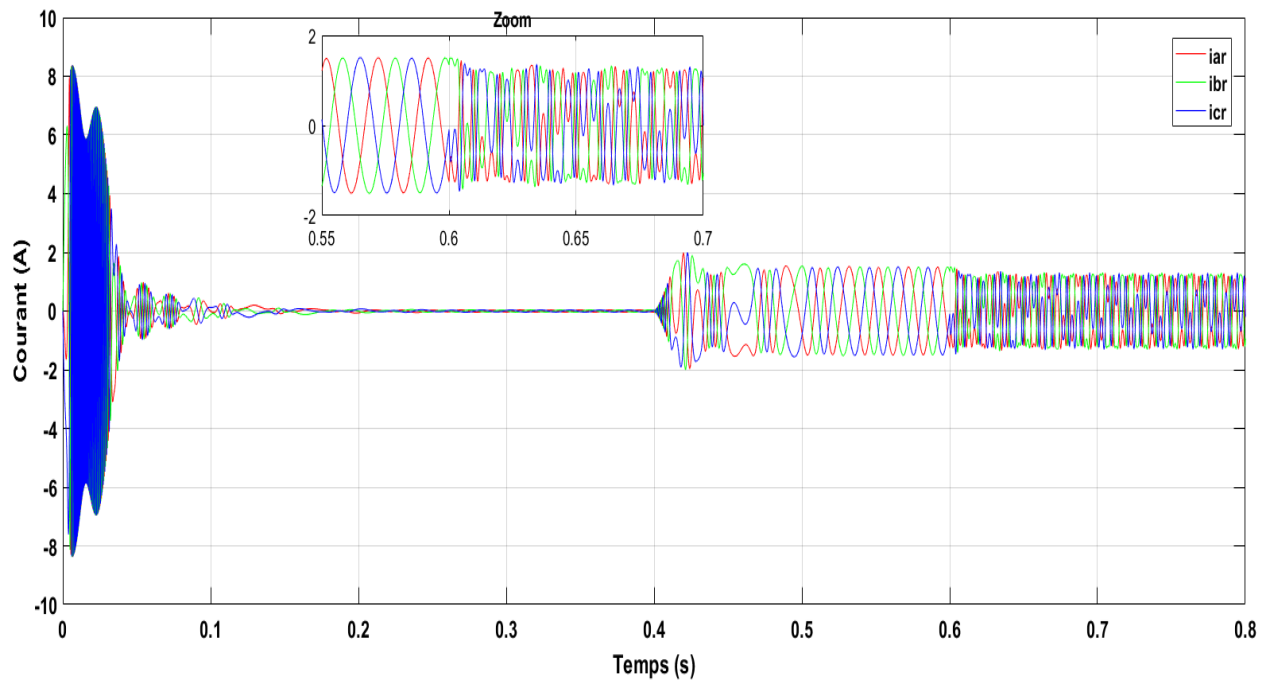


Figure 3. 12 Les Courants Rotoriques triphasé i_{ar} , i_{br} , i_{cr} .

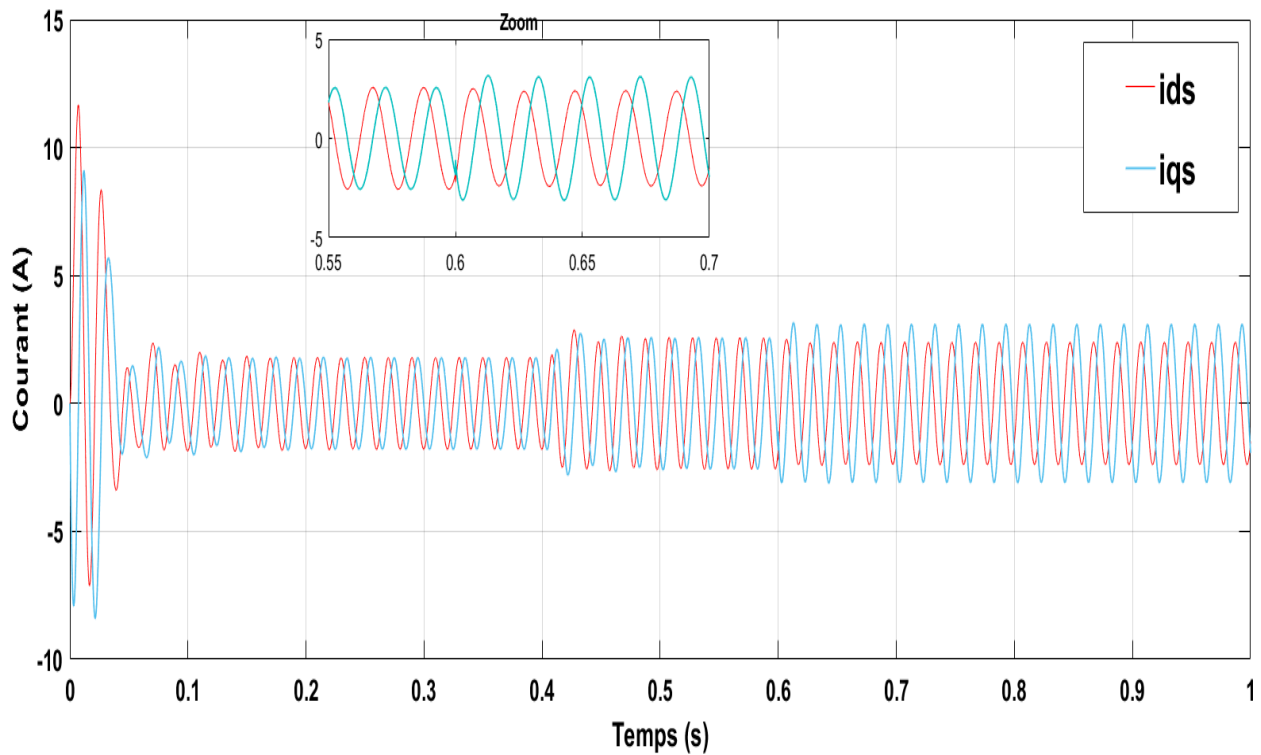


Figure 3. 13 Les Courants Statoriques de Park i_{ds} , i_{qs} .

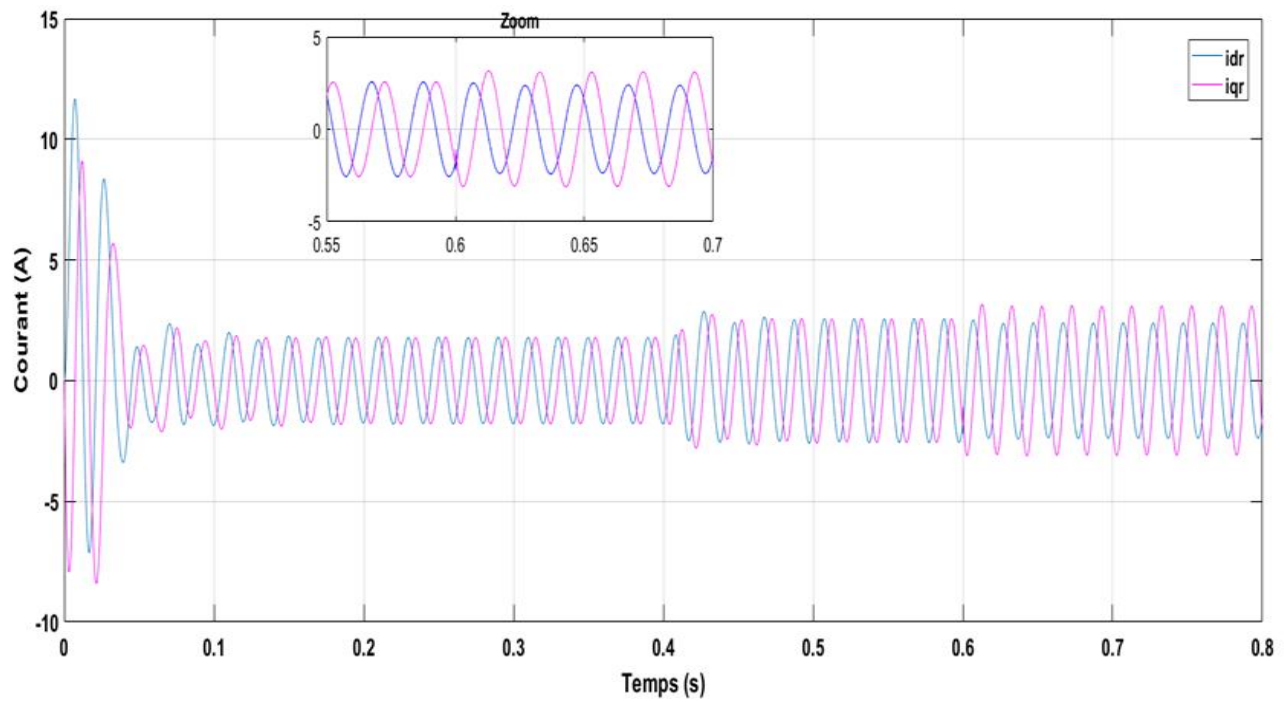


Figure 3. 14 Les Courants Rotoriques de Park i_{dr} , i_{qr} .

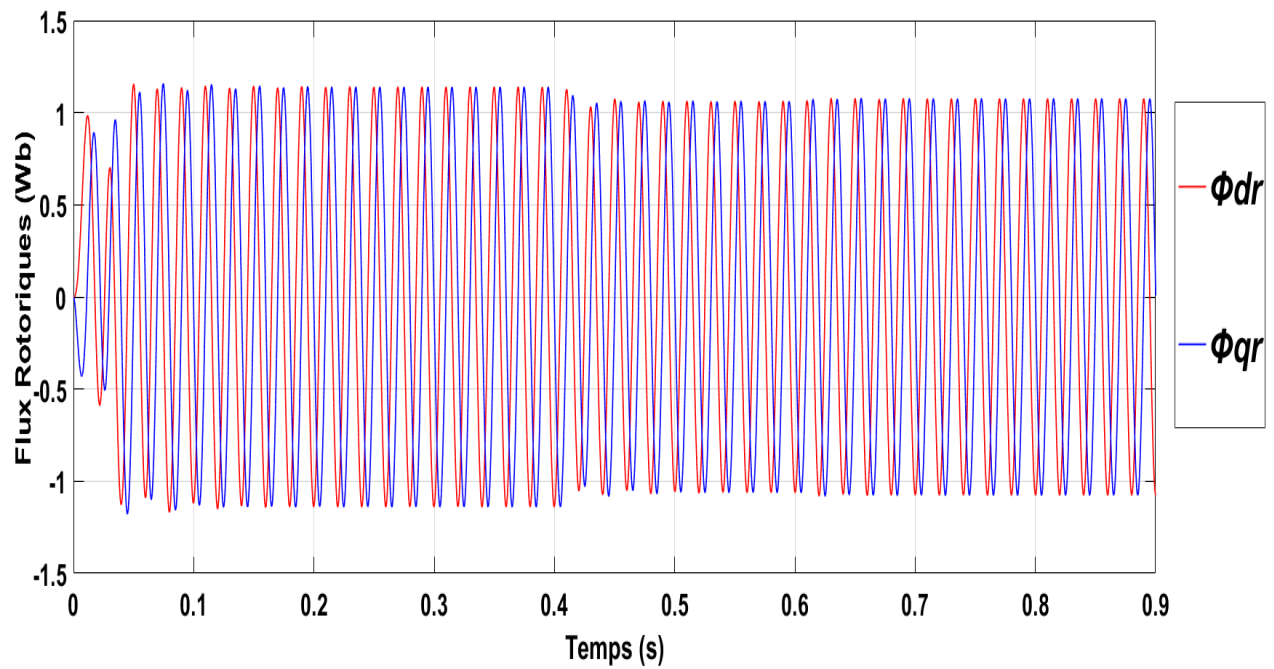


Figure 3. 15 Les Flux Rotoriques de Park ϕ_{dr} , ϕ_{qr} .

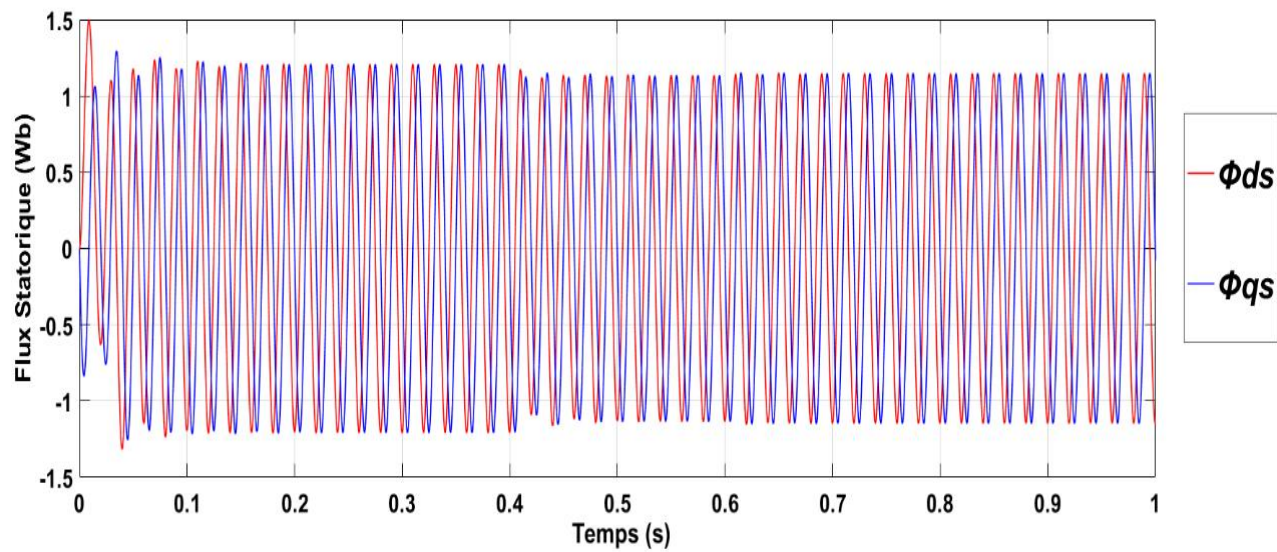


Figure 3. 16 Les Flux statoriques de Park ϕ_{ds} , ϕ_{qs} .

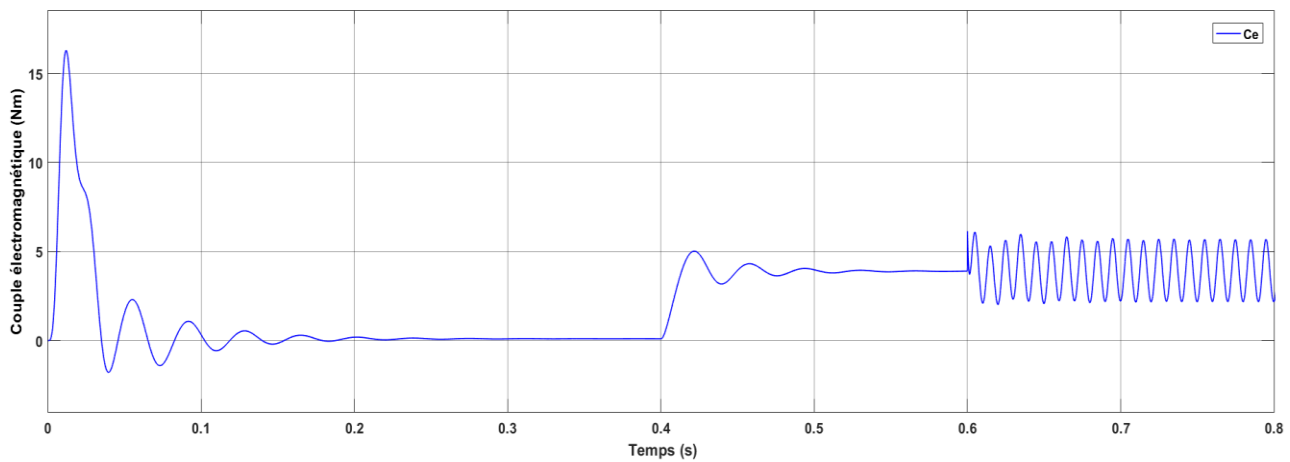


Figure 3. 17 Le couple électromagnétique.

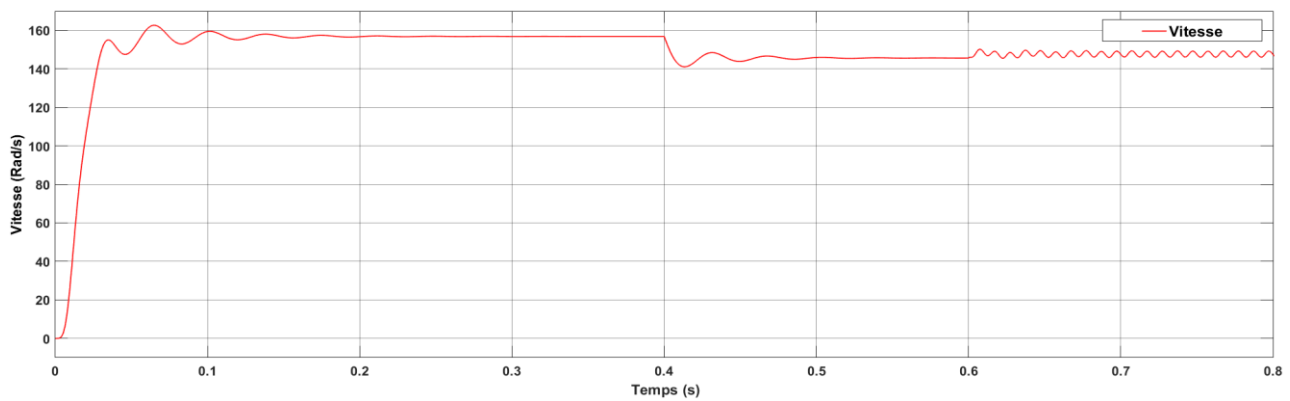


Figure 3. 18 La Vitesse Mécanique.

3.3.1 Interprétation des graphes de simulation

La figure 3. 11 et 3.12 illustre l'évolution temporelle des courants triphasés respectivement statorique et rotoriques. Lors du démarrage, un régime transitoire est caractérisé par des oscillations d'amplitude élevée. À $t = 0.4 \text{ s}$, l'application d'un couple résistant provoque une augmentation des courants. Jusqu'à $t = 0.6 \text{ s}$, les courants restent équilibrés et sinusoïdaux, attestant du fonctionnement sain de la MAS. À partir de cet instant, un défaut ITSC est introduit sur la phase B , provoquant une augmentation significative du courant ib . Cette anomalie engendre un déséquilibre marqué entre les phases.

La figure 3. 13 et 3. 14 illustre l'évolution temporelle des composantes directe et quadrature des courants dans le référentiel de Park respectivement statorique et rotoriques. À $t = 0.4 \text{ s}$, un couple résistant est appliqué à la machine, entraînant une augmentation des oscillations des courants. Jusqu'à $t = 0.6 \text{ s}$, les courants conservent une forme sinusoïdale régulière, témoignant d'un fonctionnement normal sous contrôle vectoriel, à partir de $t = 0.6 \text{ s}$, un défaut ITSC est introduit, entraînant une perturbation des courants ids et iqs et idr, iqr visible par une déformation des formes d'onde et un déséquilibre entre elles.

Les figures 3. 15 et 3. 16 présentent l'évolution temporelle des flux de Park, respectivement rotorique et statorique. À $t = 0,4 \text{ s}$, l'application d'un couple résistant provoque une réduction des amplitudes des flux $\Phi dr, \Phi qr$ et $\Phi ds, \Phi qs$ à partir de $t = 0.6 \text{ s}$, l'apparition d'un défaut ITSC entraîne une nouvelle altération des formes d'onde, traduisant un déséquilibre entre les phases. Cette perturbation met en évidence la présence d'un défaut affectant la MAS.

Dans les figures 3. 17 et 3. 18, on observe les effets sur le couple électromagnétique et la vitesse. À $t = 0.4 \text{ s}$, l'application du couple résistant entraîne une légère augmentation du couple électromagnétique et une chute de vitesse. À $t = 0.6 \text{ s}$, l'apparition d'un défaut ITSC provoque une perturbation, suivis d'oscillations.

3.3.2 Application de l'ACP dans l'Analyse des Données

Dans ce cas, l'écart observé entre les deux premières valeurs propres $\lambda_{max} = 4.84$, $\lambda_{min} = 2.60$ révèle une rupture de symétrie du système, indiquant la présence d'un défaut de court-circuit des spires statoriques.

Vecteur propre principal z1	Vecteur propre secondaire z2	Valeurs propres associées	Indice de sévérité statorique
+0.2704 <i>ia</i> , -0.8024 <i>ib</i> , +0.5320 <i>ic</i>	+0.7704 <i>ia</i> , -0.1511 <i>ib</i> , -0.6194 <i>ic</i>	$\lambda_{max} = 4.8403$ $\lambda_{min} = 2.6017$	$sst = 0.4625$

Tableau 3. 2 Résultats de simulation de la méthode ACP (cas défaut dans la phase B de 50spires)

Le diagnostic du défaut est renforcé par le calcul de l'indice de sévérité statorique $SSt = 0.4625$, cette valeur indique un défaut de sévérité modérée, compatible avec un fonctionnement temporairement acceptable, mais nécessitant une intervention de maintenance rapide pour éviter une détérioration plus grave.

Par ailleurs, l'analyse du vecteur propre principal(z1), associé à la plus grande valeur propre λ_{max} , permet d'identifier la phase affectée. Le vecteur dominant est **-0.8024 *ib***, ce qui suggère que le défaut est localisé dans l'enroulement de la phase *B*. Cette approche permet ainsi de détecter la présence d'un défaut, mais également de le localiser.

Le vecteur propre secondaire (z2), associé à une moindre valeur propre, confirme la localisation du défaut sur la phase *B*.

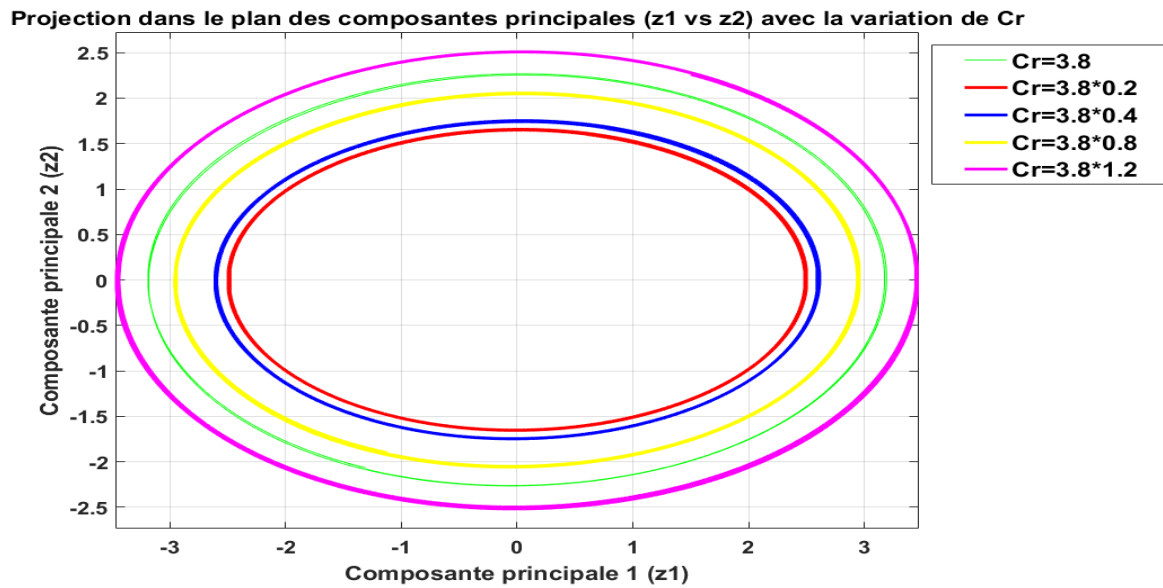


Figure 3. 19 projections dans le plan des composantes principales z1 en fonction de z2 en fonction de variation de couple de charge (Cr).

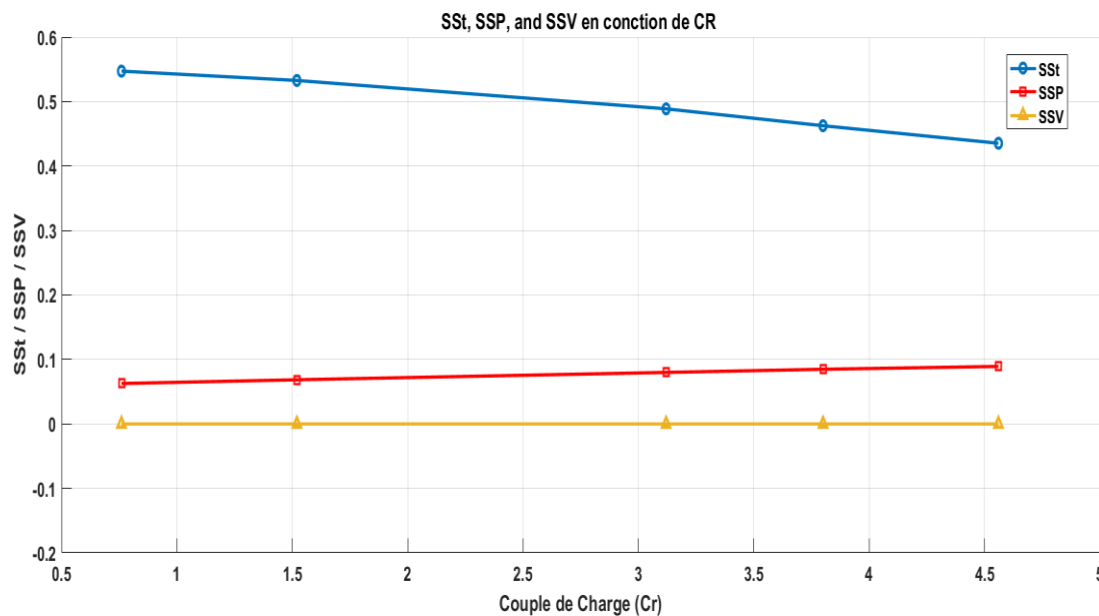


Figure 3. 20 Projection des indices de sévérité SSt , SSp et SSv en fonction de Cr.

Les projections présentées dans la Figure 3. 19 prennent la forme d'ellipses, Cette déformation elliptique constitue un indicateur de défaut ITSC ou d'anomalie dans la MAS. Ainsi, on observe que l'augmentation du couple résistant entraîne un élargissement progressif des ellipses, traduisant une

augmentation de la variance des données dans cet espace réduit. Cette évolution reflète l'influence directe du couple résistant sur la dynamique du système.

Dans la figure 3.20, la réduction de l'indice de sévérité statorique SSt avec l'augmentation du couple résistant met en lumière l'interdépendance entre le niveau de charge et l'expression du défaut. De plus, l'absence de variation significative des indices SSp et SSv renforce la spécificité de l'indice SSt en tant qu'indicateur du défaut ITSC.

3.4 Simulation d'une MAS avec défaut ITSC sur plusieurs phases statoriques

Dans cette étude, la simulation d'une MAS présentant un défaut ITSC sur plusieurs phases statoriques a été réalisée pour différents cas, incluant 6 spires, ensuite 24 spires et finalement 30 spires dans la phase A. on refait les mêmes simulations pour les phases B et C. Cette démarche vise à évaluer la performance de l'ACP pour la détection des défauts. Le couple résistant est appliqué à $t = 0.4$ s et les défauts sont appliqués à $t = 0.6$ s.

3.4.1 Défauts ITSC dans la phase A

Le tableau 3. 3 présente les résultats de l'ACP appliquée aux courants statoriques en présence d'un défaut de 6 spires. Il présente Les vecteurs propres ($z1$) et ($z2$), les valeurs propres associées et l'indice de sévérité statorique.

Vecteur propre principal $z1$	Vecteur propre secondaire $z2$	Valeurs propres associées	Indice de sévérité statorique
$-0.7840 ia,$ $+0.5895 ib,$ $+0.1945 ic$	$-0.2281 ia,$ $-0.5649 ib,$ $+0.7930 ic$	$\lambda_{max} = 3.3276$ $\lambda_{min} = 3.2664$	$SSt = 0.0184$

Tableau 3. 3. Résultats de simulation de la méthode ACP (cas défaut dans la phase A de 6 spires)

L'indice de sévérité statorique très faible $SSt = 0.0184$ indique que le déséquilibre est modéré, ce qui est conforme à un défaut de faible ampleur dans la phase considérée.

Le vecteur propre principal (z_1) associé à la valeur propre dominante, permet de déterminer la phase affectée. La composante la plus importante en valeur absolue est $-0.7840 ia$ ce qui confirme que le défaut est localisé dans l'enroulement de la phase A.

Le vecteur propre secondaire (z_2) indique que la composante sur la phase A est inférieure à celles des autres phases $-0.2281 ia$, ce qui renforcé l'hypothèse d'un défaut localisé sur cette phase.

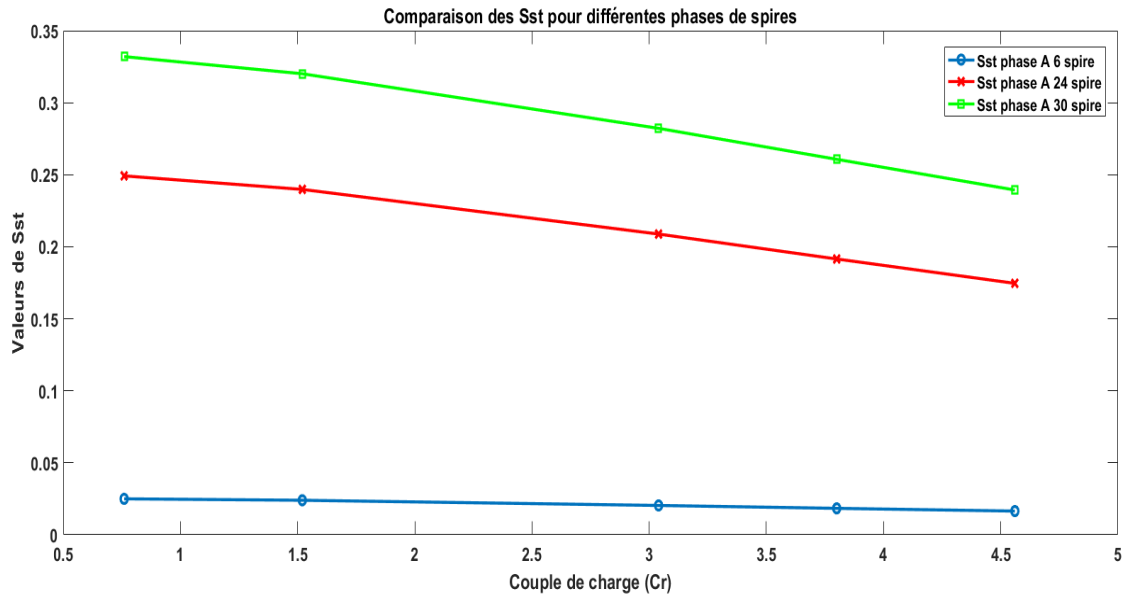


Figure 3. 21 Comparaison des Sst (indice de sévérité statorique) pour la phase A avec différentes spires.

Projection dans le plan des composantes principales (z_1 vs z_2) avec la variation de Cr

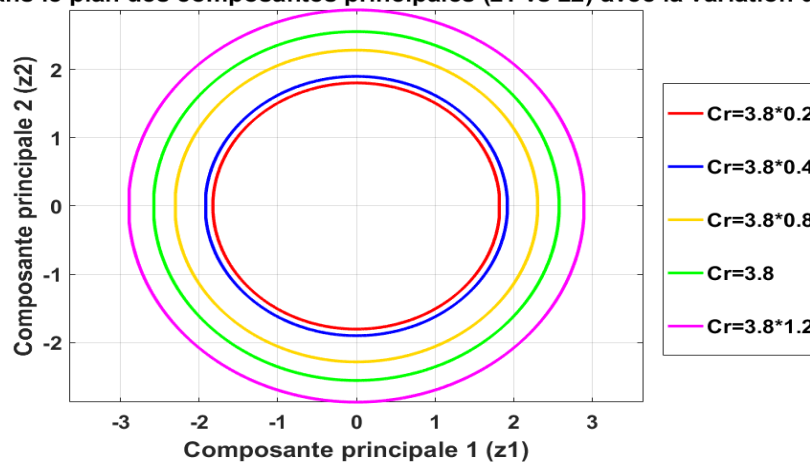


Figure 3. 22 projections dans le plan des composantes principales z_1 en fonction de z_2 dans différentes Cr avec 6 spires.

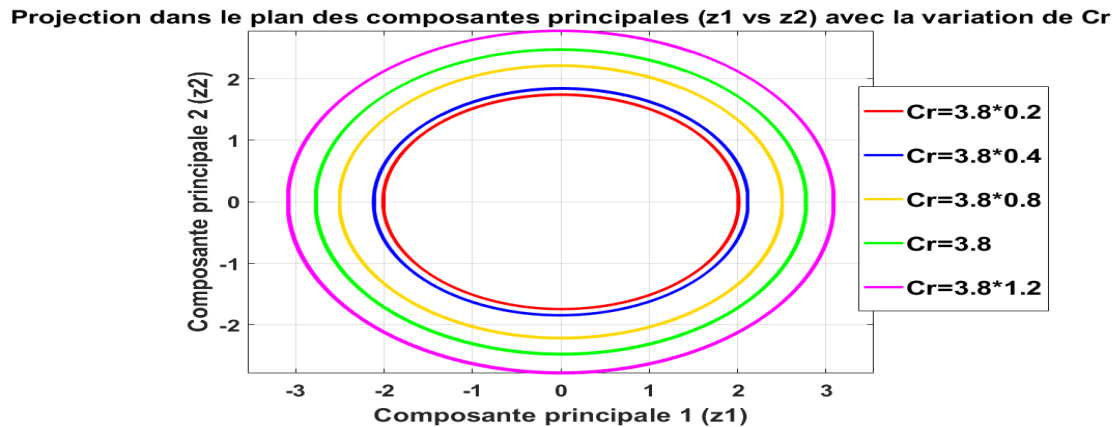


Figure 3. 23 Projection dans le plan des composantes principales ($z1, z2$) pour différents Cr avec 24 spires.

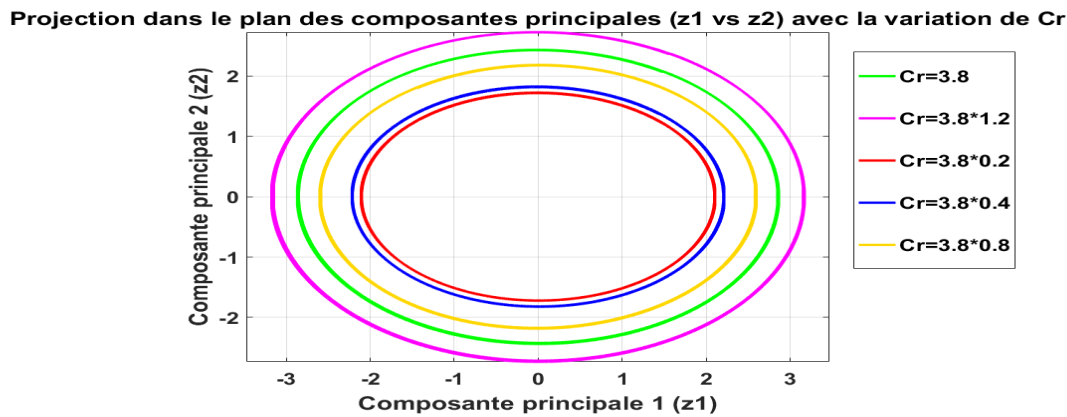


Figure 3. 24 Projection dans le plan des composantes principales ($z1, z2$) pour différents Cr avec 30 spires.

a. Interprétation des graphes de simulation

La Figure 3.21 illustre l'efficacité de l'indice SSt dans la surveillance de l'évolution d'un défaut statorique au niveau de la phase A. L'indice SSt augmente proportionnellement avec l'augmentation du nombre des spires, permettant ainsi une évaluation précise de la sévérité du défaut. Bien que le couple résistant influence légèrement SSt , Ces résultats confirment la robustesse de SSt en tant qu'outil fiable pour le diagnostic des MAS.

Les Figures 3. 22, 3. 23 et 3. 24 illustrent que les projections dans le plan des composantes principales $z1, z2$ pour différents couples de charge et différent cas de défaut ITSC révèlent clairement l'évolution du motif, qui passe d'un cercle (défaut faible) à une ellipse de plus en plus

allongée (défaut sévère). Cette évolution confirme l'efficacité de l'analyse en composantes principales pour la détection visuelle de la sévérité des défauts ITSC dans MAS.

3.4.2 Défaut ITSC dans la phase B

Le tableau 3. 4 présente les résultats de l'ACP appliquée aux courants statoriques en présence d'un défaut de 24 spires. Il présente Les vecteurs propres ($z1$) et ($z2$) , les valeurs propres associées et l'indice de sévérité statorique.

Vecteur propre principal $z1$	Vecteur propre secondaire $z2$	Valeurs propres associées	Indice de sévérité statorique
+0.2526 ia , -0.7987 ib , +0.5461 ic	-0.7765 ia , +0.1695 ib , +0.6070 ic	$\lambda_{max} = 3.8135$ $\lambda_{min} = 3.0965$	$SSt = 0.1880$

Tableau 3. 4 Les Résultats de simulation de la méthode ACP (cas défaut dans la phase B de 24 spires)

L'indice de sévérité statorique $SSt = 0.1880$ indique un défaut dans l'enroulement statorique.

L'analyse du vecteur propre principal ($z1$) révèle que le défaut localisé sur la phase B, avec une composante dominante de $-0.7987 \cdot ib$ en valeur absolue.

Le vecteur propre secondaire ($z2$) est essentiel pour confirmer la localisation de défaut ITSC dans cette phase.

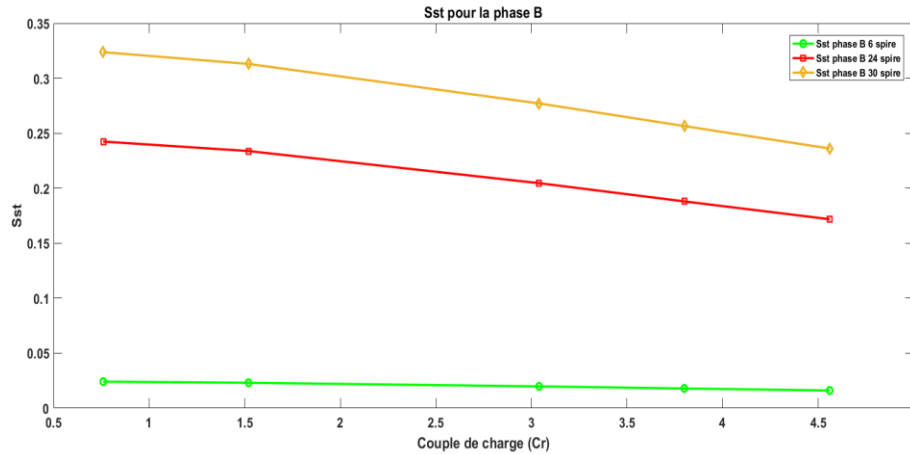


Figure 3. 25 Comparaison des Sst pour la phase B avec différentes spires.

Projection dans le plan des composantes principales (z_1 vs z_2) avec la variation de Cr

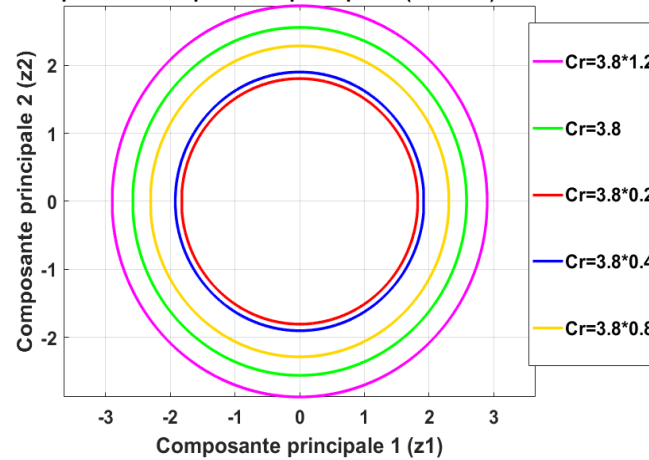


Figure 3. 26 projections dans le plan des composantes principales z_1 en fonction de z_2 dans différentes Cr avec 6 spires.

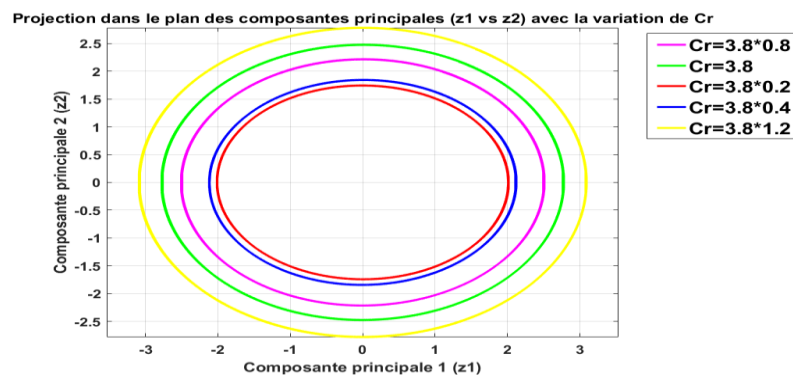


Figure 3. 27 projections dans le plan des composantes principales z_1 en fonction de z_2 dans différentes Cr avec 24 spires.

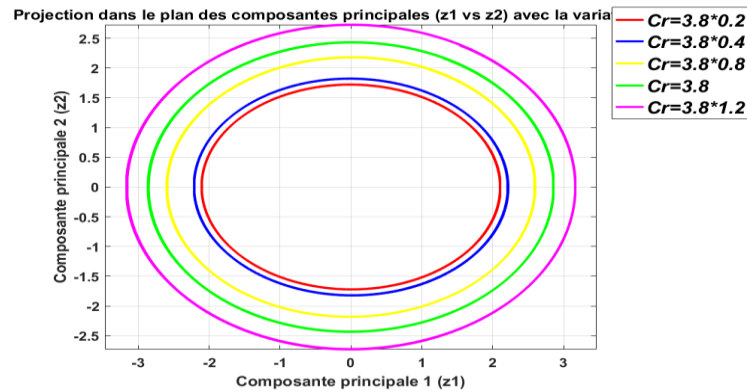


Figure 3. 28 projections dans le plan des composantes principales $z1$ en fonction de $z2$ dans différentes Cr avec 30 spires.

a. Interprétation des graphes de simulation

La figure 3. 25 présente trois graphiques montrant l'évolution des valeurs de l'indice SS_{test} en fonction du couple résistant Cr , avec trois valeurs de défaut ITSC : 6, 24 et 30 spires. Plus le défaut est grave, plus l'indice SS_{test} est élevé. Et cet indice diminue systématiquement avec l'augmentation de couple résistant. Cela valide l'efficacité de la méthode ACP pour le diagnostic de défaut ITSC dans la MAS. Les figures 3. 26, 3. 27 et 3. 28 confirment ce résultat.

3.4.3 Défaut ITSC dans la phase C

Le tableau 3. 5 présente les résultats de l'ACP appliquée aux courants statoriques en présence d'un défaut de 30 spires. Il présente Les vecteurs propres ($z1$) et ($z2$) , les valeurs propres associées et l'indice de sévérité statorique.

Vecteur propre principal $z1$	Vecteur propre secondaire $z2$	Valeurs propres associées	Indice de sévérité statorique
$-0.5366 i_a,$ $-0.2647 i_b,$ $+0.8013 i_c$	$-0.6154 i_a,$ $+0.7724 i_b,$ $-0.1570 i_c$	$\lambda_{max} = 4.0691$ $\lambda_{min} = 2.9975$	$SS_{test} = 0.2633$

Tableau 3. 5 Les Résultats de simulation de la méthode ACP (cas défaut dans la phase C de 30 spires)

La différence entre les deux premières valeurs propres $\lambda_{max} \neq \lambda_{min}$ indique une dissymétrie dans les courants statoriques, typique d'un défaut localisé dans un enroulement statorique.

Dans le vecteur propre principal ($z1$), avec une composante dominante sur la phase c évaluée à $+0,8013 ic$, permet de localiser le défaut ITSC sur la phase C .

Quant au vecteur propre secondaire ($z2$), la composante associée à la phase C est faible, avec une valeur absolue de 0.1570, nettement inférieure à celles des phases A et B . Cette répartition confirme que la phase C est affectée par le court-circuit.

L'indice de sévérité statorique $SSt = 0.2633$ permet de confirmer la présence d'un défaut ITSC.

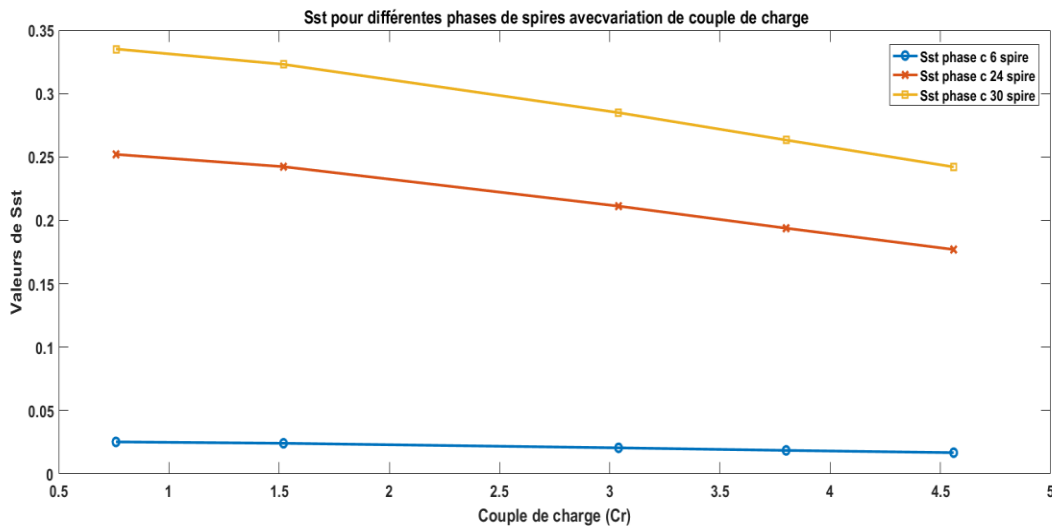


Figure 3. 29 Comparaison des SSt pour la phase C avec différentes spires.

Projection dans le plan des composantes principales ($z1$ vs $z2$) avec la variation de Cr

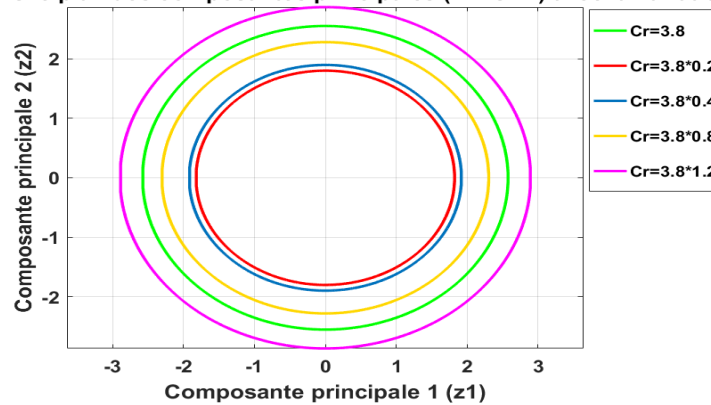


Figure 3. 30. projection dans le plan des composantes principales $z1$ en fonction de $z2$ dans

différentes Cr avec 6 spires.

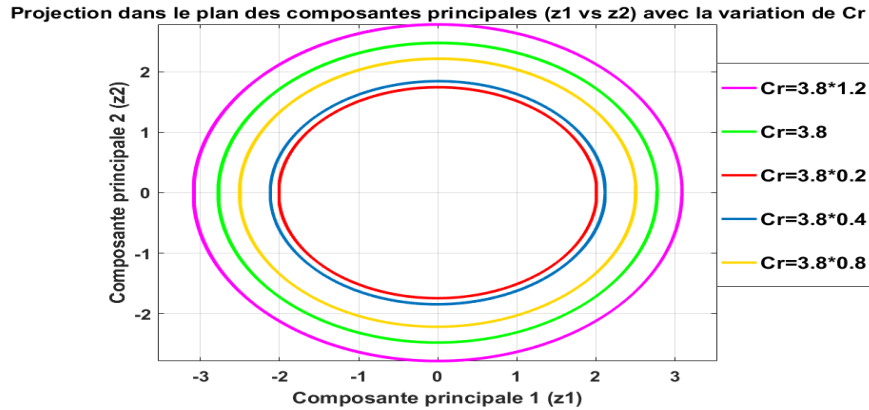


Figure 3. 31 projections dans le plan des composantes principales $z1$ en fonction de $z2$ dans différentes Cr avec 24 spires.

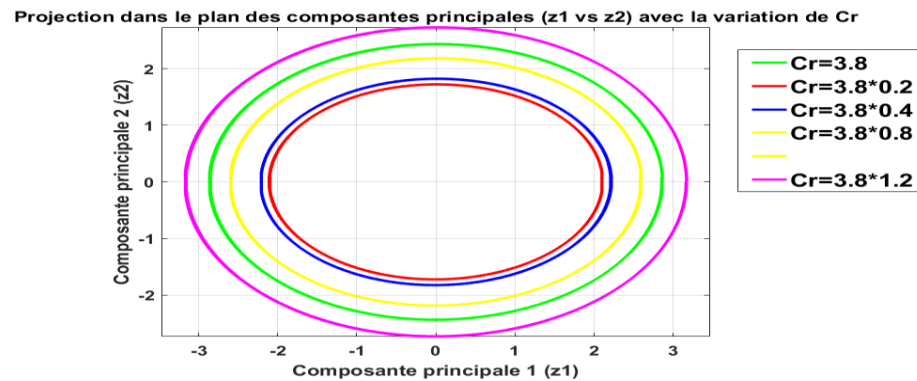


Figure 3. 32 projections dans le plan des composantes principales $z1$ en fonction de $z2$ dans différentes Cr avec 30 spires.

a. Interprétation des graphes de simulation

L'interprétation de la Figure 3. 29 permet de quantifier la sévérité du défaut statorique et d'observer son évolution sous différentes conditions de fonctionnement. SS_t Se révèle être un indicateur sensible et fiable pour le diagnostic des défauts ITSC dans la MAS.

Les Figures 3. 30, 3. 31 et 3. 32 montrent que les projections dans le plan des composantes principales $z1, z2$ obtenues pour différentes valeurs du couple résistant Cr et différents niveaux de défaut ITSC montrent des formes elliptiques. Cette ellipticité, est un indicateur direct de la présence d'un défaut ITSC. Plus le défaut est grave, plus l'ellipse est allongée. L'augmentation du couple résistant accroît l'amplitude de l'ellipse sans modifier sa nature fondamentale.

3.5 *Analyse expérimentale pour différents cas de fonctionnement*

Cette section présente les résultats expérimentaux réalisés à l'aide de la méthode de l'ACP pour différents cas de fonctionnement : un cas sain ainsi que plusieurs cas avec un défaut ITSC de 30 spires. D'abord dans la phase A, ensuite dans la phase B, et finalement dans la phase C. le cas d'un défaut ITSC réparti sur deux phases, soit 30 spires dans la phase C et 24 spires dans la phase B termine cette analyse. L'interprétation des résultats obtenus est fournie.

3.5.1 *Description de banc d'essai*

La figure (3. 33) représente le banc d'essai expérimental utilisé. Il se compose des éléments suivants :

- Une source de tension alternative triphasée variable.
- Un ordinateur équipé de Matlab/Simulink.
- Une carte DSPACE et son module d'extension.
- Une machine asynchrone à stator rebobiné.
- Capteurs de courant, de tension à effet Hall et leurs cartes de conditionnement du signal.

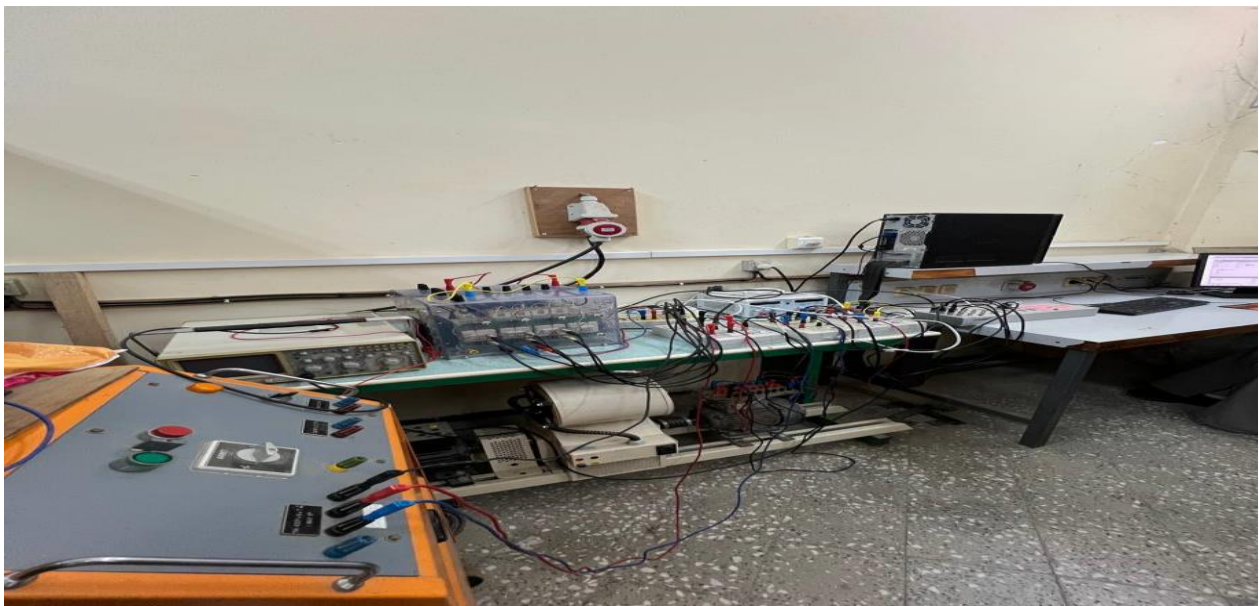


Figure3. 33 présente le banc d'essais utilisé pour les mesures expérimentales sur la MAS

3.5.2 Cas de la machine asynchrone saine

Les résultats obtenus sont présentés dans Tableau 3. 6, facilitant la visualisation des composantes principales, des valeurs propres associées et de l'indice de sévérité statorique.

Vecteur propre principal z1	Vecteur propre Secondaire z2	Valeurs propres associées	Indice de sévérité statorique
$-0.4195 ia,$ $-0.3481 ib,$ $+0.8384 ic$	$-0.6863 ia,$ $+0.7261 ib,$ $-0.0419 ic$	$\lambda_{max} = 1.7064$ $\lambda_{min} = 1.5819$	$SSt = 0.0729$

Tableau 3.6 Les Résultats expérimentaux de la méthode ACP (cas sain)

Les deux valeurs propres associées, $\lambda_{max} = 1.7064$ et $\lambda_{min} = 1.5819$, sont proches, ce qui indique un comportement symétrique de la MAS.

L'indice de sévérité statorique, $SSt = 0.0729$, est très faible, confirmant l'absence de défaut ITSC dans la MAS.

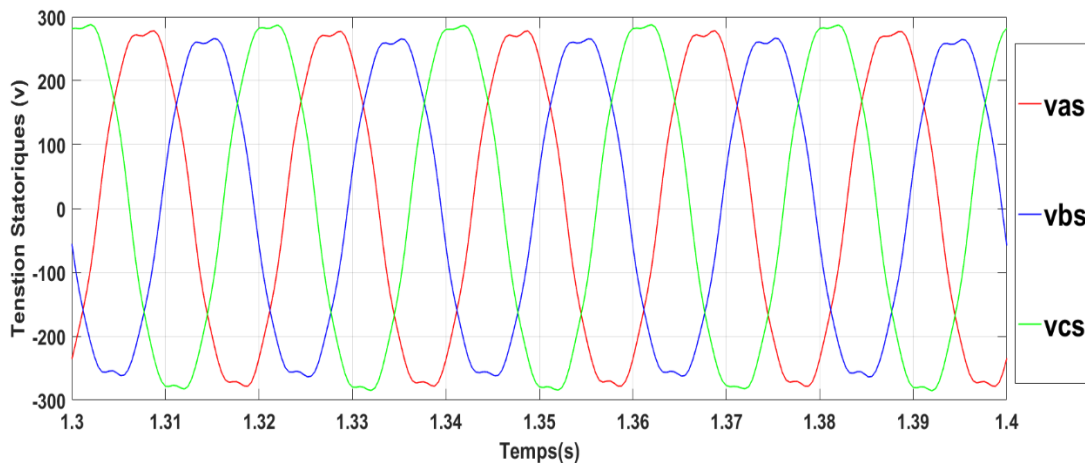


Figure 3. 34 Les Tension Statoriques triphasé v_{as}, v_{bs}, v_{cs} .

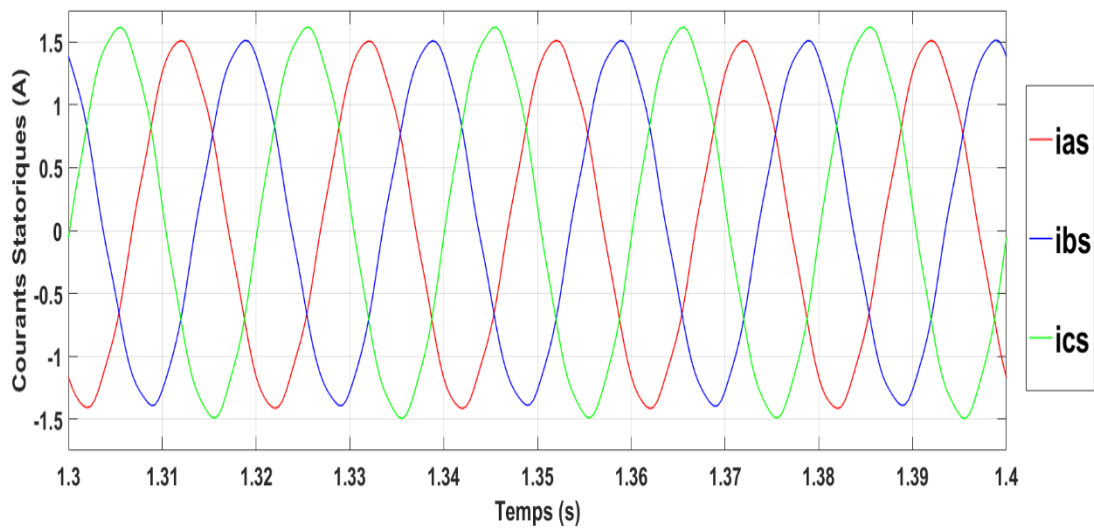


Figure 3. 35 Les Courants Statoriques triphasé *ias*, *ibs*, *ics*.



Figure 3. 36 Projection dans le plan des composantes principales *z1* et *z2*.

a. Interprétation des graphes de simulation

La figure 3. 34 présentent des formes d'onde sinusoïdales régulières et bien équilibrées, avec des amplitudes constantes dans les trois phases, ce qui indique un fonctionnement équilibré de la source de tension. De plus, l'absence de fluctuations anormales, de pics ou de distorsions indique un faible taux d'harmoniques et une absence de défaut ITSC dans l'enroulement statorique.

La figure 3. 35 révèlent des signaux triphasés équilibrés, caractérisés par des amplitudes très similaires et des formes d'onde sinusoïdales régulières. Cela indique une alimentation symétrique. Le déphasage angulaire de 120° entre chaque phase est respecté, assurant une répartition uniforme

de la puissance dans la MAS et confirmant l'absence de défauts au niveau de la source d'alimentation des enroulements statoriques.

Figure 3. 36 illustre les valeurs propres $z1$ et $z2$, issues de l'ACP. Leur proximité indique une répartition équilibrée de l'énergie, comme l'illustre graphiquement la forme circulaire dans le plan défini par ces composantes. Cette forme circulaire est caractéristique d'un MAS saine.

3.5.3 Cas de défaut dans la phase A avec 30 spires

Le tableau 3. 7 présente les vecteurs propres principaux ($z1$) et secondaires ($z2$) , ainsi que les valeurs propres associées et l'indice de sévérité statorique SSt , obtenus expérimentalement pour un défaut ITSC affectant la phase A.

Vecteur propre principal $z1$	Vecteur propre secondaire $z2$	Valeurs propres associées	Indice de sévérité statorique
$-0.8048 ia,$ $+0.4546 ib,$ $+0.3816 ic$	$-0.0210 ia,$ $-0.6643 ib,$ $+0.7471 ic$	$\lambda_{max} = 2.3152$, $\lambda_{min} = 1.4644$	$sst = 0.3675$

Tableau 3.7 Les Résultats expérimentaux de la méthode ACP cas de 30 spires dans la phase A.

Le vecteur propre principal ($z1$) indique que la composante de courant ia domine dans la direction associée à la plus grande variance des données, ce qui est caractéristique d'un déséquilibre causé par un défaut ITSC dans la phase A.

Les composantes du vecteur propre secondaire ($z2$) sont principalement influencées par une opposition entre les phases B et C, tandis que la contribution de la phase A $-0.0210 ia$ est faible. Cela renforce l'idée que le défaut est localisé sur la phase A.

L'indice de sévérité statorique $SSt = 0.3675$ est élevé comparé au cas sain, ce qui indique une sévérité significative du défaut.

Les valeurs propres associées, $\lambda_{max} = 2.3152$ et $\lambda_{min} = 1.4644$, présentent une différence, indiquant une dissymétrie importante dans la distribution énergétique des courants. Ce qui est caractéristique d'un défaut ITSC.

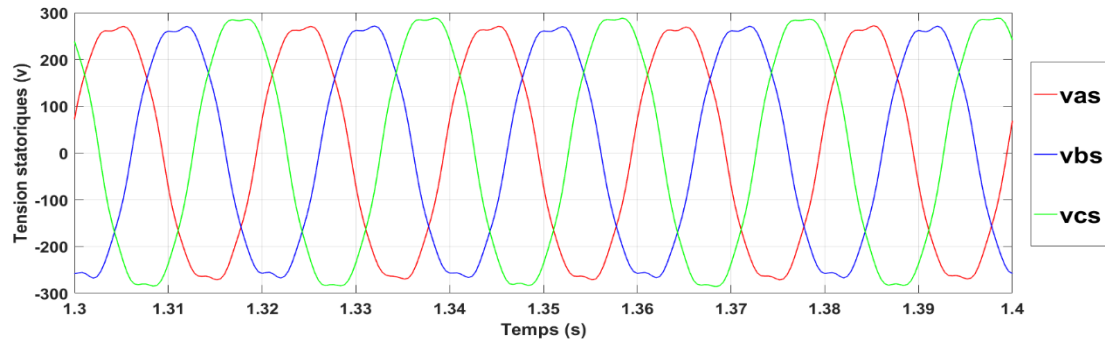


Figure 3. 37 Les Tension Statoriques triphasé *vas, vbs, vcs*.

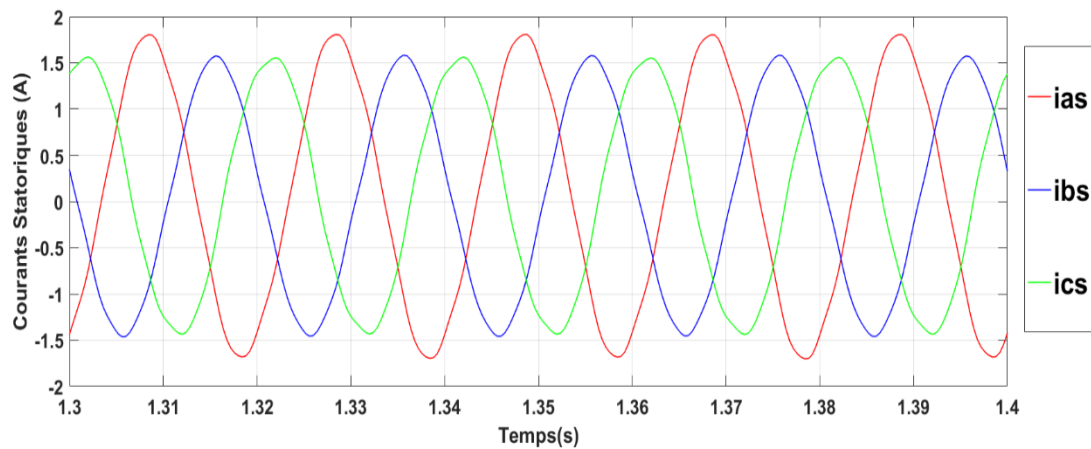


Figure 3. 38 Les Courants Statoriques triphasé *ias, ibs, ics*.

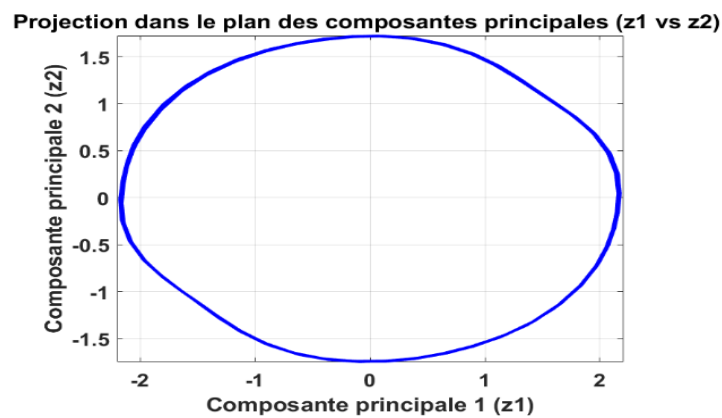


Figure 3. 39.Projection dans le plan des composantes principales *z1 et z2*.

a. Interprétation des graphes de simulation

La Figure 3. 37montre que, malgré le court-circuit partiel sur la phase A, les tensions demeurent globalement sinusoïdales. Cependant, une légère déviation est observée sur la phase concernée, indiquant un déséquilibre électrique causé par le court-circuit. Dans l'ensemble des cas étudié, la tension ne montre pas d'influence significative du défaut ITSC.

Les courants statoriques dans la Figure 3. 38 sont fortement affectés par le court-circuit des spires, en particulier dans la phase A, où l'amplitude et la forme d'onde montrent des déformations significatives. Le profil sinusoïdal idéal est perturbé, et le déphasage de 120° entre les phases devient déséquilibré, ce qui indique une désynchronisation électrique. Ces anomalies sont caractéristiques d'un défaut ITSC dans la phase A

Les valeurs propres $z1$ et $z2$, extraites de l'ACP appliquée aux courants statoriques et illustrées dans la figure 3. 39, présentent une différence marquée, $z1$ dominant $z2$. Cette dissymétrie indique une concentration énergétique dans une direction principale associée au défaut ITSC. Cela se manifeste par une projection elliptique dans le plan des composantes principales, ce qui est typique d'un déséquilibre causé par le court-circuit partiel des spires.

3.5.4 Cas de défaut dans la phase B avec 30 spires

Le tableau 3. 8 présente les vecteurs propres principaux ($z1$) et secondaires ($z2$) , ainsi que les valeurs propres associées et l'indice de sévérité statorique SSt , obtenus expérimentalement pour un défaut ITSC affectant la phase B.

Vecteur propre principal $z1$	Vecteur propre secondaire $z2$	Valeurs propres associées	Indice de sévérité statorique
$+0.2779 ia,$ $-0.7848 ib,$ $+0.5539 ic$	$-0.7551 ia,$ $+0.1780 ib,$ $+0.6310 ic$	$\lambda_{max} = 2.3224$ $, \lambda_{min} = 1.4514$	$SSt = 0.3751$

Tableau 3.8 Les Résultats expérimentaux de la méthode ACP cas de 30 spires dans la phase B.

Dans ce cas, le vecteur propre principal ($z1$) montre une forte contribution négative liée à la phase B. Cette dominance indique une dissymétrie énergétique significative dans cette phase, caractéristique d'un défaut ITSC localisé.

Le vecteur propre secondaire ($z2$) représente la deuxième direction principale. Les contributions majeures proviennent des phases ia et ic , ce qui confirme la localisation du défaut dans la phase B.

Les valeurs propres associées, $\lambda_{max} = 2.3224$ et $\lambda_{min} = 1.4514$, présentent des différences significatives, ce qui indique une répartition déséquilibrée des données dans l'espace des courants. Cette dissymétrie est un indicateur clair d'un déséquilibre causé par le défaut ITSC.

L'indice de sévérité statorique $SS_t = 0.3751$ indique clairement la présence d'un défaut ITSC.

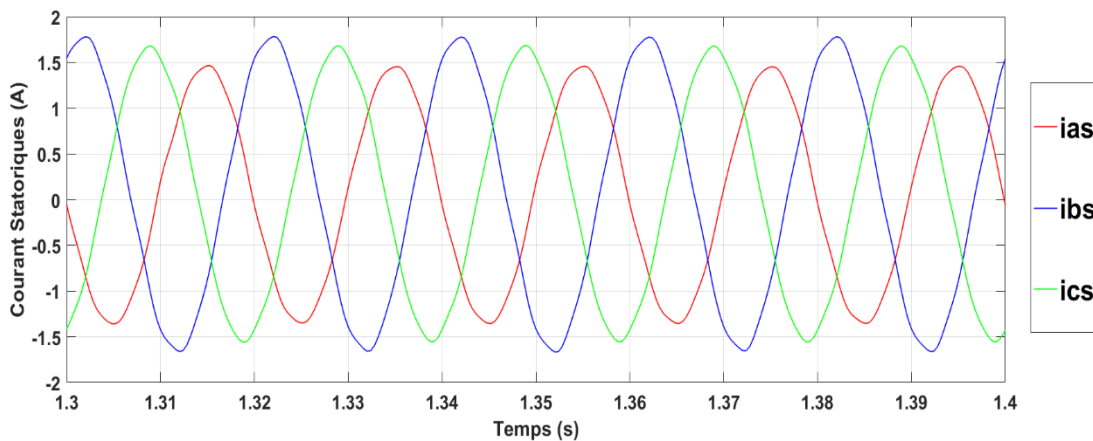


Figure 3. 40 Les Courants Statoriques triphasé ias , ibs , ics .



Figure 3. 41 Projection dans le plan des composantes principales $z1$ et $z2$.

a. Interprétation des graphes de simulation

Dans la figure 3. 40, Les courants statoriques de la phase B montrent des déformations significatives, avec une amplitude par rapport aux phases saines. Le déphasage de 120° entre les phases est également perturbé, indiquant un déséquilibre électrique notable et une surcharge localisée due au court-circuit des spires. Ces caractéristiques confirment l'effet du défaut sur le comportement électrique du MAS.

Les composantes principales z_1 et z_2 présentées dans la figure 3.41, issues de l'ACP révèlent une dissymétrie marquée, avec z_1 largement supérieure à z_2 . Cette dissymétrie énergétique indique la dominance d'une composante principale liée au défaut. Visuellement, cela se traduit par une projection elliptique dans le plan des composantes principales, typique d'un déséquilibre énergétique causé par le court-circuit.

3.5.5 Cas de défaut dans la phase C avec 30 spires

Le tableau 3.9 présente les vecteurs propres principaux (z_1) et secondaires (z_2), ainsi que les valeurs propres associées et l'indice de sévérité statorique SS_t , obtenus expérimentalement pour un défaut ITSC affectant la phase C.

Vecteur propre principal z_1	Vecteur propre secondaire z_2	Valeurs propres associées	Indice de sévérité statorique
$-0.4594 ia,$ $-0.3048 ib,$ $+0.8343 ic$	$+0.6599 ia,$ $-0.7458 ib,$ $+0.0908 ic$	$\lambda_{max} = 2.4685$ $\lambda_{min} = 1.3697$	$SS_t = 0.4451$

Tableau 3.9. Les Résultats expérimentaux de la méthode ACP cas de 30 spires dans la phase C

Le vecteur propre principal ($e^{\rightarrow 1}$) montre une forte dominance positive sur la phase ic , indiquant que la composante de courant ic contribue à la majeure partie de la variance maximale du signal. Cette prédominance reflète une perturbation énergétique localisée sur la phase C, typique d'un défaut ITSC.

Le vecteur propre secondaire représente la deuxième direction principale. Il est caractérisé par une forte opposition entre les phases *ia* et *ib*, tandis que la contribution de la phase *ic* est négligeable. Cette configuration confirme la localisation du défaut.

Les valeurs propres associées, $\lambda_{max} = 2.4685$ et $\lambda_{min} = 1.3697$, montrent une différence significative, ce qui indique une distribution non uniforme de l'énergie des courants statoriques. Cette dissymétrie est un signe clair de déséquilibre électrique provoqué par un défaut ITSC.

L'indice de sévérité statorique $SSt = 0.4451$ élevé, témoignant d'un défaut dans l'enroulement statoriques

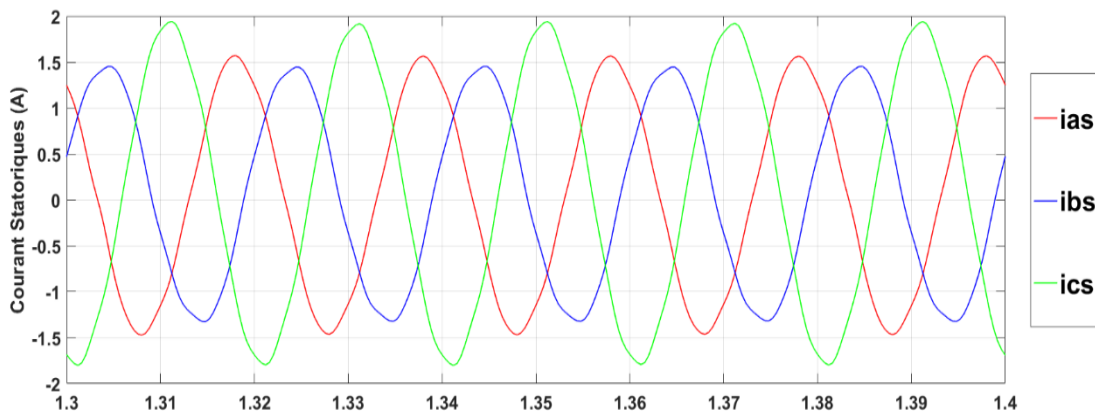


Figure 3.42 Les Courants Statoriques triphasé *ias*, *ibs*, *ics*.



Figure 3.43 Projection dans le plan des composantes principales z_1 et z_2 .

a. Interprétation des graphes de simulation

Dans la figure 3. 42, les courants statoriques de la phase C montrent une dégradation significative de la forme d'onde, avec une amplitude fluctuante et une distorsion prononcée. Le déphasage typique de 120° entre les phases est perturbé, signalant un déséquilibre électrique important dû au court-circuit des spires dans cette phase.

Les composantes principales $z1$ et $z2$ présentées dans la figure 3.43 issues de l'ACP, révèle une dissymétrie notable entre $z1$ et $z2$, $z1$ étant nettement supérieure à $z2$. Cette dissymétrie indique une concentration d'énergie dans la direction dominante liée au défaut ITSC. Cela se manifeste par une projection elliptique dans le plan des composantes principales.

3.5.6 Cas de défaut dans la phase C avec 30 spires et 24 spires dans la phase B

Le tableau 3. 10 présente les vecteurs propres principaux ($z1$) et secondaires ($z2$) , ainsi que les valeurs propres associées et l'indice de sévérité statorique SSt , obtenus expérimentalement pour un défaut ITSC affectant la phase C (30 spires) et la phase b (24 spires).

Vecteur propre principal $z1$	Vecteur propre secondaire $z2$	Valeurs propres associées	Indice de sévérité statorique
$-0.2102 ia,$ $-0.5371 ib,$ $+0.8169 ic$	$+0.7757 ia,$ $-0.6002 ib,$ $-0.1951 ic$	$\lambda_{max} = 2.5974,$ $\lambda_{min} = 1.5375$	$SSt = 0.4081$

Tableau 3.10 Les Résultats expérimentaux de la méthode ACP cas de 30 spires dans la phase C et 24 spires dans la phase B

Le vecteur propre principal ($z1$) révèle une composante dominante $+0.8169 ic$, indiquant que la variance maximale des courants est concentrée dans cette phase, ce qui correspond à la localisation du défaut. La phase B présente une contribution importante $-0.5371 ib$, témoignant également de son implication dans l'anomalie.

Le vecteur propre secondaire (z_2) met en évidence une forte opposition entre les phases ia et $ib + 0.7757$ et -0.6002 , avec une faible contribution dans $-0.1951 ic$, ce qui reflète un déséquilibre marqué entre les phases.

Les valeurs propres $\lambda_{max} = 2.5974$, et $\lambda_{min} = 1.5375$ indiquent la présence d'un défaut. De plus, l'indice de sévérité statorique élevé $SSt = 0.4081$ confirme l'existence d'un défaut ITSC.

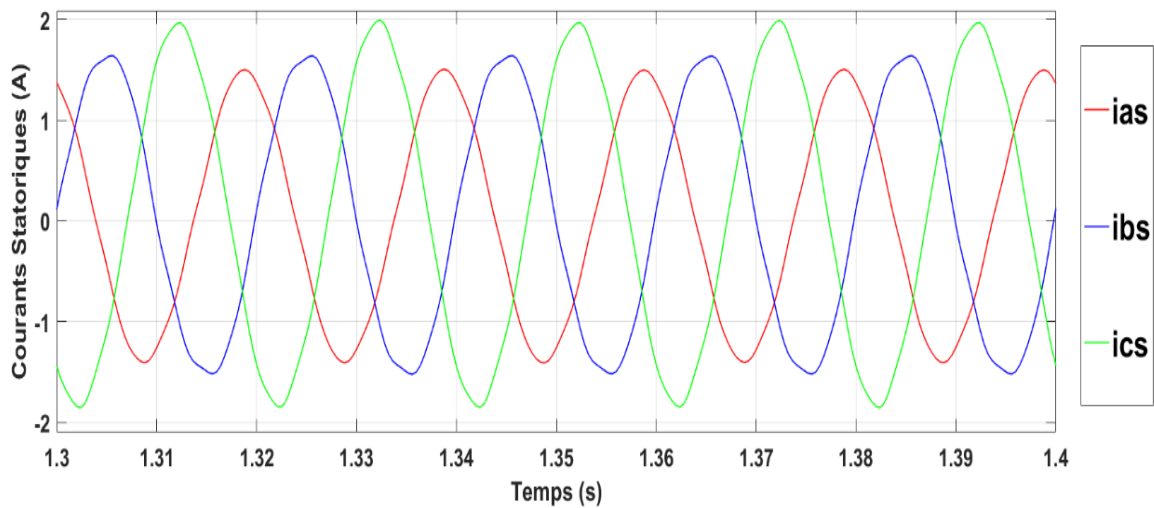


Figure 3. 44. Courants Statoriques triphasé ias , ibs , ics .

Projection dans le plan des composantes principales (z_1 vs z_2)

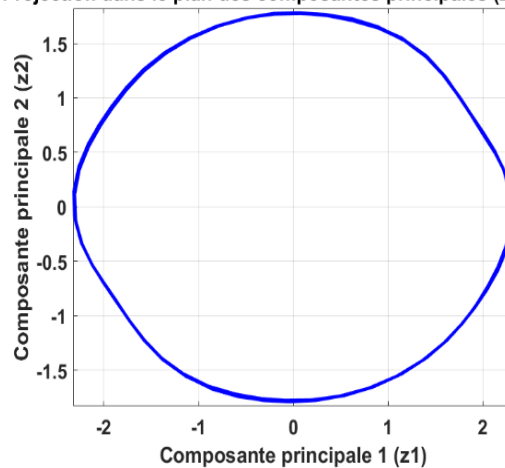


Figure 3. 45. Projection dans le plan des composantes principales z_1 et z_2 .

a. Interprétation des graphes de simulation

La figure 3. 44 illustre que la variation du nombre des spires influence directement à l'amplitude des courants dans les différentes phases. La phase C, avec ses 30 spires, présente une intensité de courant supérieure à celle de la phase B, qui en compte 24spires. Cette différence illustre l'impact du nombre des spires sur l'amplitude des courants statoriques.

La figure 3.45 présente la projection des composantes principales et met en évidence les décalages d'amplitude entre les phases C et B. Ces écarts résultent directement de la différence dans le nombre de spires en court-circuit.

Cette analyse quantitative confirme et enrichit les observations qualitatives tirées des graphes des courants et des projections ACP, renforçant ainsi la capacité à détecter et localiser les défauts dans les phases statoriques.

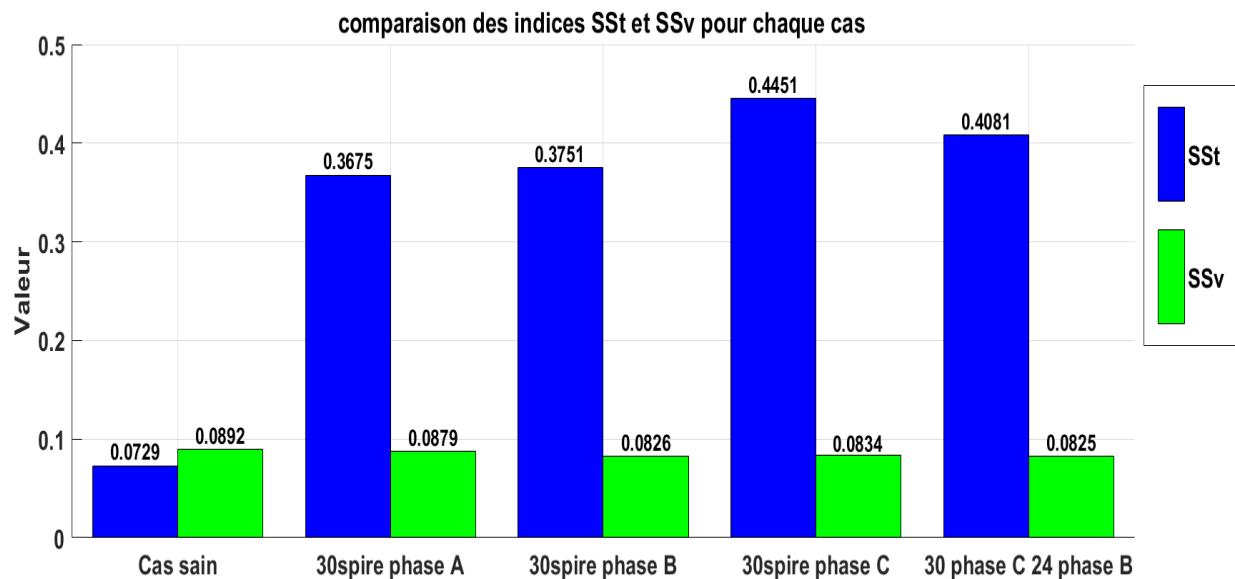


Figure 3. 46 Comparaison des indices SSt , SSv pour différents cas.

La figure 3. 46 présente une comparaison des indices de sévérité SSt et SSv pour différents cas d'étude, incluant le cas sain et plusieurs défauts localisés sur différentes phases. La comparaison révèle que SSt est un indicateur efficace pour distinguer une MAS saine et d'une MAS présentant un défaut ITSC. Tandis que les indices SSv restent relativement faible.

3.6 Conclusion

Ce chapitre a démontré l'efficacité de la méthode ACP pour le diagnostic des défauts ITSC. À travers des simulations et des validations expérimentales, l'ACP a permis d'identifier et localiser le défaut ITSC. L'indice de sévérité statorique s'est avéré un indicateur fiable pour suivre l'évolution du défaut en fonction des conditions de charge. Les résultats confirment la robustesse de cette approche pour une mise en œuvre dans des systèmes de maintenance.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail a exploré l'application de la méthode de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) pour le diagnostic de défaut de la machine asynchrone triphasée ; avec une attention particulière sur son utilisation pour détecter et localiser le défaut ITSC. L'objectif principal étant de développer une méthode fiable et efficace pour diagnostiquer ce défaut, et ainsi améliorer la maintenance de la MAS.

Dans ce contexte, on a présenté, dans le Chapitre 1, la modélisation de la MAS saine, en détaillant ses composants, son fonctionnement et les défauts courants pouvant l'affecter. Cette modélisation, basée sur la transformation de Park, a permis de comprendre le comportement électromagnétique et dynamique de la machine, fournissant ainsi une base pour l'analyse des défauts.

Dans le deuxième Chapitre, est présentée la méthode ACP, qui permet de réduire la dimensionnalité des données tout en préservant l'essentiel de l'information, facilitant ainsi une analyse plus simplifiée et précise des résultats.

Dans le Chapitre 3, l'ACP a été appliquée au diagnostic des défauts ITSC dans la MAS. Les simulations réalisées et les analyses expérimentales ont montré que l'ACP est un outil efficace pour la détection, la localisation et la quantification des défauts statoriques. L'indice de sévérité statorique, calculé à partir des composantes principales, s'est avéré être un indicateur fiable pour évaluer la gravité des défauts en fonction des variations du couple résistant. Ces résultats ont confirmé l'efficacité de l'ACP comme méthode de diagnostic dans un cadre de maintenance.

Les perspectives d'amélioration :

Utiliser la méthode avec le défaut de barres cassées de rotor et utiliser dans les machines synchrones.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] **RS Components** Moteur asynchrone : <https://fr.rs-online.com/web/content/blog-discovery/maintenance/preserver-performances-moteurs-asynchrones> visiter le 20/03/2025
- [2] **Belaid Ait Izem** : « Calcul d'un moteur asynchrone monophasé à condensateur transformer d'un moteur Asynchrone triphasé », Mémoire master, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2014
- [3] **J.Lesenne, F.Notelet, G. Séguier** introduction à l'électrotechnique approfondie. Université des sciences et techniques de Lille. Technique et documentation .1981.
- [4] **Atlanta drive France**, <https://www.atlanta-drive.fr/7-20/actualites/sesame-comment-fonctionne-un-moteur-asynchrone-typologie-et-utilisation>. 2008
- [5] **Ghelis Aymen** :« Diagnostic et pronostic du défaut de rupture d'isolement dans les machines électriques », Mémoire de master, Université 8 Mai 1945-Guelma 2022.
- [6] **J.Lesenne, F.Notelet, G. Séguier** introduction à l'électrotechnique approfondie. Université des sciences et techniques de Lille. Technique et documentation .1981.
- [7] **Rachid Chahrazad** : « Analyse par la méthode des éléments finis d'un moteur asynchrone alimenté par un circuit externe », Mémoire de Master, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA DE BOUMERDES. 2023
- [8] **M. Khov**, « Surveillance et Diagnostic des Machines Synchrones à aimants Permanents, Détection des Court-circuit par suivi paramétrique », thèse de doctorat, Université de Toulouse, France, Décembre 2009. Séguier
- [9] **Bouchareb Khaled** : « étude, Modélisation et simulation d'une machine asynchrone », Mémoire de master, Université KASDI Merbah Ouargla. 2020
- [10] **Loucif Mourad**, "Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur", Présentée pour l'obtention du grade de DOCTORAT 3ème Cycle, Université Abou bekr Belkaid – Tlemcen – 2016.
- [11] **J.Lesenne, F.Notelet, G. Séguier** introduction à l'électrotechnique approfondie. Université des sciences et techniques de Lille. Technique et documentation .1981.
- [12] **Seddiki Aissa, Benalikhodja Mohamed Oussama** " Modélisation et simulation de la machine asynchrone triphasée avec barres rotoriques cassées ". Mémoire de Master, Université SAAD DAHLAB BLIDA. 2022.
- [13] **Said Watik et Lamri chahinez**, " Modélisation de la machine asynchrone asymétrique et en présence de défauts ". Mémoire de Master, Université SAAD DAHLAB de BLIDA. 2018.

Bibliographie

- [14] <https://www.turing.com/kb/guide-to-principal-component-analysis> visite le 17 mai 2025.
- [15] <https://builtin.com/data-science/step-step-explanation-principal-component-analysis>visite le 19 mai 2025.
- [16] <https://www.ibm.com/sa-ar/think/topics/principal-component-analysis>visite le 20 mai 2025.
- [17] **Mohamed-Faouzi Harkat.** Détection et localisation de défauts par analyse en composantes principales. 2017
- [18] **Bekiri Walid et Sid Bouchra :** « Diagnostic de Fonctionnement par Analyse en Composantes Principales Multi-Echelles », Mémoire de master 2, Université KASDI Merbah Ouargla. 2019
- [19] **Bouzidi, A :** Diagnostic des défauts des moteurs asynchrones par ACP et réseaux de neurones. Université de Sidi Bel Abbés.2018
- [20] **Jolliffe, I.T.** (2002). Principal Component Analysis, Springer.
- [21] **Article Energy Conversion and Management** 51 (2010) 901–907, journal home page : www.elsevier.com/locate/enconman ;
- [22] **Benbouzid, M.E.H. (2000).** A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 47(5), 984–993.

Annexes

Annexe : paramètres de la MAS

$$P = 550W;$$

$$\Omega = 1380tr/min;$$

$$is = 1.6A;$$

$$Rr = 13.3072Ohm; Rs = 13.6324Ohm;$$

$$J = 0.00177;$$

$$fv = 0.00064377;$$

$$p = 2;$$

$$Lis = 0.0388H; Lir = 0.0388H ; Lm = 0.6380H ; Lr = 0.67679275H;$$

$$Ls = 0.67679275H;$$