



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Automatique
Automatique et informatique industrielle

Réf. :

Présenté par :
Lamsadfa Youssouf

***Diagnostic des défauts de la machine
asynchrone par La Méthode d'analyse en
composantes principales (ACP)***

Jury :

Mr.	MASSOUDI Abdelhamid	MCB	Université de Biskra	Président
M.	RECHID Naima	MAA	Université de Biskra	Rapporteur
Mr.	ZITOUNI Othman	MCB	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2019/2020

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Automatique
Option : Automatique et informatique industrielle

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

*Diagnostic des défauts de la machine
asynchrone par La Méthode d'analyse en
composantes principales (ACP)*

Présenté par :

Lamsadfa Youssouf

Proposé et dirigé par :

M. RECHID Naima

Promotion :Septembre 2020

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Electrique

Filière : Automatique

Option : Automatique et informatique industrielle

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

*Diagnostic des défauts de la machine
asynchrone par La Méthode d'analyse en
composantes principales (ACP)*

Présenté par :

Lamsadfa Youssouf

Avis favorable de l'encadreur :

M. RECHID Naima

Avis favorable du Président du Jury

Mr.Massoudi Abdelhamid

Cachet et signature

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Automatique
Option : Automatique et informatique industrielle

Thème :

Diagnostic des défauts de la machine asynchrone par La Méthode analyse en composantes principales (ACP)

Présenté par : Lamsadfa Youssouf

Proposé par : M. RECHID Naima

RESUMES (Français et Arabe)

Résumé

Ce travail s'inscrit dans la thématique du diagnostic des défauts de la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil. Le choix de la machine est justifié par le succès grandissant qu'elle a suscité, notamment, dans les entraînements électriques. Il est donc important de développer des outils de diagnostic pour détecter de manière précoce les défauts pouvant apparaître dans ces machines.

Notre étude s'appuie sur une méthode permettant d'identifier les formes de manière mathématique appartenant à la section d'analyse des données appelée méthode (analyse en composantes principales), qui consiste à convertir un certain nombre de variables liées en un plus petit nombre de variables non corrélées. Les variables résultant du processus de conversion sont appelées les principaux composés (ou composants ou axes). La valeur ajoutée du processus est de faciliter l'interprétation de données complexes, en permettant au chercheur et au

statisticien d'obtenir une compatibilité optimale entre la réduction du nombre de variables décrivant les données et la perte de l'information d'origine (variance) résultant de la réduction des dimensions d'origine.

Cela nous permet donc d'appliquer ces observations pour nous donner des formes dans les différents modes de fonctionnement connus dans le dispositif, qu'ils soient sains ou endommagés, ces défauts se situant au niveau de la partie rotorique et de la partie statorique de la machine.

Des procédures de mesure basées sur le modèle d'analyse des composants principaux ont été utilisées pour détecter les défauts, et cet algorithme a démontré l'efficacité de cette application pour identifier des modèles dans le diagnostic des machines synchrones.

Mots clés : Machine asynchrone à cage d'écureuil - diagnostic – défauts -. analyse composants principales-statorique-rotorique.

المخلص

تعتبر الآلات اللامتزامنة من الأجهزة و المحركات الأكثر انتشارا في شتي المجالات خاصة الصناعية منها. وهذا راجع أساسا لمتانتها وكثافتها وتكلفة تصنيعها وصيانتها ومراقبتها التي تسمح بضمان ثبات منشآتها ولذلك فمن المهم تطوير و تحسين أدوات التشخيص للكشف المبكر عن الأعطال التي قد تحدث في هذه الآلات , و لقد أقيمت الكثير من الدراسات في هذا المجال للوصول لأحسن النتيجة التي تمكننا من تشخيص جميع الأعطال الممكنة. وتعتمد دراستنا على طريقة تسمح لنا بالتعرف على الأشكال بطريقة رياضية تنتمي إلى شعبة تحليل البيانات تسمى بطريقة (تحليل المكونات الرئيسية) و التي تتمثل في تحويل عدد من المتغيرات المترابطة إلى عدد أقل من المتغيرات غير المترابطة. المتغيرات الناتجة عن عملية التحويل تسمى بالمركبات (أو المكونات أو المحاور) الرئيسية. القيمة المضافة للعملية هي تسهيل تأويل المعطيات المعقدة، عبر تمكين الباحث والإحصائي من تحقيق أمثل توافق بين التقليل من عدد المتغيرات الواصفة للمعطيات، و فقدان المعلومة الأصلية (التباين) الناتج عن اختزال الأبعاد الأصلية. بحيث تسمح لنا بتطبيق تلك الملاحظات لتعطينا أشكال باختلاف أنماط التشغيل المعروفة في الجهاز سواء كانت سليمة أو بها عطب هذه الأعطاب تكون على مستوى الجزء الدوار والجزء الثابت من الآلة. وقد استخدمت إجراءات القياس استنادا إلى نموذج تحليل المكونات الرئيسية للكشف عن العيوب وقد أظهرت هذه الخوارزمية فعالية هذا التطبيق لتعرف على الأنماط في التشخيص عن الآلات المتزامنة

الكلمات المفتاحية: الآلة المتزامنة ذات القفص السنجابي- التشخيص- الأعطاب - تحليل المكونات الرئيسية-الساكن-الدوار.

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 mes profondes reconnaissances et mes gratitudes à mon encadreur Melle. **Rechid Naima**, pour son orientation et ses précieux conseils durant l'élaboration de ce travail.*

*J'adresse de sincères remerciements à Mr. **Massoudi Abdelhamid** et Mr. **Zitouni Othmane** pour m'avoir fait l'honneur de participer au jury de soutenance.*

*Des remerciements pour toute la noble famille d'enseignant du département de **Génie Electrique** de l'université **Mohamed Khider Biskra** (Faculté des Sciences et Technologie).*

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.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

*A mes très chers parents qui m'ont guidé
Durant les moments les plus pénibles de ce
long chemin*

*Ma mère et mon père qui ont sacrifié toute
leur vie afin de me voir devenir ce que je suis
Merci mes parents.*

*A mes frères et sœurs A ma petite ange
Amira. A mes chers amis, chacun en son nom
et tous les amis de ma vie.*

*A tous ceux qui m'aiment et tous ceux que
j'aime.*

LAMSADF YOUSOUF



Liste des tableaux

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 1

tableaux	Le nom de tableaux	Page
Tableau 1.1	Défauts des machines électriques selon leurs origines	5

Chapitre 2

tableaux	Le nom de tableaux	Page
Tableau 2.1	Valeurs propres et Pourcentages de la variance totale	53

Chapitre 3

tableaux	Le nom de tableaux	Page
Tableau.3.1	Les différents modes de fonctionnement	61
Tableau.3.2	conséquences et pourcentage de la variance totale dans domaine temporelle	77
Tableau.3.2	conséquences et pourcentage de la variance totale dans domaine fréquentiel	81



Liste des figures

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1

Figure	Le nom de la Figure	Page
Fig.1.1	Évolution du pourcentage des défauts pendant une décennie	7
Fig.1.2	Machine asynchrone triphasé	8
Fig.1.3	Photo d'un stator d'une machine asynchrone	9
Fig.1.4	Vue schématique en perspective du stator	9
Fig.1.5	Photo d'un rotor d'une machine asynchrone	10
Fig.1.6	Vue schématique en perspective du rotor	10
Fig.1.7	organigramme à Défauts machine asynchrone	12
Fig.1.8	Court-circuit entre spires du stator	13
Fig.1.9	cassure de barres au rotor	14
Fig.1.10	Types d'excentricité : (a) statique ; (b) dynamique ; (c) mixte	15
Fig.1.11	Défaut d'un rotor à cage d'écureuil : (a) rupture de barres ; (b) rupture d'anneau de court-circuit	15
Fig.1.12	Représentation des enroulements d'une MAS triphasée saine	17
Fig.1.13	Principe de la transformation de Park	21
Fig.1.14	Modèle de la machine saine dans le repère de Park lié au rotor	22
Fig.1.15	Modèle général de court-circuit dans le repère de Park	24
Fig.1.16	Modèle de défaut rotorique de la MAS	25
Fig.1.17	Modèle de défaut simultané stator/rotor de la MAS	27

Chapitre 2

Figure	Le nom de la Figure	Page
Fig.2.1	Extrait de l'article de Pearson de 1901 : la recherche de la « droite du meilleur ajustement ».	30
Fig.2.2	Tracé de 50 observations sur deux variables x_1, x_2	31
Fig.2.3	Tracé des 50 observations de la Fig.2.2 par rapport à leur PCs z_1, z_1	32
Fig.2.4	nuage des individus dans l'espace affine	34
Fig.2.5	Cercle corrélations d'une ACP normée des	36
Fig.2.6	Nuage de points	37
Fig.2.7	Un dessin représentatif de Qualité de représentation de l'individu i sur l'axe k	42
Fig.2.8	représentation de chaque individu	44
Fig.2.9	Le cercle des corrélations	45
Fig.2.10	Identification des individus de chaque catégorie de la variable	46
Fig.2.11	Représentation de chaque catégorie par son centre de gravité.	46
Fig.2.12	Représentation des points de la matrice (M)	48
Fig.2.13	Représentation des points de la matrice (X)	50
Fig.2.14	Représentation des points de la matrice (X) et (M)	51
Fig.2.15	Représentation des points de la matrice (Y)	55
Fig.2.16	Représentation des points de la matrice (Y1)	56

Chapitre 3

Figure	Le nom de la Figure	Page
Fig.3.1	Moteur accouplé à sa charge	59
Fig.3.2	Système d'acquisition des signaux	60
Fig.3.3	Représentation schématique de modes de fonctionnement a) dépendant du niveau de charge b) indépendant du niveau de charge	62
Fig.3.4	Courants de ligne de la MAS en fonctionnement sain avec (sans charge)	64
Fig.3.5	Courants de ligne de la MAS en fonctionnement sain avec (20% charge)	64
Fig.3.6	Courants de ligne de la MAS en fonctionnement sain avec (100% charge)	65
Fig.3.7	Effet d'un défaut de 12.5% de spires court-circuitées sur le déphasage entre les courants (avec 10% charge)	65
Fig.3.8	Effet d'un défaut de 12.5% de spires court-circuitées sur le déphasage entre les courants (avec 20% charge)	66
Fig.3.9	Effet d'un défaut de 12.5% de spires court-circuitées sur le déphasage entre les courants (avec 40% charge)	66
Fig.3.10	Courant satiriques en fonction de la sévérité du défaut rotorique(avec sans charge) .	67
Fig.3.11	Courant satiriques en fonction de la sévérité du défaut rotorique(avec 20% charge) .	67
Fig.3.12	Courant satiriques en fonction de la sévérité du défaut rotorique(avec 100% charge) .	68
Fig.3.13	Courants statorique de la MAS en présence de défaut simultané stator/ rotor (ia_cc et ia_bc avec 20% charge)	68

Liste des figures

Fig.3.14	Courants statorique de la MAS en présence de défaut simultané stator/ rotor (ib_cc et ib_bc avec 20% charge)	69
Fig.3.15	Courants statorique de la MAS en présence de défaut simultané stator/ rotor (ic_cc et ic_bc avec 20% charge)	69
Fig.3.16	Spectre du courant de la MSA sain sans charge	70
Fig.3.17	Spectre du courant de la MSA avec défaut statorique sans charge	71
Fig.3.18	Spectre du courant de la MSA avec défaut rotorique sans charge	71
Fig.3.19	Résumé de l'ACP	73
Fig.3.20	Position des classes pour l'ensemble de teste entre MAS sain avec défaut stator Dans la dimension temporelle	75
Fig.3.21	Position des classes pour l'ensemble de teste entre MAS sain avec défaut rotor Dans la dimension temporelle	75
Fig.3.22	Position des classes pour l'ensemble de teste entre MAS s avec défaut stator/rotor Dans la dimension temporelle	76
Fig.3.23	Position des classes pour l'ensemble de teste entre MAS Dans la dimension temporelle	76
Fig.3.24	Une illustration du pourcentage d'erreur dans domaine temporelle	78
Fig.3.25	Nuage de points en utilisant les méthodes FFT entre MAS sain avec défaut stator	79
Fig.3.26	Nuage de points en utilisant les méthodes FFT entre MAS sain avec défaut rotor	79
Fig.3.27	Nuage de points en utilisant les méthodes FFT entre MAS avec défaut stator / rotor	80
Fig.3.28	Nuage de points en utilisant les méthodes FFT entre MAS avec tous les points	80
Fig.3.29	Une illustration du pourcentage d'erreur dans domaine fréquentiel	81



Liste des symboles

LISTE DES SYMBOLES

Chapitre 1

$\mathbf{a}_r, \mathbf{b}_r, \mathbf{c}_r$	Enroulement triphasé du rotor
$\mathbf{a}_s, \mathbf{b}_s, \mathbf{c}_s$	Enroulement triphasé du stator
C_{charge}	Couple de charge
C_{em}	Couple électromagnétique
g	glissement
i_{dqm}	Composantes d et q du courant magnétisant
i_{dqr}	Composantes d et q du courant rotorique
i_{dqs}	Composantes d et q du courant statorique
i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}	Courants rotoriques suivant les axes a_r, b_r, c_r
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	Courants statoriques suivant les axes a_s, b_s, c_s
J	Moment d'inertie des parties tournantes
L_m	Inductance magnétisante
L_s, L_r	Inductance propre statorique et rotorique
L_{prx}, L_{frx}	Inductance principale rotorique et inductance de fuite rotorique
L_{psx}, L_{fsx}	Inductance principale statorique et inductance de fuite statorique
L_{rx}	Inductance propre d'une phase rotorique
L_{rxy}	Mutuelle inductance entre deux phases rotorique
L_{sx}	Inductance propre d'une phase statorique
L_{sxy}	Mutuelle inductance entre deux phases statorique
$M_{s_x r_y}$	Inductance mutuelle entre une phase statorique x et une
P	Nombre de paires de pôles
$P(\theta)$	Matrice de rotation d'angle θ
$Q(\theta_{cck})$	Matrice situant l'angle du bobinage en court-circuit

Liste des symboles

$Q(\theta_0)$	Matrice situant l'angle de la barre cassée au rotor
R_r	Résistance rotorique
R_s	Résistance statorique
u_{ra}, u_{rb}, u_{rc}	Tensions rotoriques suivant les axes a_r, b_r, c_r
u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}	Tensions statoriques suivant les axes a_s, b_s, c_s
Φ_{dqr}	Composante d et q du flux rotorique
Φ_{dqs}	Composante d et q du flux statorique
$\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}$	Flux statoriques suivant les axes a_s, b_s, c_s
$\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}$	Flux rotoriques suivant les axes a_r, b_r, c_r
ω_{ref}	Vitesse angulaire du repère de référence
ω	Pulsation mécanique
Ω_m	Vitesse angulaire mécanique du rotor
η_{cck}	Pourcentage de spires court-circuitées dans la phase k
η_0	Pourcentage de barres cassées
θ	angle électrique de la position du rotor

Chapitre 2

ACP	Analyse principales composantes
PCs	Des ordinateurs
\mathcal{R}^n	Groupe de nombres réels
Ui	nombre les élèves
Vj	nombre les notes
K	réalisations conjointes de variables.
σ_{Xn}	un écart type
P_i	Différentes variables de poids
I	matrice identité.

Liste des symboles

g	Le centre de gravité du nuage de points
\mathcal{R}^K	dont toutes les coordonnées sont égales à 1
r	la corrélation
Var	Variance
\vec{X}	La matrice de covariance d'un vecteur de p variables aléatoires
Vcj	Coefficient de corrélation expérimentale entre l'ancienne variable
Zk	Le coefficient de corrélation expérimental entre la nouvelle variable
qlt_k	Qualité de représentation de l'individu i sur l'axe k
c_{ik}, θ_{ik}, e_i	L'angle formé entre un point et sa projection sur l'axe



Sommaire

Sommaire

Remerciement

Dédicaces

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des symboles

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 – Présentation de la machine asynchrone: défauts et modélisations.....	3
1.1 Introduction	4
1.2 Notions fondamentales du Diagnostic de défauts.....	4
1.2.1. La surveillance	4
1.2.2. La détection	4
1.2.3. Le diagnostic	4
1.2.4. Le défaut.....	4
1.2.5. Une défaillance	4
1.3 Défauts des machines électriques tournantes.....	4
1.4 Constitution de la machine asynchron.....	8
1.4.1 Le stator	9
1.4.2 Le Rotor.....	10
1.4.3 Les Organes mécaniques.....	11
1.5 Les défauts de machine asynchrone.....	11
1.6 Modélisations de la MAS.....	16

Sommaire

1.6.1	Modélisation du fonctionnement sain de La machine.....	16
1.6.1.1	Schéma de la MAS.....	16
1.6.1.2	Modèle triphasé.....	17
1.6.1.3	Equations mécaniques de la machine.....	19
1.6.1.4	Transformation biphasé de Park.....	20
1.6.1.5	Modèle de la machine dans le repère de Park.....	22
1.6.2	Modélisation de la machine en présence de défaut.....	23
1.6.2.1	Modèle de la MAS avec défaut statorique	23
1.6.2.2	Modèle de la MAS avec défaut rotorique	24
1.6.2.3	Modèle de la MAS avec défaut simultané stator /rotor.....	26
1.7	Conclusion	27
	Chapitre 2 – analyse en composantes principales (ACP).....	28
2.1	Introduction	29
2.2	Histoire et applications.....	29
2.3	Définition et dérivation des principaux composants.....	30
2.4	Tableau de données.....	32
2.5	Échantillon.....	34
2.6	Poids.....	34
2.7	Transformations de l'échantillon.....	35

Sommaire

2.8 corrélations.....	36
2.9 Covariance.....	37
2.10 Variance.....	37
2.10.1 Formule de Variance.....	38
2.11 matrice de variance-covariance.....	39
2.11.1 Propriétés de la covariance.....	40
2.12 Valeurs Propres.....	41
2.13 Qualité de représentation.....	41
2.13.1 Qualité de représentation de l'individu i sur l'axe k.....	42
2.13.2 Qualité de représentation de la variable j sur l'axe k.....	43
2.13.3 Qualité s de représentation sur un plan factoriel.....	43
2.14 Composantes principales.....	43
2.15 Représentation des individus	44
2.16 Représentation des variables a l'aide coefficient de corrélation	45
2.17 Interprétation externe : variables et individus supplémentaires (illustratifs).....	45
2.17.1 Variables.....	45
2.18 Exemple.....	47
2.19 Conclusion.....	56

Chapitre 3– Application des méthodes analyse en composantes principales (ACP) au diagnostic de la machine asynchrone.....	57
3.1 Introduction.....	58
3.2 Description du procédé.....	58
3.2.1 Présentation du banc moteur	58
3.2.2 Acquisitions des données	59
3.3 Présentation de la base de signaux utilisée.....	60
3.3.1 Elaboration d’une base de signaux.....	60
3.3.2 Normalisation des données.....	61
3.4 Extraction des paramètres	63
3.4.1 Paramètre dans le domaine temporel	63
3.4.2 Paramètre dans le domaine fréquentiel	70
3.5 Sélection des paramètres par le critère d’ACP.....	72
3.6 Application de L’ACP dans le traitement d’ défaut MAS.....	74
3.7 Résultats expérimentaux et interprétations.....	74
3.8 Conclusion.....	82
Conclusion et perspectives	83
Bibliographie.....	86



Introduction Générale

Introduction générale

La machine asynchrone a longtemps été fortement concurrencée par la machine synchrone dans les domaines de forte puissance, jusqu'à l'avènement de l'électronique de puissance. Du fait de sa simplicité de construction, d'utilisation et d'entretien, de sa robustesse et son faible prix, la machine asynchrone est aujourd'hui très couramment utilisée comme moteur dans une gamme de puissance allant de quelques centaines de watts à plusieurs milliers de kilowatts. La machine asynchrone est utilisée dans de nombreuses applications, notamment dans le transport (métro, trains, propulsion des navires, automobiles électriques), dans l'industrie. Un certain nombre de contraintes de différentes natures (thermiques, électriques, mécaniques et d'environnement) peuvent atténuer la durée de vie de la machine en faisant apparaître des pannes dans le stator et le rotor ou autres. Ces pannes occasionnent des pertes économiques considérables. Il est important donc de mettre en œuvre des systèmes de surveillance et de classification des défauts.

La détection de défauts dans les machines électriques a fait l'objet de recherches et de réalisations industrielles depuis de nombreuses années. L'introduction des techniques de l'analyse en composantes principales (ACP) a marqué le début d'une nouvelle ère dans la littérature de traitement des données de grande taille.

Il s'agit de méthodes développées récemment à partir des années 1901. Le principal intérêt de ces méthodes est de réduire la dimension de l'ensemble de données qui se composent d'un grand nombre de variables liées, tout en maintenant la plus grande variabilité possible dans l'ensemble de données. Ceci est accompli en passant à un nouvel ensemble de variables, les composantes principales, qui ne sont pas corrélées, et qui sont disposés de sorte que les premiers éléments conservent la même variance trouvée dans toutes les variables d'origine.

La méthode d'ACP est utilisée pour la détection de problèmes mécaniques, des ruptures de barres au rotor et des courts-circuits au stator des machines asynchrones.

Afin de pallier ces problèmes d'analyse, on propose une nouvelle méthode de diagnostic des défauts au stator, c'est l'analyse en composantes principales qui nécessite la connaissance des données à l'état temporels et fréquentiels de la machine à savoir le fonctionnement à l'état sain et les états des défauts statorique/rotorique.

C'est dans cette perspective que ce travail est orienté. On s'intéresse, en effet aux techniques et méthodes de diagnostic des défauts du moteur asynchrone, en l'occurrence de défauts au niveau du rotor et du stator.

Ce travail s'articule autour de trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous décrivons la machine asynchrone et rappelons les principaux défauts qui peuvent apparaître dans celle-ci et leur origines. Nous présentons la modélisation de machine asynchrone en mode de fonctionnement sain et avec défauts statoriques et rotoriques.

Le deuxième chapitre, nous présenterons la méthode de l'analyse en composantes principales (ACP). Elle a pour objectif de réduire la dimension de l'ensemble de données qui se composent d'un grand nombre de variables liées, tout en maintenant la plus grande variabilité possible dans l'ensemble de données. Ceci est accompli en passant à un nouvel ensemble de variables, les composantes principales, qui ne sont pas corrélées, et qui sont disposés de sorte que les premiers éléments conservent la même variance trouvée dans toutes les variables d'origine.

Le troisième chapitre est consacré à l'application du système de diagnostic aux machines asynchrones. Après une description du banc expérimental ainsi que des différents modes de fonctionnement étudiés (sain, défaillants), sont présentés. L'analyse en composantes principales (ACP) est alors mise en application sur des essais en présence ou non de défauts.

Nous terminerons par une conclusion générale sur l'ensemble de cette étude et nous proposons de perspective de travail.



Chapitre 1

*Présentation de la machine
asynchrone : défauts et
modélisations*

1.1 Introduction

Ce chapitre présente dans un premier lieu un aperçu des différents défauts dans les machines électriques tournantes, leur classification et leurs origines. Puis, les méthodes de diagnostic les plus fréquemment utilisées sont décrites. L'accent est ensuite mis sur la méthode de diagnostic basée sur l'analyse de champ magnétique de dispersion.

1.2 Notions fondamentales du diagnostic de défauts

1.2.1 La surveillance

Série de fonctions exécutées en temps réel pour reconstruire l'état réel du processus dans les modèles utilisés par le système de contrôle de processus. Il consiste à enregistrer des informations et à identifier et afficher un comportement anormal [1].

1.2.2 La détection

Déterminer la présence de défauts et l'instant d'occurrence de ces défauts [2].

1.2.3 Le diagnostic

Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test [3].

1.2.4 Le défaut

C'est une déviation non permise d'au moins d'une propriété ou d'un paramètre caractéristique du système par rapport aux conditions normales de fonctionnement [4].

1.2.5 Une défaillance

C'est une interruption permanente de la capacité du système à remplir une fonction requise dans des conditions d'opérations bien spécifiées [3].

1.3 Défauts des machines électriques tournantes

Une défaillance de machine électrique représente tout incident donnant lieu à un comportement anormal de la machine et qui peut à court ou long terme provoquer son endommagement [7]. Les raisons de défaillances dans les machines tournantes électriques ont leur origine dans la conception, la tolérance de fabrication, l'assemblage, l'installation, les défauts peuvent être classés selon leurs origines en deux catégories : interne et externe.

Les défauts externes sont causés par le type d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine. Une classification des défauts qui existent dans les machines électriques selon leurs origines est présentée dans le [Tableau I.1](#). [8],[9]

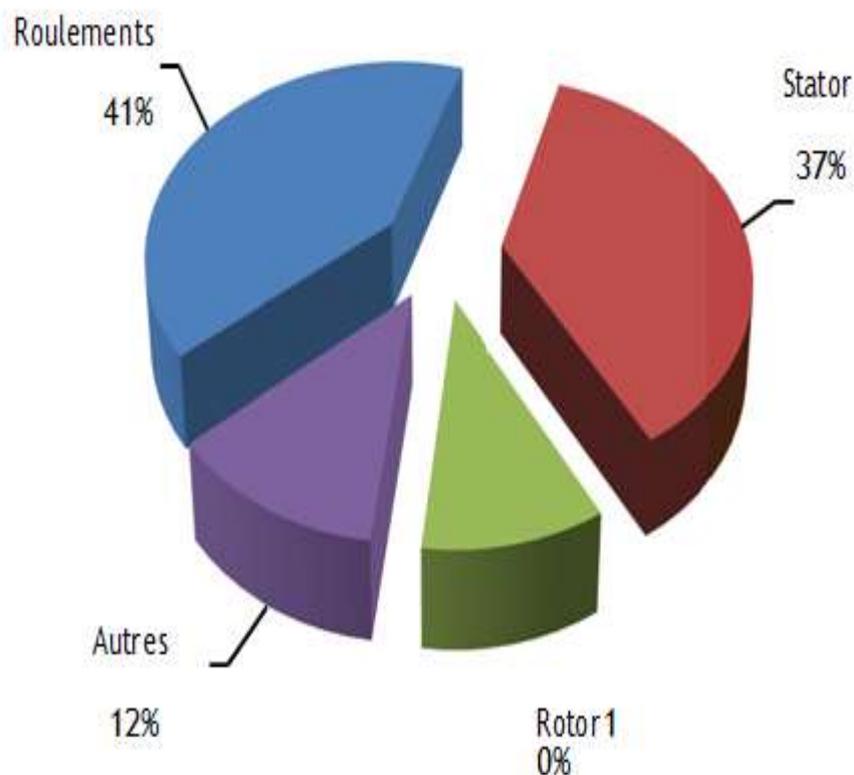
Tableau 1.1 : Défauts des machines électriques selon leurs origines

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

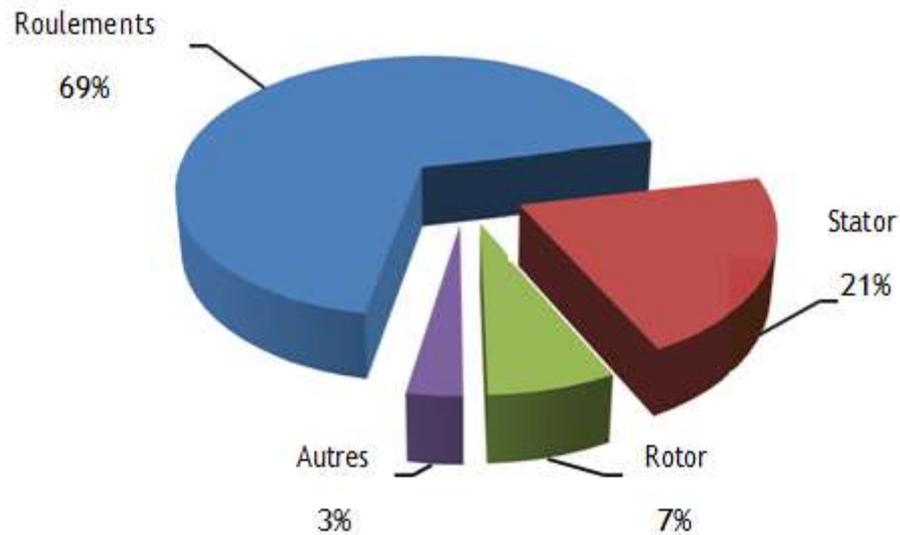
Statistiquement, il est difficile de donner une répartition exacte des défaillances de machines électriques puisque le recensement des pannes et défauts n'est pas automatique dans l'ensemble des parcs d'exploitation et des ateliers de maintenance [10].

Des multiples études statistiques sur des machines ont été effectuées depuis les années 80 jusqu'à présent. Toutes ces statistiques mentionnées dans concernent les machines asynchrones de moyenne et grande puissance exploitées dans l'industrie. [1],[2],[11],[14]

Les études effectuées sur des machines asynchrones de grande puissance (de 100 kW à 1 MW) dans les années 90 par Thorsen mentionnées après par Thomson ont montré que sur cette gamme de puissance certaines pannes sont plus fréquentes que d'autres et les pannes le plus fréquentes sont du type mécanique **Fig.1.1** La majorité d'entre elles se situent sur les roulements (41 %) et le stator (37 %). Les moins fréquentes sont les pannes au rotor (10 %) et les autres types constituent 12 % [13], [14], [15].



a)



b)

Fig.1.1: Évolution du pourcentage des défauts pendant une décennie (a)**Thorsen , b) Bonnet 2008 [12] [14])**

Une étude statistique récente faite par Bonnett [12] sur les machines asynchrones de grande puissance, exploitées dans l'industrie pétrochimique, montre que 69 % de pannes se situent sur les roulements, 21 % au stator, 7 % au rotor et 3 % dans les autres régions de la machine (voir Fig.1.1)(b)).

Comme cela a été déjà mentionnée dans l'étude la répartition présentée dans confirme que les défauts des machines de grande puissance proviennent principalement de roulements et du bobinage statorique (voir Fig.1.1 (a), (b)). [14], [12]

D'autre part, ces études montrent que pendant une décennie la répartition du pourcentage de ces défauts a changé, les défauts de roulements sont passés de 41% à 9%, les défauts au stator sont passés de 37% à 21% et celles au rotor de 10% à 7%. On constate que les défauts dans le stator et le rotor sont de moins en moins fréquents. Cela est dû à l'amélioration de la technique de fabrication de machines électriques (par exemple, l'amélioration des isolants). La principale source de défaillance reste les roulements.

Il est à noter que les techniques d'alimentation des machines électriques provoquent aussi des défaillances, par exemple, les enroulements sont excités par des tensions comprenant des fronts raides ce qui accélère le vieillissement de l'isolation du bobinage statorique.

1.4 Constitution de la machine asynchrone

Connaitre la constitution de la machine asynchrone est fondamental pour l'étude de ses défaut dans le cadre de son diagnostic, c'est pour cette raison qu'on se propose de donner les éléments les plus importants constituant la machine asynchrone. Ces éléments principaux sont montrés dans la [Fig.1.2](#) [16].

- ✚ Le **stator** (partie fixe) constitué de disques en tôles magnétiques portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer.
- ✚ Le **rotor** (partie tournante) constitué de disques en tôles magnétiques empilés sur l'arbre de la machine portant un enroulement injecté.
- ✚ Les **organes mécaniques** permettant la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles, appelés aussi les paliers.

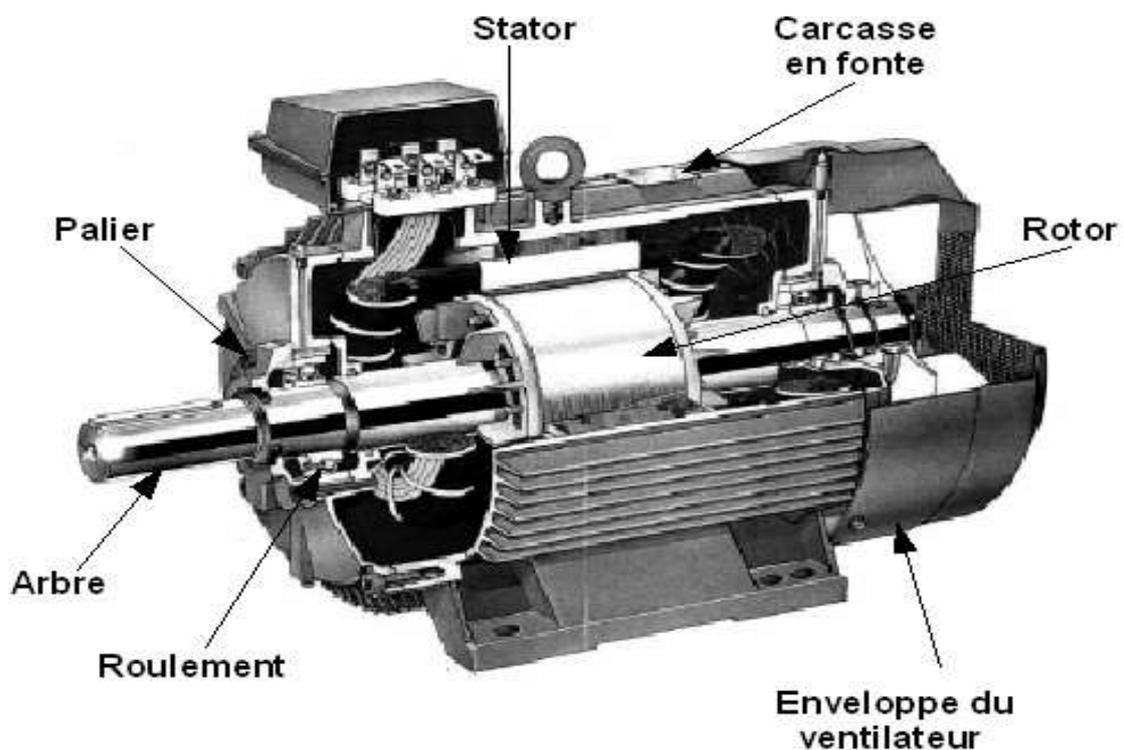


Fig.1.2 Machine asynchrone triphasé

1.4.1 Le stator

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Selon les Fig.1.3 et Fig.1.4 ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine,. Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines.

L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique [11].



Fig.1.3 Photo d'un stator d'une machine asynchrone.

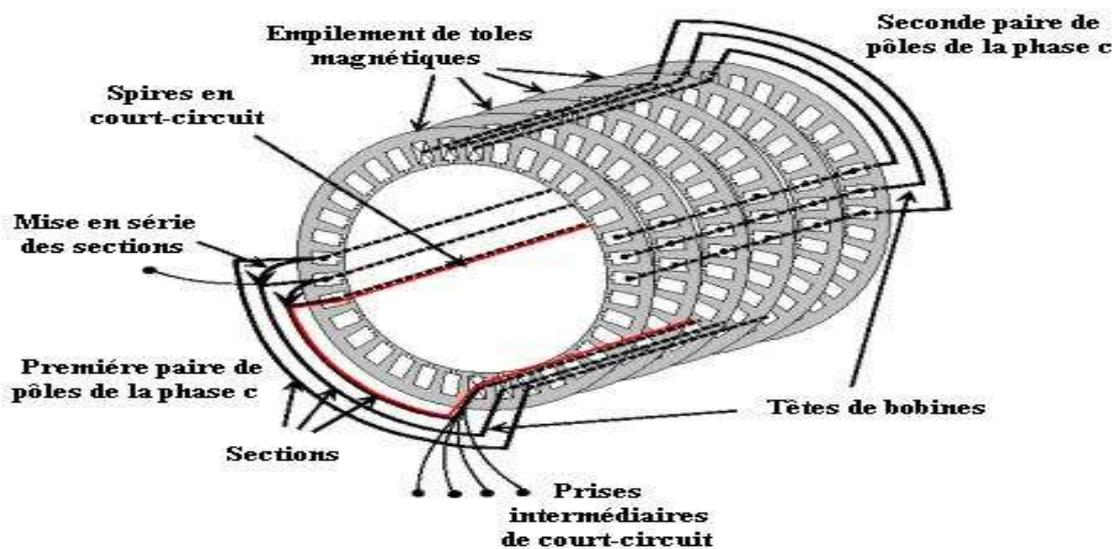


Fig.1.4 Vue schématique en perspective du stator

1.4.2 Le rotor

Le circuit magnétique du rotor est constitué d'un assemblage de tôles ferromagnétiques rainurées. On trouve deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écurueil. Dans notre étude, nous limitons au rotor à cage d'écurueil présenté dans les [Fig.1.5](#) et [Fig.1.6](#)

Les enroulements sont constitués de barres de cuivre pour les moteurs de grande puissance ou d'aluminium pour les moteurs de plus faible puissance. Ces barres sont court-circuitées à chaque extrémité par deux anneaux de court-circuit, fabriqués en cuivre ou en aluminium. Il n'y a généralement pas (très peu) d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre [8].



Fig.1.5 Photo d'un rotor d'une machine asynchrone

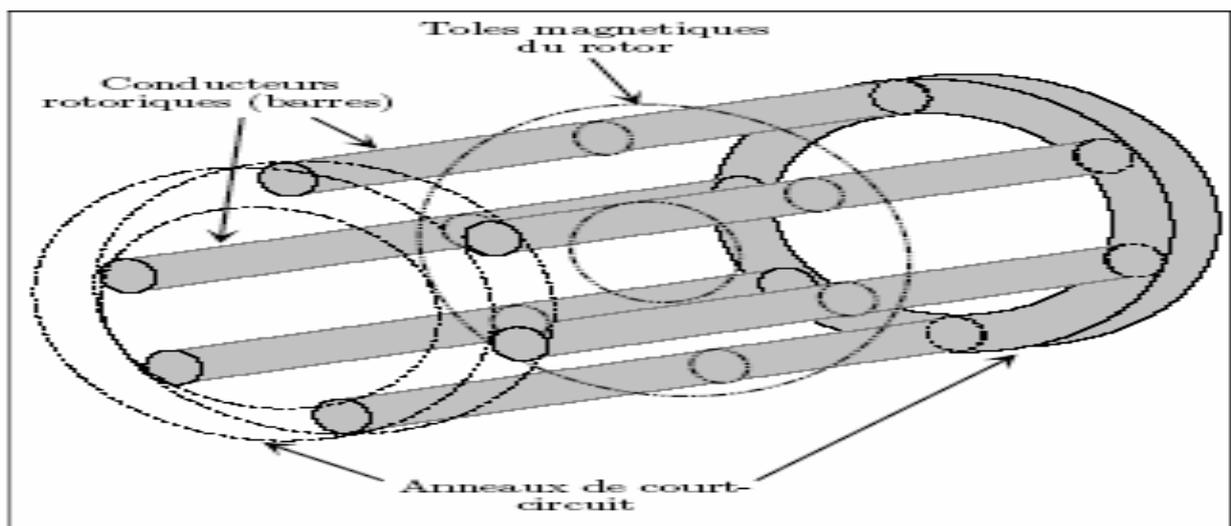


Fig.1.6 Vue schématique en perspective du rotor

1.4.3 Les Organes mécaniques

La carcasse sert de support. Elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi-accouplement. Il est, généralement, constitué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement est fonction des plusieurs efforts :

- ✚ Efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale,...etc.).

- ✚ Efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges.

Efforts de torsion (couple électromagnétique transmis en régime permanent et transitoire). Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dus aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Ils sont, généralement, à roulements pour les machines de petite et moyenne puissances [17].

1.5 Les défauts de machine asynchrone

Dans ce paragraphe sont présentés différents défauts des machines électriques, leurs origines et leur classification. les défauts peuvent être classés selon leurs origines en deux catégories : interne et externe. Les défauts internes sont provoqués par les constituants de la machine (bobinages du stator et du rotor, circuits magnétiques, cage rotorique, entrefer mécanique, etc.). Les défauts externes sont causés par le type d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine. Une classification des défauts qui existent dans les machines électriques selon leurs origines est présentée. Notre étude se limite aux problèmes qui se développent au sein de la machine [8].

Pour que l'appareil se compose d'une partie fixe et d'une partie tournante (le stator et le rotor).

Les causes des défauts au stator et au rotor sont multiples ,les plus fréquentes d'entre eux sont énumérées ce qui suit [11]

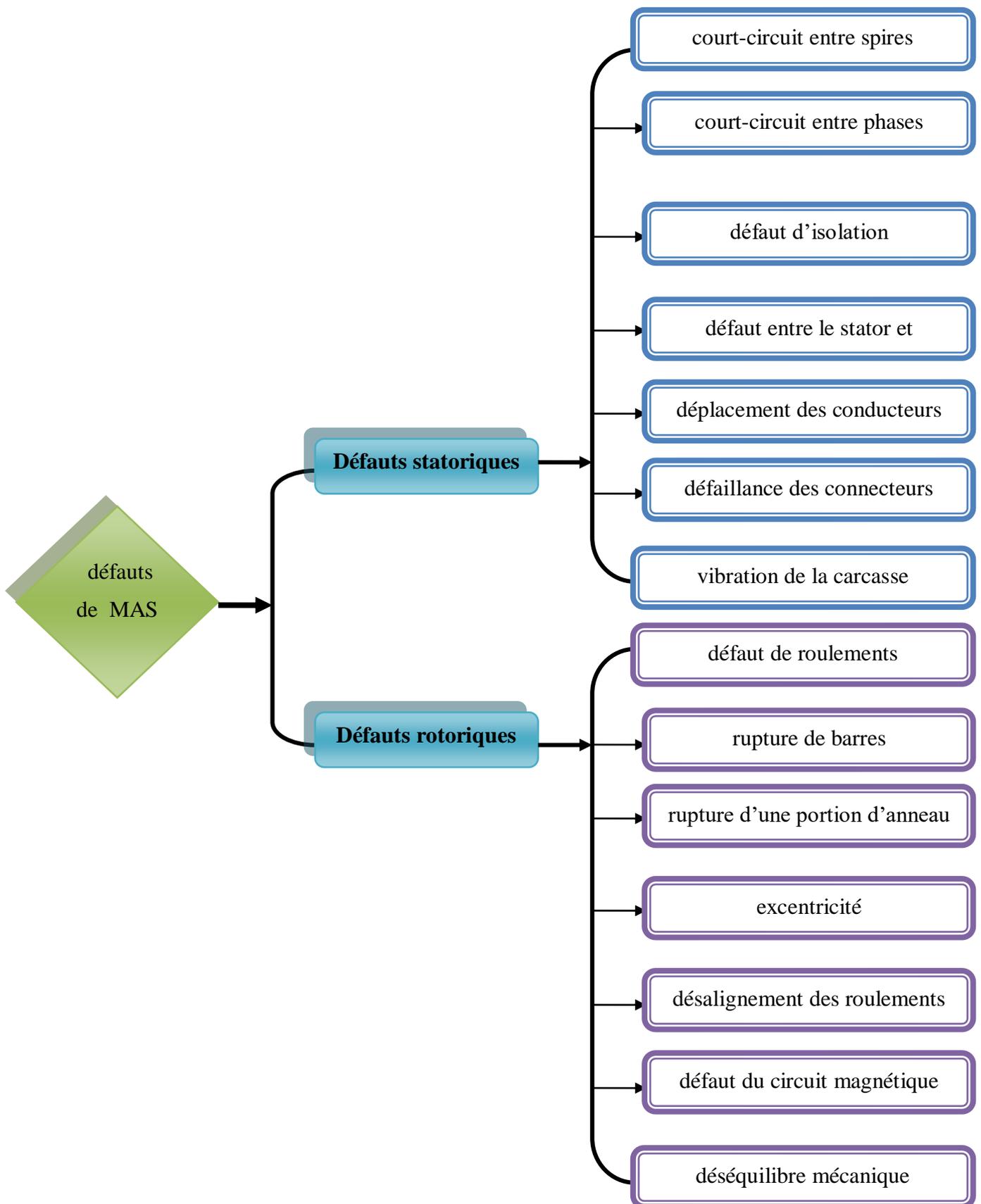


Fig.1.7 organigramme à Défauts machine asynchrone

❖ Défauts statoriques :

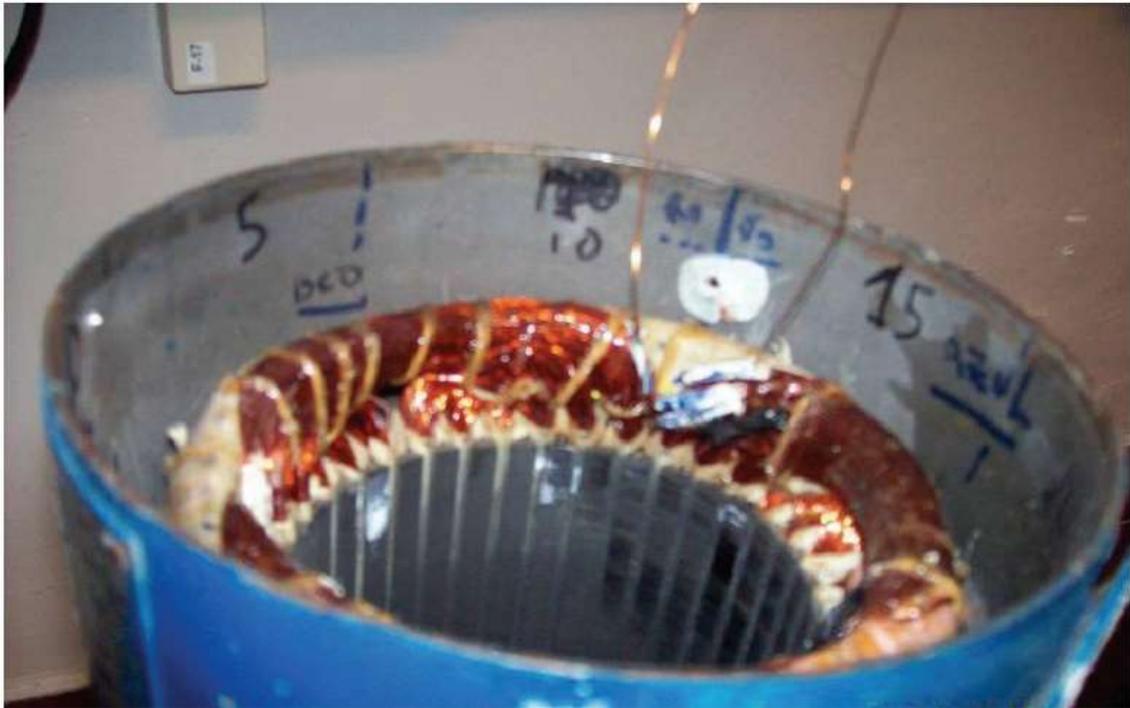


Fig.1.8 Court-circuit entre spires du stator

- ✚ Court-circuit entre spires : surtension, température excessive, vibration, humidité
- ✚ Court-circuit entre phases : haute température, alimentation déséquilibrée, défaut d'installation
- ✚ Défaut d'isolation : démarrage fréquent, décharge partielle, condition, température et humidité extrême
- ✚ Défaut entre le stator et carcasse : cycle thermique, abrasion de l'isolant, encrassement des spires par la carcasse, présence des points anguleux dans les encoches, choc ;
- ✚ Déplacement des conducteurs : démarrage fréquent, vibration de tête de bobines
- ✚ Défaillance des connecteurs : vibration excessive
- ✚ Vibration de la carcasse : mauvaise installation, déséquilibre magnétique, déséquilibre d'alimentation, surcharge, mouvement des enroulements, contact avec le rotor.

❖ Défauts rotoriques :



Fig.1.9 cassure de barres au rotor

- ✚ Défaut de roulements : mauvaise installation, déséquilibre magnétique, haute température, perte de lubrifiant, charge déséquilibrée, corrosion
- ✚ Rupture de barres : cycle thermique, régime transitoire à longue durée ; déséquilibre magnétique **Fig.1.11**
- ✚ Rupture d'une portion d'anneau : cycle thermique
- ✚ excentricité : mauvaise installation, déséquilibre magnétique, défauts des roulements **Fig.1.10**
- ✚ Désalignement des roulements : défaut de couplage, mauvaise installation, surcharge
- ✚ Défaut du circuit magnétique : défaut de fabrication, surcharge, cycle thermique
- ✚ Déséquilibre mécanique : mauvais alignement, mouvement des anneaux de court-circuit. Une description succincte de défauts les plus courants est donnée dans les paragraphes suivants.

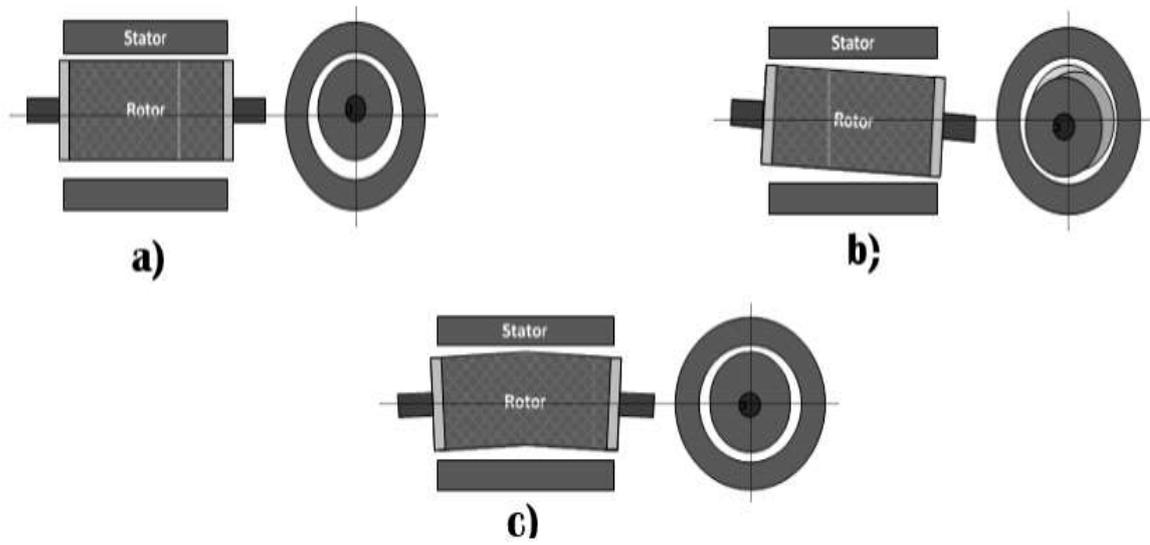


Fig.1.10 Types d'excentricité : a) statique ; b) dynamique ; c) mixte [15]

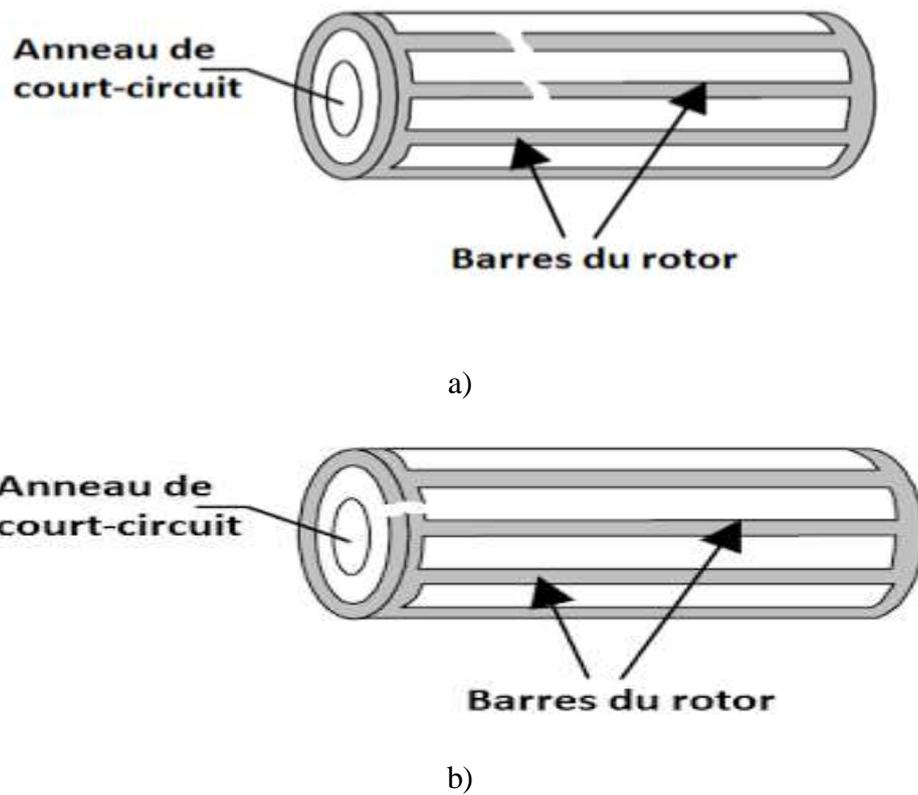


Fig.1.11 Défaut d'un rotor à cage d'écureuil : a) rupture de barres ; b) rupture d'anneau de court-circuit [15]

1.6 Modélisations de la MAS

Notre stratégie de diagnostic de défauts d'un moteur consiste à la surveillance d'une ou plusieurs variables de la machine. Pour choisir les grandeurs qui reflètent le plus le défaut, une étude des grandeurs de la machine avec et sans défaut s'avère nécessaire.

L'un des objectifs les plus importants, dans le cadre du diagnostic, concerne la mise au point de modèles mathématiques réellement représentatifs d'un fonctionnement, pour la détection et la localisation de défauts. En outre, elle est d'un apport précieux en permettant d'une part, de restituer une image de ce que l'on peut observer expérimentalement et d'autre part, de prévoir des comportements de la machine plus variés que ceux de l'observation expérimentale. Mathématiquement, les machines électriques sont représentées par des modèles entrées sorties sous la forme de fonction de transfert ou encore sous forme d'équations en variables d'état. C'est ce dernier type de modèle que nous allons utiliser pour reproduire au mieux le comportement de la MAS en fonctionnement normal ou défectueux.

Nous présentons au début de ce paragraphe le modèle de fonctionnement sain de la MAS triphasé à cage d'écureuil dans le repère triphasé (abc) mais sous certaines hypothèses simplificatrices, nous passons après à une représentation biphasée équivalente, dans le repère de Park (dq) réduisant ainsi la complexité du modèle. Cette modélisation sera utile pour représenter à la fin de ce paragraphe les modèles de défauts : statorique et rotorique de la MAS [6].

1.6.1 Modélisation du fonctionnement sain de la machine

1.6.1.1 Schéma de la MAS

Dans ce travail, nous nous intéressons à la MAS à cage d'écureuil alimentée directement par un réseau. La MAS est donc constitué de trois enroulements logés symétriquement dans les encoches du stator. Pour le rotor, nous admettons que sa structure est électriquement équivalente à celle d'un rotor bobiné court-circuité, ainsi, il est assimilable à trois enroulements identiques parfaitement symétriques en court-circuit (cage d'écureuil).

Nous schématisons sur la **Fig.1.12** la disposition de ces six enroulements dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation de la machine. Les bobinages statorique sont notés par

(a_s, b_s, c_s) et au rotor (a_r, b_r, c_r). L'angle θ caractérise la position angulaire du rotor par rapport au stator d'où la vitesse angulaire $\omega = \frac{d\theta}{dt}$

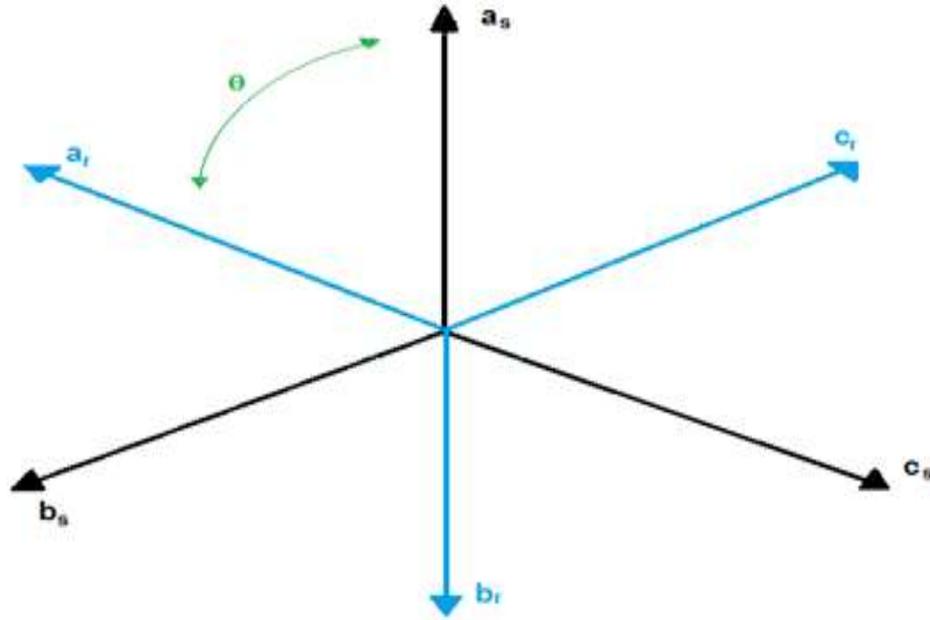


Fig.1.12 Représentation des enroulements d'une MAS triphasée saine

1.6.1.2 Modèle triphasé

En appliquant la loi d'Ohm généralisée aux bornes de chacune des phases statorique et rotorique nous pouvons écrire les équations des tensions et des flux de la MAS :

$$[U_s] = [R_s] \cdot [i_s] + \frac{d[\Phi_s]}{dt} \quad (1.1)$$

$$[U_r] = 0 = [R_r] \cdot [i_r] + \frac{d[\Phi_r]}{dt} \quad (1.2)$$

$$[U_s] = \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix}; [i_s] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}; [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix}; [R_s] = \begin{bmatrix} R_{sa} & 0 & 0 \\ 0 & R_{sb} & 0 \\ 0 & 0 & R_{sc} \end{bmatrix}$$

$$[U_r] = \begin{bmatrix} u_{ra} \\ u_{rb} \\ u_{rc} \end{bmatrix}; [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}; [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix}; [R_r] = \begin{bmatrix} R_{ra} & 0 & 0 \\ 0 & R_{rb} & 0 \\ 0 & 0 & R_{rc} \end{bmatrix}$$

$[U_s], [U_r]$: Vecteurs des tensions statorique et rotoriques,

$[i_s], [i_r]$: Vecteurs des courants statorique et rotoriques,

$[\Phi_s], [\Phi_r]$: Vecteurs des flux statorique et rotoriques,

$[R_s], [R_r]$: matrices des résistances statorique et rotorique.

Les flux totalisés θ_s et θ_r des phases statorique et rotorique s'expriment sous la forme :

$$[\Phi_s] = [L_s] \cdot [i_s] + [M_{sr}] \cdot [i_r] \quad (1.3)$$

$$[\Phi_r] = [M_{rs}] \cdot [i_s] + [L_r] \cdot [i_r] \quad (1.4)$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{psa} + L_{fsa} & -\frac{L_{sab}}{2} & -\frac{L_{sac}}{2} \\ -\frac{L_{sab}}{2} & L_{psb} + L_{fsb} & -\frac{L_{sbc}}{2} \\ -\frac{L_{sac}}{2} & -\frac{L_{sbc}}{2} & L_{psc} + L_{fsc} \end{bmatrix}$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{pra} + L_{fra} & -\frac{L_{rab}}{2} & -\frac{L_{rac}}{2} \\ -\frac{L_{rab}}{2} & L_{prb} + L_{frb} & -\frac{L_{rbc}}{2} \\ -\frac{L_{rac}}{2} & -\frac{L_{rbc}}{2} & L_{prc} + L_{frc} \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{s_a r_a} \cos \theta & M_{s_a r_b} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & M_{s_a r_c} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ M_{s_b r_a} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & M_{s_b r_b} \cos \theta & M_{s_b r_c} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ M_{s_c r_a} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & M_{s_c r_b} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & M_{s_c r_c} \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T$$

L_s, L_r : Inductance propre statorique et rotorique,

L_{psx} et L_{fsx} : Inductance principale statorique et inductance de fuite statorique,

L_{prx} et L_{frx} : Inductance principale rotorique et inductance de fuite rotorique,

$L_{rx} = L_{prx} + L_{frx}$: Inductance propre d'une phase rotorique,

L_{sxy} (resp. L_{rxy}) : Mutuelle inductance entre deux phases statorique (resp. rotorique)

$M_{s_x r_y}$: Mutuelle inductance entre phase statorique x et une phase rotorique y,

$\theta = P \cdot \theta_{\text{mecanique}}$: Angle électrique de la position du rotor,

P : Nombre de paires de pôles.

Selon [6] [7], les mutuelles inductances sont décrites par :

$$M_{sr}(\theta) = \frac{3}{2} \cdot L_p \cdot T_{32} \cdot P(\theta) \cdot T_{23} \quad (1.5)$$

$$M_{rs}(\theta) = M_{sr}(\theta)^T = \frac{3}{2} \cdot L_p \cdot T_{32} \cdot P(-\theta) \cdot T_{23} \quad (1.6)$$

Avec :

$$T_{23} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(0) & \cos(\frac{2\pi}{3}) & \cos(\frac{4\pi}{3}) \\ \sin(0) & \sin(\frac{2\pi}{3}) & \sin(\frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \cos(\frac{2\pi}{3}) & \cos(\frac{4\pi}{3}) \\ 0 & \sin(\frac{2\pi}{3}) & \sin(\frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

$$T_{32} = T_{23}^T$$

$$P(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{\pi}{2}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta + \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} : \text{Matrice de rotation d'angle } \theta$$

Si nous remplaçons les équations (1.3) dans (1.1) et (1.4) dans (1.2) nous obtenons le système d'équations électriques (1.7) et (1.8) nécessaire à l'étude du fonctionnement de la machine pour tous les régimes :

$$[U_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt}\{[L_s][i_s]\} + \frac{d}{dt}\{[M_{sr}][i_r]\} \quad (1.7)$$

$$[U_r] = [0] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt}\{[L_r][i_r]\} + \frac{d}{dt}\{[M_{rs}][i_r]\} \quad (1.8)$$

1.6.1.3 Equations mécaniques de la machine

L'équation d'équilibre des couples s'écrit [7] :

$$C_{em} = C_{charge} \quad (1.9)$$

Avec

C_{em} le couple électromagnétique et C_{charge} le couple résistant extérieur. Si, pour une raison quelconque, cette égalité entre les couples est perturbée ($C_{em} \neq C_{charge}$), dans ce cas, l'équation d'équilibre des couples est réalisée grâce au couple dynamique :

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} = C_{em} - C_{charge} \quad (1.10)$$

J : Moment d'inertie des parties tournantes,

Ω_m : Vitesse angulaire mécanique du rotor ($\Omega_m = p\omega$),

ω : Pulsation mécanique,

p : Nombre de paires de pole.

Les paramètres J et C_{charge} dépendent directement de la machine étudiée et de sa charge. Nous proposons ci-après un récapitulatif des équations électriques et mécaniques qui régissent le fonctionnement de la machine asynchrone à cage.

$$\left\{ \begin{array}{l} [U_s] = [R_s] \cdot [i_s] + \frac{d[\Phi_s]}{dt} \\ [\Phi_s] = [L_s] \cdot [i_s] + [M_{sr}] \cdot [i_r] \\ [U_r] = 0 = [R_r] \cdot [i_r] + \frac{d[\Phi_r]}{dt} \\ [\Phi_r] = [M_{rs}] \cdot [i_s] + [L_r] \cdot [i_r] \\ J \frac{d\Omega_m}{dt} = C_{em} - C_{charge} \\ \omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \end{array} \right. \quad (1.11)$$

1.6.1.4 Transformation biphasé de Park

La transformation de Park consiste à appliquer aux courants, tensions et flux, un changement de variable faisant intervenir l'angle entre l'axe des enroulements et les axes d et q . Ceci peut être interprété comme la substitution, aux enroulements réels, d'enroulements fictifs (d_s, q_s, d_r, q_r) dont les axes magnétiques sont liés aux axes d, q conformément à la [Fig.1.13](#)

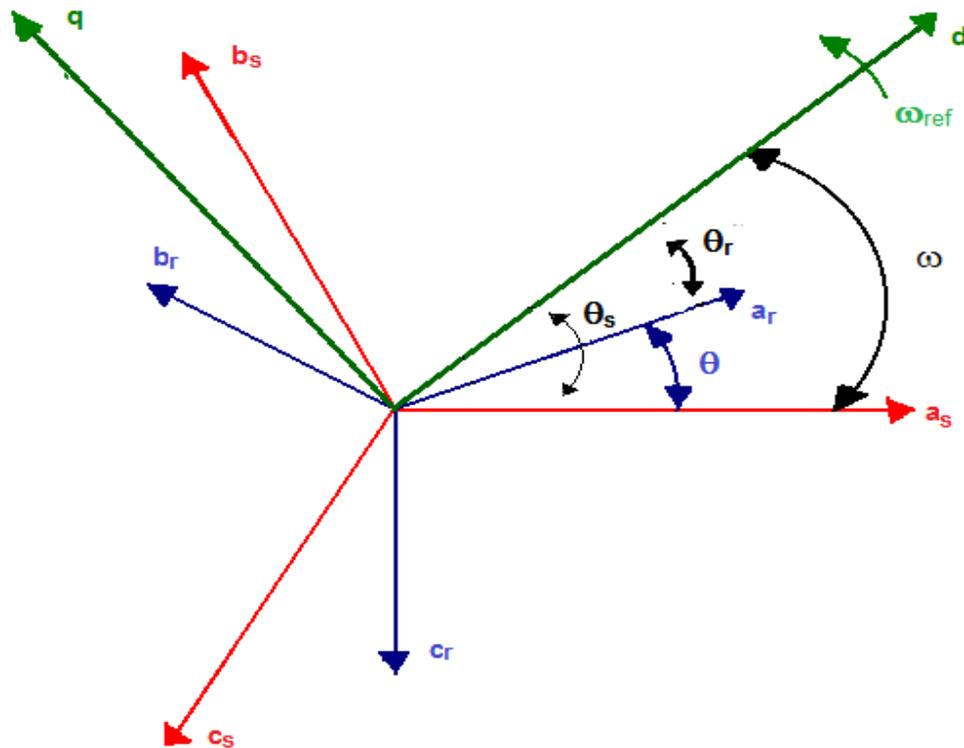


Fig.1.13 Principe de la transformation de Park

Nous transformons, ainsi, l'enroulement triphasé a, b, c en trois enroulements orthogonaux d, q, O dénommés :

- ⊕ Axe direct (indice d),
- ⊕ Axe transversal (indice q),
- ⊕ Axe homopolaire (indice O).

Il suffit d'appliquer la transformation suivante :

$$\begin{bmatrix} X_{ds} \\ X_{qs} \end{bmatrix} = P(-\theta) \cdot T_{23} \cdot \begin{bmatrix} X_{as} \\ X_{bs} \\ X_{cs} \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

Avec

$$P(-\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ \sin(-\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} : \text{Matrice de rotation de Park d'angle } (-\theta) \quad (1.9)$$

1.6.1.4 Modèle de la machine dans le repère de Park

En utilisant les relations $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_{ref}$ et $\frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} = \frac{d\theta}{dt} = \omega$ les équations (1.1) à (1.4) se réécrivent dans le repère (dq) comme suit [7]:

$$[U_{dq_s}] = R_s \cdot [i_{dq_s}] + \frac{d[\Phi_{dq_s}]}{dt} + \omega_{ref} P\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot [\Phi_{dq_s}] \tag{1.10}$$

$$[0] = R_r \cdot [i_{dq_r}] + \frac{d[\Phi_{dq_r}]}{dt} + (\omega_{ref} - \omega) \cdot P\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot [\Phi_{dq_r}] \tag{1.11}$$

$$[\Phi_{dq_s}] = (L_f + L_m) \cdot [i_{dq_s}] + L_m \cdot [i_{dq_r}] = L_f \cdot [i_{dq_s}] + L_m [i_{dq_m}] \tag{1.12}$$

$$[\Phi_{dq_r}] = L_m \cdot ([i_{dq_s}] + [i_{dq_r}]) = L_m [i_{dq_m}] \tag{1.13}$$

$[i_{dq_m}]$: Composantes d et q du courant magnétisant

$L_m = 3/2 \cdot L_p$: Inductance magnétisante de la machine. Cette inductance est associée à l'ensemble des lignes de champ se refermant par le stator et le rotor.

Donc, en remplaçant ω_{ref} par ω dans les équations (1.10) et (1.11), nous obtenons le modèle dynamique de la machine représenté par le schéma équivalent de la MAS dans le repère (dq), fonctionnant en régime transitoire ou permanent avec fuites ramenées au stator, représenté par la **Fig.1.14**

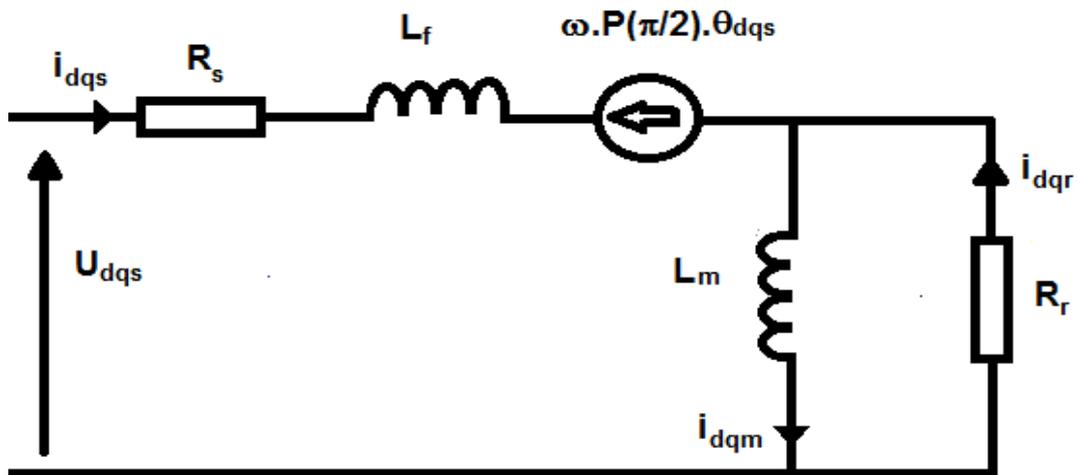


Fig.1.14 Modèle de la machine saine dans le repère de Park lié au rotor

1.6.2 Modélisation de la machine en présence de défaut

1.6.2.1 Modèle de la MAS avec défaut statorique

On obtient une représentation d'état de la MAS en défaut de court-circuit en associant le vecteur d'état qui contient les courants statoriques et les flux rotoriques ainsi que l'entrée et la sortie du système correspondant respectivement aux tensions et courants statorique d'axe d et q. La MAS peut être donc décrit par le système d'équations non linéaires [5]:

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = A(\omega). X(t) + B. u(t) \\ Y(t) = C. X(t) + D. u(t) \end{cases} \quad (1.14)$$

$$X = [i'_{ds} \quad i'_{qs} \quad \Phi_{dr} \quad \Phi_{qr}]^T, \quad u = [U_{ds} \quad U_{qs}]^T, \quad \text{et} \quad Y = [i_{ds} \quad i_{qs}]^T$$

$$A(\omega) = \begin{bmatrix} -\frac{R_s + R_r}{L_f} & \omega & \frac{R_r}{L_m \cdot L_f} & \frac{\omega}{L_f} \\ -\omega & -\frac{R_s + R_r}{L_f} & \frac{-\omega}{L_f} & \frac{R_r}{L_m \cdot L_f} \\ R_r & 0 & -\frac{R_r}{L_m} & 0 \\ 0 & R_r & 0 & -\frac{R_r}{L_m} \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad D = \sum_{k=1}^3 \frac{2 \cdot \eta_{cck}}{3 \cdot R_s} p(\theta) Q(\theta_{cck}) p(\theta)$$

La **Fig.1.15** représente le schéma électrique équivalent de la MAS dans le repère de Park avec fuites au stator, en tenant compte d'un éventuel défaut de court-circuit sur une des trois phases.

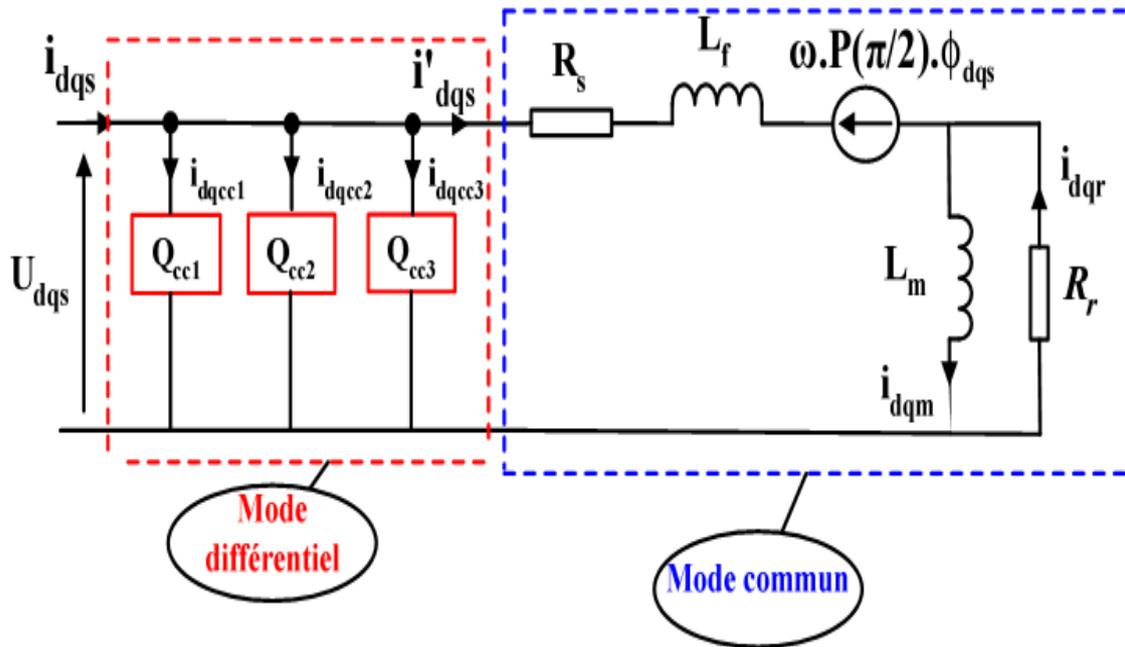


Fig.1.15 Modèle général de court-circuit dans le repère de Park

1.6.2.2 Modèle de la MAS avec défaut rotorique

La Fig.1.16 représente le schéma électrique équivalent de la MAS avec défaut rotorique en régime dynamique avec fuites ramenées au stator. La rupture de barre au rotor se ramène à un simple quadripôle résistif R défaut mis en série avec la résistance rotorique. L'expression de la matrice résistance équivalente au rotor est alors obtenue comme suit.[7]

$$[R_{eq}] = [R_r] + [R_{defaut}] = [R_r] - \frac{\alpha}{1+\alpha} \cdot Q(\theta_0) \cdot [R_r] \quad (1.15)$$

Avec $[R_r] = R_r \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $\alpha = \frac{2}{3} \eta_0$ et

$$Q(\theta_0) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_0)^2 & \cos(\theta_0) \sin(\theta_0) \\ \cos(\theta_0) \sin(\theta_0) & \sin(\theta_0)^2 \end{bmatrix}$$

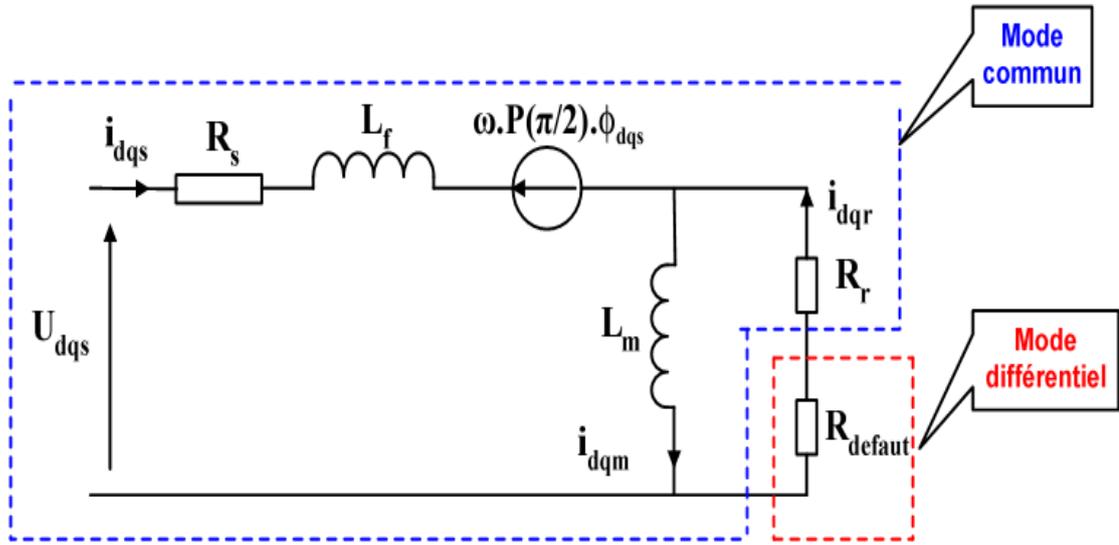


Fig.1.16 Modèle de défaut rotorique de la MAS

Selon la Fig.1.16 le modèle d'état est le même que celui de la MAS en fonctionnement sain sauf que la résistance rotorique est remplacée par la résistance équivalente. La MAS peut être donc décrit par le système d'équations non linéaires :

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = A(\omega).X(t) + B.u(t) \\ Y(t) = C.X(t) \end{cases} \quad (1.16)$$

$$X = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad \Phi_{dr} \quad \Phi_{qr}]^T, \quad u = [U_{ds} \quad U_{qs}]^T, \quad \text{et } Y = [i_{ds} \quad i_{qs}]^T$$

$$A(\omega) = \begin{bmatrix} -\frac{R_s + R_r}{L_f} & \omega & \frac{R_r}{L_m \cdot L_f} & \frac{\omega}{L_f} \\ -\omega & -\frac{R_s + R_r}{L_f} & \frac{-\omega}{L_f} & \frac{R_r}{L_m \cdot L_f} \\ R_r & 0 & -\frac{R_r}{L_m} & 0 \\ 0 & R_r & 0 & -\frac{R_r}{L_m} \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad D = \sum_{k=1}^3 \frac{2 \cdot \eta_{cck}}{3 \cdot R_s} p(\theta) Q(\theta_{cck}) p(\theta)$$

$$A(\omega) = \begin{bmatrix} -([R_s] + [R_{eq}])L_f^{-1} - \omega \cdot P(\pi/2) & ([R_{eq}] \cdot L_m^{-1} - \omega \cdot P(\pi/2)) \cdot L_f^{-1} \\ [R_{eq}] & -[R_{eq}] \cdot L_m^{-1} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T ; C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[R_{eq}] = [R_{eq}] \cdot (I - \frac{\alpha}{1+\alpha} Q(\theta_0))$$

1.6.2.3 Modèle de la MAS avec défaut simultané stator /rotor

La représentation d'état du modèle de défaut simultané stator/rotor dans le repère de Park lié au rotor est la combinaison des deux modèles étudiés précédemment, il est donné par le système (1.17) :

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = A(\omega) \cdot X(t) + B \cdot u(t) \\ Y(t) = C \cdot X(t) + D \cdot u(t) \end{cases} \quad (1.17)$$

$$X = [i'_{ds} \quad i'_{qs} \quad \Phi_{dr} \quad \Phi_{qr}]^T, u = [U_{ds} \quad U_{qs}]^T, \text{ et } Y = [i_{ds} \quad i_{qs}]^T$$

$$A(\omega) = \begin{bmatrix} -([R_s] + [R_{eq}])L_f^{-1} - \omega \cdot P(\pi/2) & ([R_{eq}] \cdot L_m^{-1} - \omega \cdot P(\pi/2)) \cdot L_f^{-1} \\ [R_{eq}] & -[R_{eq}] \cdot L_m^{-1} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T ; C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} ; D =$$

$$\sum_{k=1}^3 \frac{2 \cdot \eta_{cck}}{3 \cdot R_s} p(-\theta) Q(\theta_{cck}) p(\theta)$$

Etant donné que les deux principaux défauts peuvent être découplés, le modèle global de défaut simultané stator/rotor est représenté sur la **Fig.1.17**. [7]

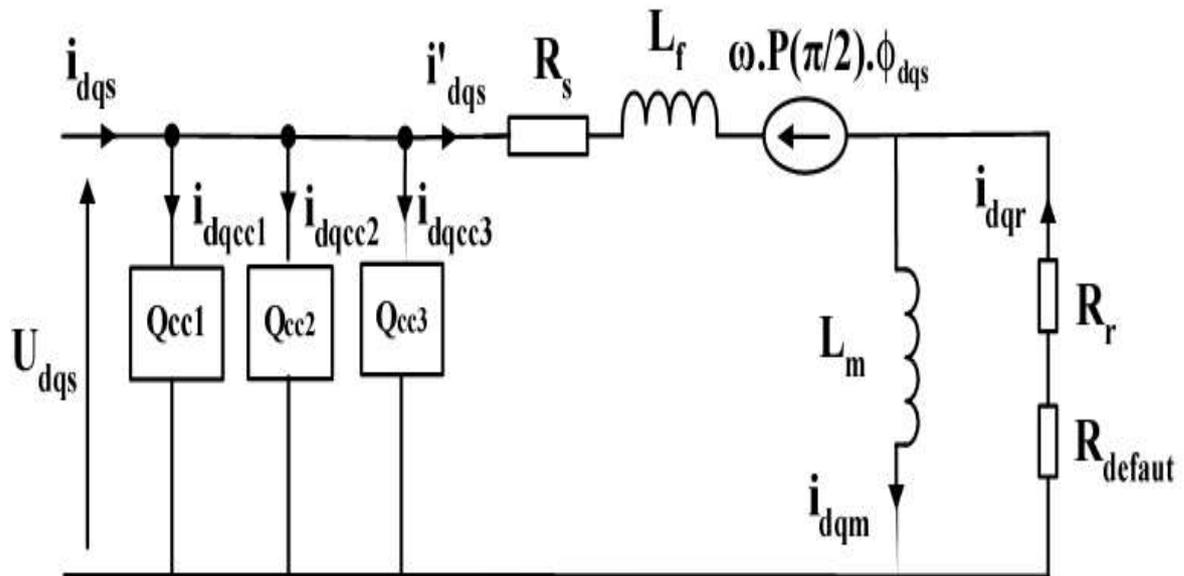


Fig.1.17 Modèle de défaut simultané stator/rotor de la MAS

1.7 Conclusion

En raison des caractéristiques des moteurs asynchrones, qui sont la durabilité, la capacité de masse et le coût, ils sont progressivement devenus les plus largement utilisés dans le domaine de la traction électrique et par la suite leur entretien et leur diagnostic sont devenus un rôle économique efficace et il est important de détecter les différents défauts qui peuvent être affectés par ces machines.

Ces modèles nous ont permis d'obtenir des signaux distinctifs pour les pannes électriques et de prédire le développement de ce dernier, basé sur le programme «matlab».

De cette façon, nous nous sommes appuyés sur l'analyse des signaux des courants du membre stator et du rotor avec plusieurs charges.

Les résultats obtenus portent des preuves plus précises pour prédire l'occurrence de dysfonctionnements du mineur chez l'habitant par rapport à ceux des références.



Chapitre 2

*Analyse en composantes
principales(ACP)*

2.1 Introduction

L'idée centrale de l'analyse en composantes principales (ACP) est de réduire la dimension de l'ensemble de données qui se composent d'un grand nombre de variables liées, tout en maintenant la plus grande variabilité possible dans l'ensemble de données. Ceci est accompli en passant à un nouvel ensemble de variables, les composantes principales, qui ne sont pas corrélées, et qui sont disposés de sorte que les premiers éléments conservent la même variance trouvée dans toutes les variables d'origine.

2.2 Histoire et applications de l'ACP

L'analyse en composantes principales ACP est décrite par Karl Pearson en 1901. Pearson utilise des corrélations non plus pour expliquer une variable à partir des autres, mais pour décrire et résumer l'information contenue dans ces variables [20].

L'analyse en composantes principales (ACP ou PCA en anglais pour principal component analysis), ou selon le domaine d'application la transformation de Karhunen–Loève (KLT) [1], est une méthode de la famille de l'analyse des données et plus généralement de la statistique multi-variée, qui consiste à transformer des variables liées entre elles (dites « corrélées » en statistique) en nouvelles variables décorrélées les unes des autres. Ces nouvelles variables sont nommées « composantes principales », ou axes principaux. Elle permet au praticien de réduire le nombre de variables et de rendre l'information moins redondante.

Il s'agit d'une approche à la fois géométrique et statistique. Lorsqu'on veut compresser un ensemble de N variables aléatoires, les n premiers axes de l'analyse en composantes principales sont un meilleur choix, du point de vue de l'inertie ou de la variance [20], [21].

Les champs d'application sont aujourd'hui multiples, allant de la biologie à la recherche économique et sociale, et plus récemment le traitement d'images. L'ACP est majoritairement utilisée pour:

- ✚ Décrire et visualiser des données
- ✚ Décorréliser les données ; la nouvelle base est constituée d'axes qui ne sont pas corrélés entre eux
- ✚ D'ébruiter les données, en considérant que les axes que l'on décide d'*oublier* sont des axes bruités.

- ✚ La méthode de décomposition orthogonale aux valeurs propres est également utilisée [22].

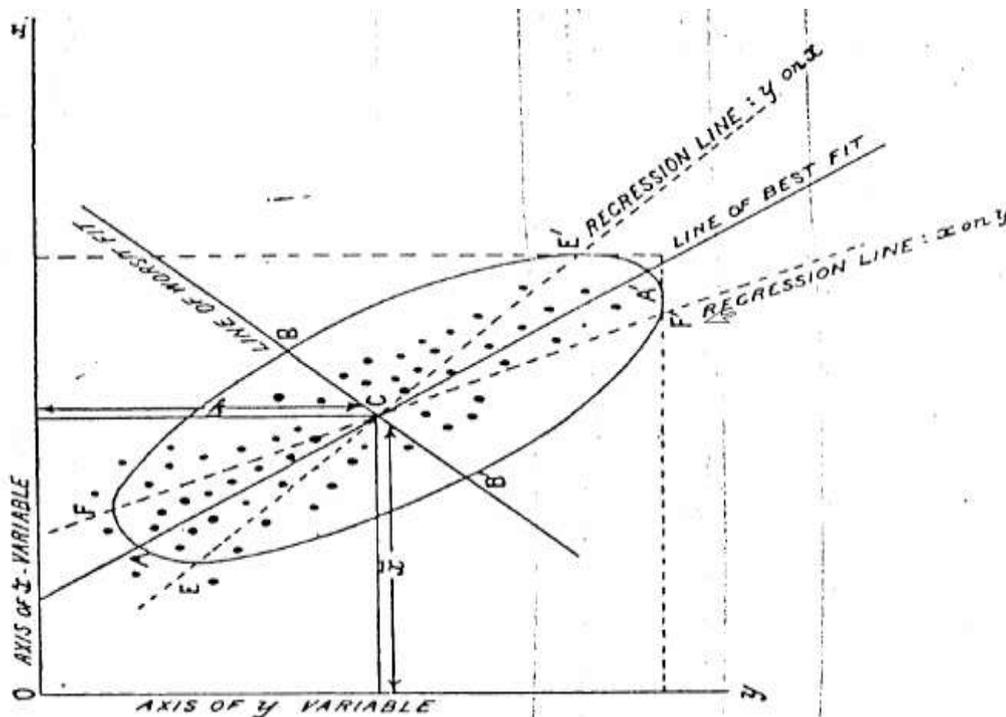


Fig.2.1 Extrait de l'article de Pearson de 1901 : la recherche de la « droite du meilleur ajustement ».

2.3 Définition et dérivation des principaux composants

Supposons que x soit un vecteur de p variables aléatoires, et que les variances des p variables aléatoires et la structure des covariances ou corrélations entre les p variables soient intéressantes. À moins que p soit petit ou que la structure soit très simple, il ne sera souvent pas très utile de simplement regarder les p variances et toutes les corrélations ou covariances $\mathbf{t}p(p-1)$. Une autre approche consiste à rechercher quelques variables dérivées ($\ll p$) qui préservent la plupart des informations fournies par ces variances et corrélations ou covariances. Bien que l'ACP n'ignore pas les covariances et les corrélations, elle se concentre sur les variances. La première étape i / s pour rechercher une fonction linéaire (\hat{x}_1x des

éléments de \mathbf{x} qui a une variance maximale, où (X_1) est un vecteur de p constants α_{11} , $\alpha_{12}, \dots, \alpha_{1p}$, et indique de sorte que

$$\alpha'_1 \mathbf{x} = \alpha_{11}x_1 + \alpha_{12}x_2 + \dots + \alpha_{1p}x_p = \sum_{j=1}^p \alpha_{1j}x_j \quad (2.1)$$

Ensuite, recherchez une fonction linéaire $\alpha'_2 \mathbf{x}$ sans corrélation avec $\alpha'_1 \mathbf{x}$ qui a une variance maximale, et ainsi de suite, de sorte qu'à la k étape une fonction linéaire $\alpha'_k \mathbf{x}$ est trouvée qui a la variance maximale sous réserve d'être non corrélée avec $\alpha'_1 \mathbf{x}, \alpha'_2 \mathbf{x}, \dots, \alpha'_{k-1} \mathbf{x}$. La k variable dérivée $\alpha'_k \mathbf{x}$ est le k PC. On peut trouver jusqu'à p PCs, mais on espère, en général, que la majeure partie de la variation de \mathbf{x} sera expliquée par m PCs où $m \ll p$. La réduction de la complexité qui peut être obtenue en transformant en

PCs, sera démontré dans plusieurs exemples plus loin, mais il sera utile ici de considérer le cas irréaliste, mais simple, où $p=2$. L'avantage de $p=2$ est, bien sûr, que les données peuvent être tracées exactement en deux dimensions.

La Fig.2.2 donne un tracé de 50 observations sur deux variables hautement corrélées x_1, x_2 . Il existe une variation considérable dans les deux variables, mais plutôt dans le sens de x_1 que x_2 . Si nous nous transformons en PCs z_1, z_2 on obtient le tracé donné dans Fig.2.3. Il est clair qu'il y a une plus grande variation dans le sens de z_1 que dans l'une ou l'autre des variables d'origine, mais très peu de variation [27]

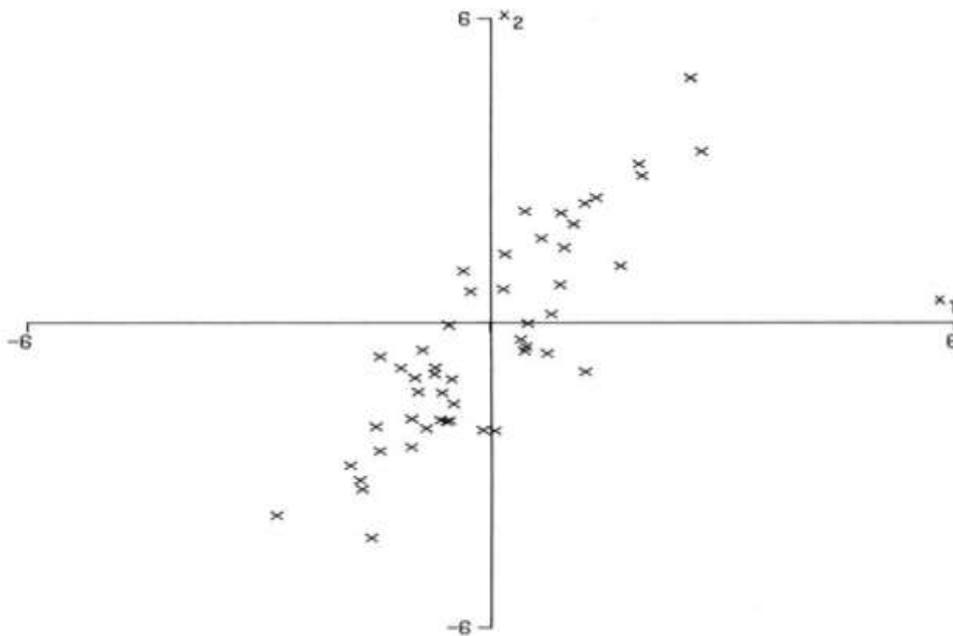


Fig.2.2 Tracé de 50 observations sur deux variables x_1, x_2 [35]

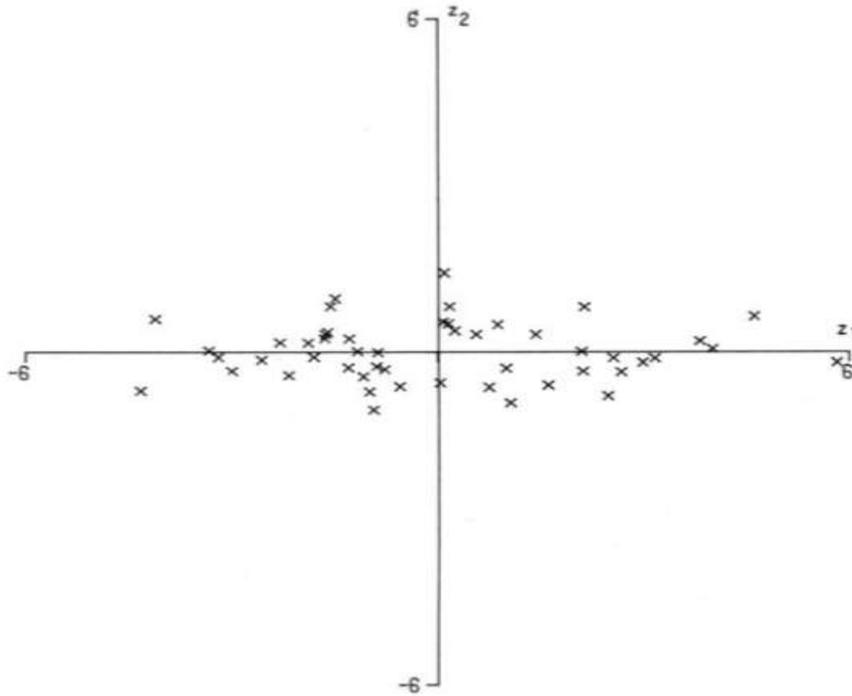


Fig.2.3 Tracé des 50 observations de la Fig.2.2 par rapport à leur PCs z_1 , z_2 [35]

2.4 Tableau de données

Les données sont les mesures effectuées sur n unités $\{u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_n\}$. Les p variables quantitatives qui représentent ces mesures sont $\{v_1, v_2, \dots, v_j, \dots, v_p\}$. Le tableau des données brutes à partir duquel on va faire l'analyse est notée X et a la forme suivante :

$$X = \begin{matrix} & \begin{matrix} v_1 & v_2 & \dots & v_j & \dots & v_p \end{matrix} \\ \begin{matrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_i \\ \vdots \\ U_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2j} & \dots & x_{2p} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \dots & \cdot \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{ip} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \dots & \cdot \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nj} & \dots & x_{np} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2.2)$$

On peut représenter chaque unité par le vecteur de ses mesures sur les p variables :

$$U_i = [x_{i1} \ x_{i2} \ \dots \ x_{ij} \ \dots \ x_{ip}] \text{ ce qui donne } U_i = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \cdot \\ U_i \\ \cdot \\ U_n \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Alors U_i est un vecteur de \mathcal{R}^p .

De façon analogue, on peut représenter chaque variable par un vecteur de \mathcal{R}^n dont les composantes sont les valeurs de la variable pour les n unités :

$$V_j = \begin{bmatrix} x_{1j} \\ x_{2j} \\ \cdot \\ x_{ij} \\ \cdot \\ x_{nj} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Pour avoir une image de l'ensemble des unités, on se place dans un espace affine en choisissant comme origine un vecteur particulier de \mathcal{R}^p , par exemple le vecteur dont toutes les coordonnées sont nulles. Alors, chaque unité sera représentée par un point dans cet espace. L'ensemble des points qui représentent les unités est appelé "nuage des individus".

En faisant de même dans \mathcal{R}^n , chaque variable pourra être représentée par un point de l'espace affine correspondant. L'ensemble des points qui représentent les variables est appelé "nuage des variables".

On constate, que ces espaces étant de dimension supérieure en général à 2 et même 3. On ne peut pas visualiser ces représentations. L'idée générale des méthodes factorielles est de trouver un système d'axes et de plans tels que les projections de ces nuages de points sur ces axes et ces plans permettent de reconstituer les positions des points les uns par rapport aux autres, c'est-à-dire avoir des images les moins déformées possible. **Fig.2.4**

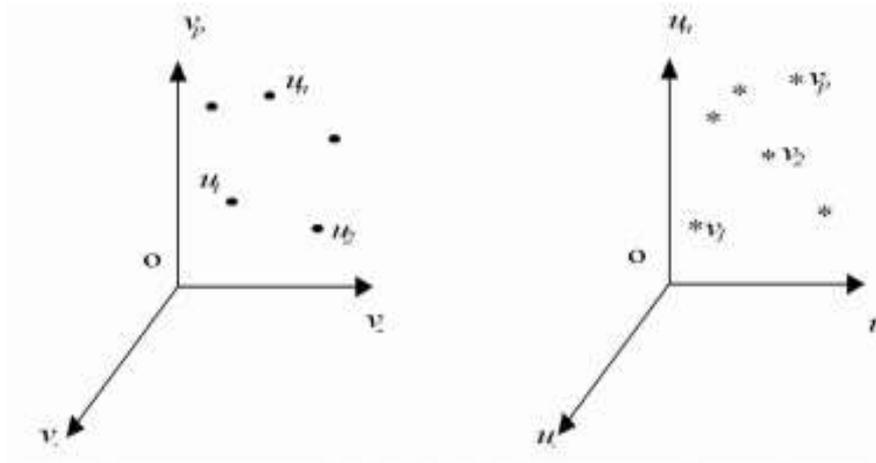


Fig.2.4 nuage des individus dans l'espace affine

2.5 Échantillon

On applique généralement l'ACP sur un ensemble de N variables aléatoires X_1, \dots, X_N connues à partir d'un échantillon de K réalisations conjointes de ces variables.

Cet échantillon de ces N variables aléatoires peut être structuré dans une matrice M , à K lignes et N colonnes.

$$M = \begin{bmatrix} X_{1,1} & \cdots & X_{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{k,1} & \cdots & X_{k,N} \end{bmatrix}$$

Chaque variable aléatoire X_n , dont $X_{1,n}, \dots, X_{k,n}$ sont des réalisations indépendantes, elle a une moyenne X_n et un écart type σ_{X_n} .

2.6 Poids

Si les réalisations (les éléments de la matrice M) sont à probabilités égales alors chaque réalisation (un élément $X_{j,n}$ de la matrice) a la même importance $1/K$ dans le calcul des caractéristiques de l'échantillon. On peut aussi appliquer un poids P_i différent à chaque réalisation conjointe des variables (cas des échantillons redressés, des données regroupées, ..). Ces poids, qui sont des nombres positifs de somme 1 sont représentés par une matrice diagonale D de taille K :

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} P1 & & & \mathbf{0} \\ & P2 & & \\ & & \ddots & \\ \mathbf{0} & & & \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

Dans le cas le plus courant de poids égaux, $\mathbf{D} = \frac{1}{K}\mathbf{I}$ où \mathbf{I} est la matrice identité.

2.7 Transformations de l'échantillon

Le vecteur $(\bar{X}_1, \dots, \bar{X}_N)$ est le centre de gravité du nuage de points ; on le note souvent g . On a $\mathbf{g} = \mathbf{M}^T \mathbf{D} \tilde{\mathbf{1}}$ où $\tilde{\mathbf{1}}$ désigne le vecteur de \mathcal{R}^K dont toutes les coordonnées sont égales à 1.

La matrice M est généralement centrée sur le centre de gravité :

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} X_{1,1} - \bar{X}_1 & \cdots & X_{1,N} - \bar{X}_N \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{k,1} - X_1 & \cdots & X_{k,N} - X_N \end{bmatrix} = \mathbf{M} \cdot \tilde{\mathbf{1}} \mathbf{g}^T \quad (2.5)$$

Elle peut être aussi **réduite** :

$$\bar{\mathbf{M}} = \begin{bmatrix} \frac{X_{1,1} - \bar{X}_1}{\sigma(X_1)} & \cdots & \frac{X_{1,N} - \bar{X}_N}{\sigma(X_N)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{X_{k,1} - X_1}{\sigma(X_1)} & \cdots & \frac{X_{k,N} - X_N}{\sigma(X_N)} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Le choix de réduire ou non le nuage de points (i.e. les K réalisations de la variable aléatoire (X_1, \dots, X_N)) est un choix de modèle :

- ✚ Si l'on ne réduit pas le nuage : une variable à forte variance va « tirer » tout l'effet de l'ACP à elle ;
- ✚ Si l'on réduit le nuage : une variable qui n'est qu'un bruit va se retrouver avec une variance apparente égale à une variable informative.

Si les variables aléatoires sont dans des unités différentes, la réduction est obligatoire.

2.8 Corrélations

Le coefficient de corrélation entre deux variables aléatoires réelles X et Y ayant chacune une variance (finie [23]), noté $Cor(X,Y)$, ou parfois ρ_{xy} , ou ρ ou simplement r , est défini par :

$$r = \frac{Cov(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \tag{2.7}$$

Où

$COV(X,Y)$ désigne la covariance des variables X et Y ,

σ_x et σ_y désignent leurs écarts types.

De manière équivalente :

$$r = \frac{E[(X-E(X))(Y-E(Y))]}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E(XY) - E(X)E(Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \tag{2.8}$$

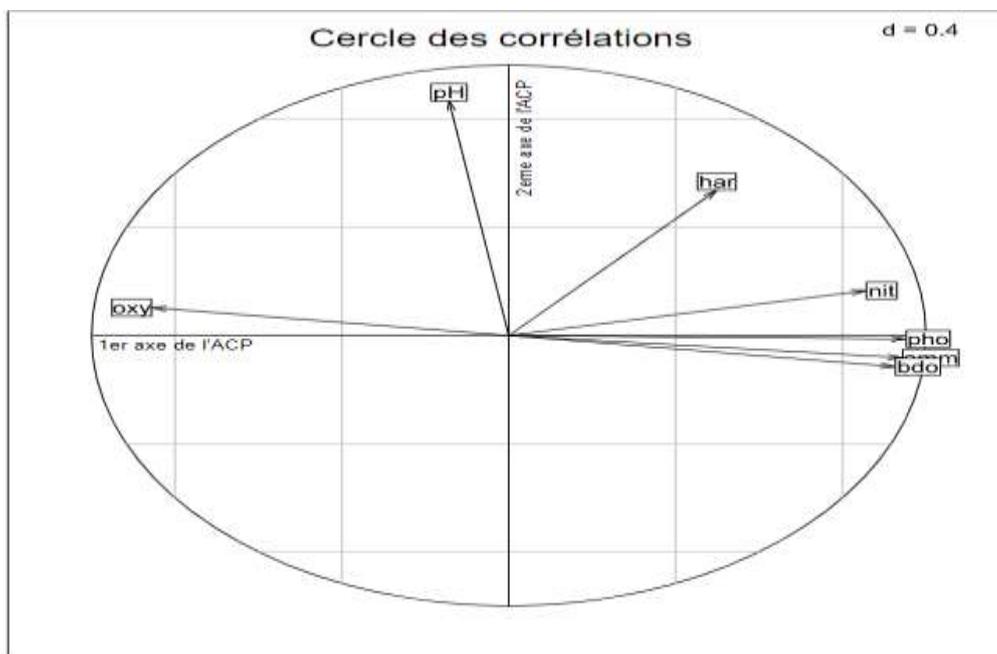


Fig.2.5 Cercle corrélations d'une ACP normée des [28]

2.9 Covariance

Statistiquement, la covariance est une mesure du degré auquel deux variables aléatoires (X, Y) changent simultanément. Si les variables ont tendance à afficher un comportement semblable, la covariance est positive. Dans le cas contraire, la covariance est négative lorsque les valeurs supérieures d'une variable correspondent principalement aux valeurs les plus petites de l'autre.

La covariance est calculée comme suit :

$$\text{COV (X,Y)} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n} \quad (2.9)$$

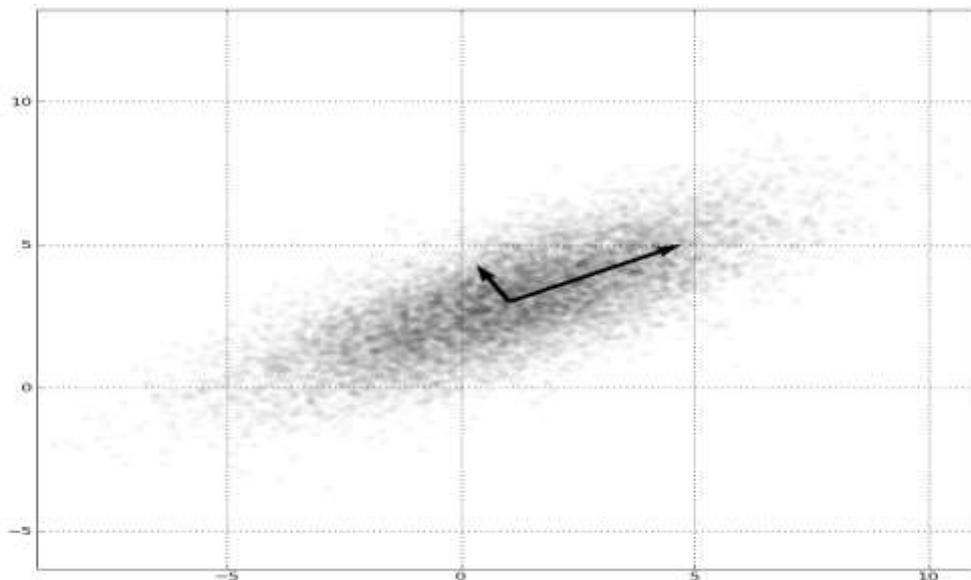


Fig.2.6 Nuage de points

2.10 Variance

En statistique et en théorie des probabilités, la **variance** est une mesure de la dispersion des valeurs d'un échantillon ou d'une distribution de probabilité. Elle exprime la moyenne des carrés des écarts à la moyenne, aussi égale à la différence entre la moyenne des carrés des valeurs de la variable et le carré de la moyenne, selon le théorème de König-Huygens. Ainsi, plus l'écart à la moyenne est grand plus il est prépondérant dans le calcul total (voir

la fonction carré) de la variance qui donnerait donc une bonne idée sur la dispersion des valeurs.

La variance est toujours positive, et ne s'annule que si les valeurs sont toutes égales. Sa racine carrée définit l'écart type σ , d'où la notation $\sigma^2 = \mathbf{V} = \mathbf{V}(\mathbf{X}) = \mathbf{VAR}(\mathbf{X})$ (2.10)

La variance est quadratique et invariante par translation. Elle peut être estimée à l'aide d'un échantillon et de la moyenne empirique ou de l'espérance si celle-ci est connue.

La variance apparaît comme un cas particulier de covariance. Elle se généralise aussi pour des vecteurs aléatoires

2.10.1 Formules de Variance

Étant donnée une série statistique d'une variable réelle (x_1, x_2, \dots, x_n) , dont on a calculé la moyenne $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, la variance est la moyenne des carrés des écarts à cette moyenne :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.11)$$

Un développement du carré mène à la reformulation suivante :

$$\mathbf{V} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \bar{x}^2 \quad (2.13)$$

Autrement dit la variance est la différence entre la moyenne des carrés et le carré de la moyenne.

Quand la série prend les valeurs x_1, x_2, \dots, x_k avec les fréquences f_1, f_2, \dots, f_n , sa variance est

$$\mathbf{V} = \sum_{i=1}^n f_i (x_i - \bar{x})^2 = \left(\sum_{i=1}^n f_i x_i^2 \right) - \bar{x}^2 \quad (2.14)$$

La variance est un indicateur de dispersion des valeurs, c'est-à-dire qu'elle est toujours positive, ne s'annule que pour une série statistique dont tous les termes ont la même valeur, elle est d'autant plus grande que les valeurs sont étalées, et invariante par ajout d'une constante. Son calcul peut sembler plus compliqué que celui d'autres indicateurs de dispersion, comme l'écart interquartile ou l'écart absolu moyen, mais contrairement à ces derniers, elle est cumulative : si on rassemble k séries statistiques en une seule, la variance

globale peut être calculée à partir de l'effectif n_i , la variance V_i et la moyenne \bar{x}_i de chaque série initiale par la formule

$$V = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k n_i (V_i + (\bar{x}_i - \bar{x})^2) \quad (2.15)$$

Où $N = \sum_{i=1}^k n_i$ est l'effectif total et $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k n_i \bar{x}_i$, est la moyenne globale. Autrement dit, la variance globale est la somme de la variance des moyennes et de la moyenne des variances, même si cette deuxième composante est souvent négligée.

2.11 Matrice de variance-covariance

La covariance de deux variables aléatoires réelles X et Y ayant chacune une variance (finie¹), notée $\text{Cov}(X, Y)$ ou parfois σ_{XY} , est la valeur :

$$\text{Cov}(X, Y) = E[(X - E(X))(Y - E(Y))] \quad (2.16)$$

Où $E(X)$ désigne l'espérance mathématique. La variance de X est donc

$$\text{Var}(X) = \text{Cov}(X, X). \quad (2.17)$$

Intuitivement, la covariance caractérise les variations simultanées de deux variables aléatoires : elle sera positive lorsque les écarts entre les variables et leurs moyennes ont tendance à être de même signe, négative dans le cas contraire.

Conformément à l'expression de sa définition, la dimension de la covariance est le produit des dimensions des variables. En revanche, la corrélation, qui s'exprime à l'aide de la variance et de la covariance, prend ses valeurs dans $[-1, 1]$ et reste adimensionnelle.

Deux variables aléatoires dont la covariance est nulle sont dites non corrélées : leur corrélation est également nulle.

Pour deux variables aléatoires discrètes X et Y prenant respectivement leurs valeurs dans deux ensembles finis

$\{x_i | 1 \leq i \leq n\}$, et $\{y_j | 1 \leq j \leq m\}$, on a

$$\text{Cov}(X, Y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_i y_j P(X = x_i \text{ et } Y = y_j) - E[X] E[Y]$$

tandis que:

$$\sigma_X^2 = \sum_{i=1}^n P(X = x_i) - E[X]^2 \quad \text{et} \quad \sigma_Y^2 = \sum_{j=1}^m P(Y = y_j) - E[Y]^2$$

La matrice de covariance d'un vecteur de p variables aléatoires $\vec{X} = \begin{pmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_p \end{pmatrix}$ dont chacune possède une variance, est la matrice carrée dont le terme générique est donné par

$$\sigma_{i,j} = \text{Cov} (X_i ,X_j) \tag{2.18}$$

La matrice de covariance, notée parfois Σ , est définie par

$$\text{VAR} (\vec{X}) = \text{E}[(\vec{X} - \text{E}(\vec{X}))(\vec{X} - \text{E}(\vec{X}))^T] \tag{2.19}$$

En développant les termes :

$$\begin{aligned} \text{Var}(\vec{X}) &= \begin{bmatrix} \text{Var} (X_1) & \text{Cov} (X_1, X_2) & \dots & \text{Cov} (X_1, X_p) \\ \text{Cov} (X_1, X_2) & \ddots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{Cov} (X_1, X_p) & \dots & \dots & \text{Var} (X_p) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \sigma_{x_1}^2 & \sigma_{x_1x_2} & \dots & \sigma_{x_1x_p} \\ \sigma_{x_1x_2} & \ddots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{x_px_p} & \dots & \dots & \sigma_{x_p}^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{2.20}$$

2.11.1 Propriétés de la covariance

$$\text{COV} (X,Y) = \text{E}(XY) - \text{E}(X)\text{E}(Y) \tag{2.21}$$

Propriétés

$$\oplus \text{COV} (X,Y) = \text{VAR} (X) \tag{2.21}$$

$$\oplus \text{COV} (X,Y) = \text{COV} (Y,X) \tag{2.22}$$

$$\oplus \text{COV} (c \times X,Y) = c \times \text{COV} (X,Y) \text{ ou } c \text{ est une constante} \tag{2.23}$$

$$\color{red}\oplus \text{COV}(\mathbf{X}+c\mathbf{Y})=c\times\text{COV}(\mathbf{X},\mathbf{Y}) \text{ ou } c \text{ est une constante} \quad (2.24)$$

$$\color{red}\oplus \text{COV}(\mathbf{X}+\mathbf{Y})=\text{COV}(\mathbf{X},\mathbf{Z})+\text{COV}(\mathbf{Y},\mathbf{Z}) \text{ ou } \mathbf{X}, \mathbf{Y} \text{ et } \mathbf{Z} \text{ sont trois variables} \quad (2.25)$$

2.12 Valeurs Propres

Les valeurs propres sont des nombres caractérisant une matrice. Ces nombres sont importants car, associés à leur vecteurs propres, ils permettent d'exprimer la matrice sous une forme simplifiée, ce qui facilite les calculs.

Pour toute matrice carrée \mathbf{M} de taille $\mathbf{m}\times\mathbf{m}$ (2x2, 3x3, 4x4, etc.), le caractère lambda λ est donné à une valeur propre associée au vecteur propre \mathbf{v} si $\mathbf{M}\cdot\mathbf{v}=\lambda\mathbf{v}\Leftrightarrow(\mathbf{M}-\lambda\mathbf{I}_m)\cdot\mathbf{v}=\mathbf{0}$ avec \mathbf{I}_m la matrice identité (de taille m).

En pratique, les valeurs propres de la matrice \mathbf{M} sont les racines de son polynôme caractéristique P . [29]

2.13 Qualité de représentation

Pour les mêmes raisons qui ont poussé à se préoccuper de la qualité de la représentation des individus, il faut se préoccuper de la qualité de la représentation des variables sur un axe, un plan ou un sous-espace. Une variable sera d'autant mieux représentée sur un axe que sa corrélation avec la composante principale correspondante est en valeur absolue proche de 1. En effet le coefficient de corrélation empirique entre une ancienne variable \mathbf{V}_j et une nouvelle variable \mathbf{Z}_k n'est autre que le cosinus de l'angle du vecteur joignant l'origine au point \mathbf{v}_j représentant la variable sur l'axe avec cet axe. Une variable sera bien représentée sur un plan si elle est proche du bord du cercle des corrélations, car cela signifie que le cosinus de l'angle du vecteur joignant l'origine au point représentant la variable avec le plan est, en valeur absolue, proche de 1, etc.

Une fois les axes interprétés, on peut regarder les graphiques et analyser plus finement les proximités entre points.

$\color{red}\oplus$ Les proximités entre points observées sur un axe ou un plan factoriel doivent correspondre à la réalité (et non être artificiellement créées par l'opération de projection).

$\color{red}\oplus$ Pour pouvoir interpréter les proximités entre points, il faut qu'ils soient bien représentés sur l'axe ou le plan en question

Un point est dit bien représenté sur un axe ou un plan factoriel si il est proche de sa projection sur l'axe ou le plan. S'il est éloigné, on dit qu'il est mal représenté. Indicateur = angle formé entre le point et sa projection sur l'axe[31]

2.13.1 Qualité de représentation de l'individu i sur l'axe k

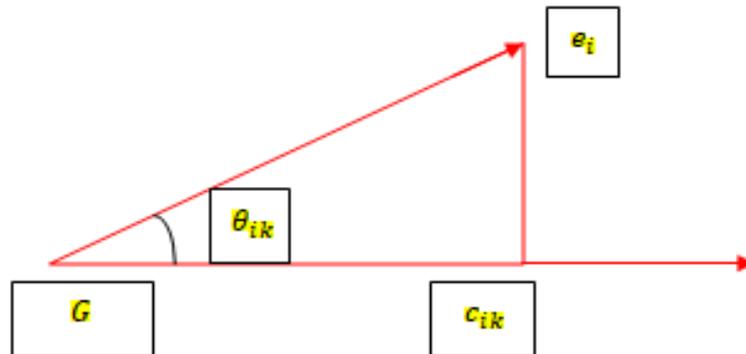


Fig.2.7 Qualité de représentation de l'individu i sur l'axe k

$$q_{lt}_k(e_i) = \cos^2(\theta_{ik}) = \frac{c_{ik}^2}{\|e_i\|^2} \quad (2.26)$$

$$\|e_i\|^2 = \sum_{k=1}^p c_{ik}^2 \quad (2.27)$$

Lorsque l'angle est proche de 0, c'est-à-dire que le cosinus est proche de 1, l'individu est bien représenté. Dans le cas inverse, l'angle est proche de 90° et le cosinus est proche de 0.

2.13.2 Qualité de représentation de la variable j sur l'axe k

$$q_{lt}_k(X_j) = \cos^2(\theta_{kj}) = \frac{d_{jk}^2}{\|X_j\|^2} \quad (2.28)$$

En ACP normée :

$$q_{lt}_k(X_j) = d_{jk}^2 = r^2(C_k, X_j) \quad (2.29)$$

- ✚ Une variable est d'autant mieux représentée sur un axe qu'elle est proche du bord du cercle des corrélations et de l'axe, d'autant plus mal représentée qu'elle est proche de l'origine.
- ✚ Les variables qui contribuent le plus à l'axe sont aussi celles qui sont le mieux représentées et inversement, donc pas besoin d'étude spécifique de la représentativité.[32]

2.13.3 Qualité de représentation sur un plan factoriel

La qualité de représentation est selon deux types :

- ✚ **Individus** : Le cosinus carré est additif sur des sous-espaces orthogonaux. La qualité de représentation sur le plan défini par les axes k et l est égale à :

$$q_{lt_{ki}}(e_i) = q_{lt_k}(e_i) + q_{lt_l}(e_i)$$
- ✚ **Variables**: En ACP normée, on interprète les proximités de variables bien représentées sur le plan i.e. proches du bord du cercle de corrélations

2.14 Composantes principales

À chaque axe est associée une variable appelée composante principale. La composante c_1 est le vecteur renfermant les coordonnées des projections des individus sur l'axe 1. La composante c_2 est le vecteur renfermant les coordonnées des projections des individus sur l'axe 2. Pour obtenir ces coordonnées, on écrit que chaque composante principale est une combinaison linéaire des variables initiales[33].

Exemple :

$$c^1 = u_1^1 x^1 + u_2^1 x^2 + \dots + u_p^1 x^p$$

Propriétés des composantes principales

La variance d'une composante principale est égale à l'inertie portée par l'axe principal qui lui est associé.

- ✚ 1^{ère} composante **C1** : variance λ_1
- ✚ 2^{ème} composante **C2** : variance: λ_2
- ✚ 3^{ème} composante **C3** : variance λ_3

2.15 Représentation des individus

La 3^{ème} composante principale

$$c^j = \begin{pmatrix} c_1^j \\ c_2^j \\ \vdots \\ c_n^j \end{pmatrix}$$

Cordonnées des n individus sur le 3^{ème} axe principal

Si on désire une représentation plane des individus, la meilleure sera celle réalisée grâce aux deux premières composantes principales[33].

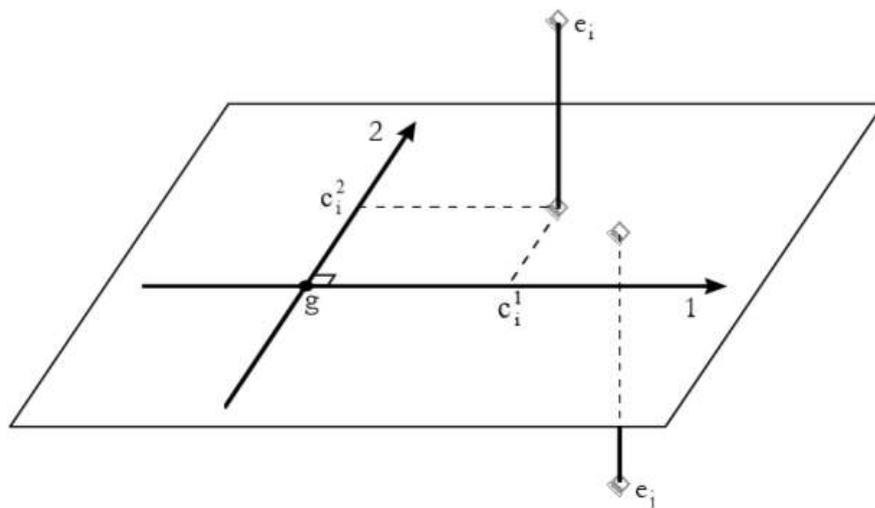


Fig.2.8 représentation de chaque individu[33]

2.16 Représentation des variables à l'aide du coefficient de corrélation

Le cercle des corrélations est la projection du nuage des variables sur le plan des composantes principales

Les variables bien représentées sont celles qui sont proches du cercle, celles qui sont proches de l'origine sont mal représentées **Fig.2.10**

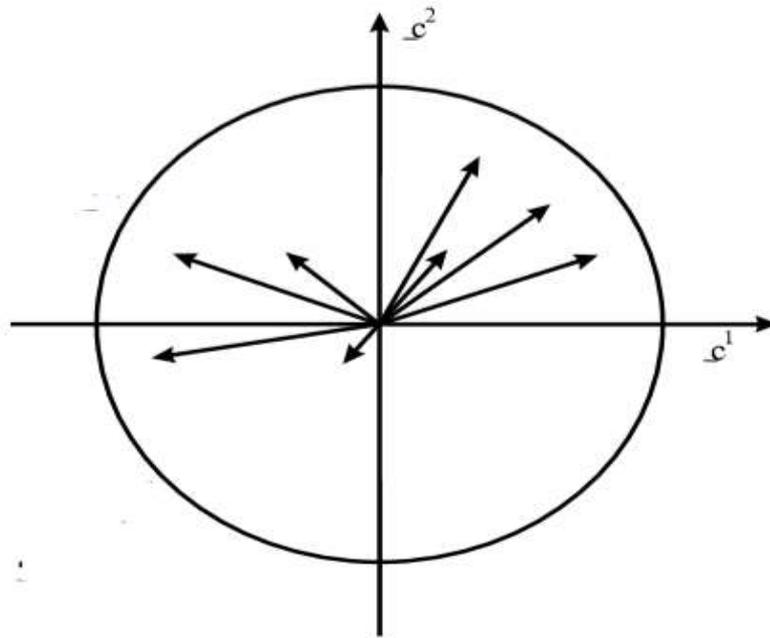


Fig.2.9 Le cercle des corrélations

2.17 Interprétation externe : variables et individus supplémentaires

2.17.1 Variables

Variable quantitative:

On calcule le coefficient de corrélation entre la variable supplémentaire et les composantes principales. Ceci permet sa représentation sur le cercle des corrélations.[\[34\]](#)

Ceci permet sa représentation sur le cercle des corrélations.

Calcul du rapport de corrélation entre la variable qualitative supplémentaire et chaque composante principale (test de Fischer-Snedecor) ou valeur-test dans SPAD

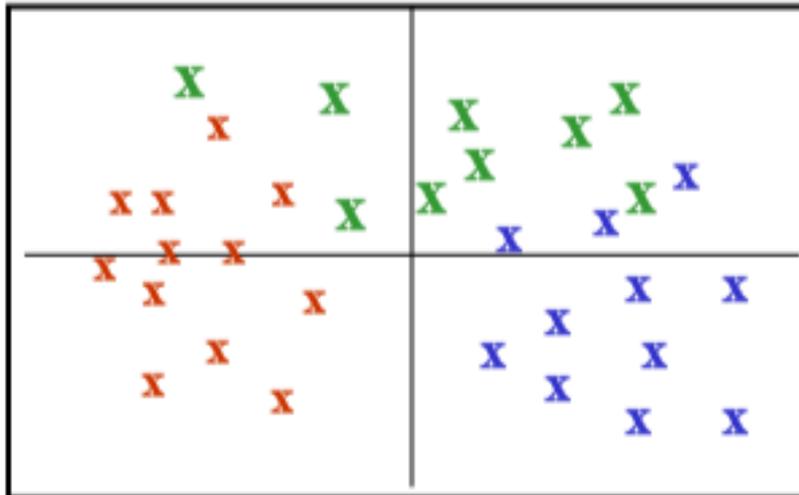


Fig.2.10 Identification des individus de chaque catégorie de la variable

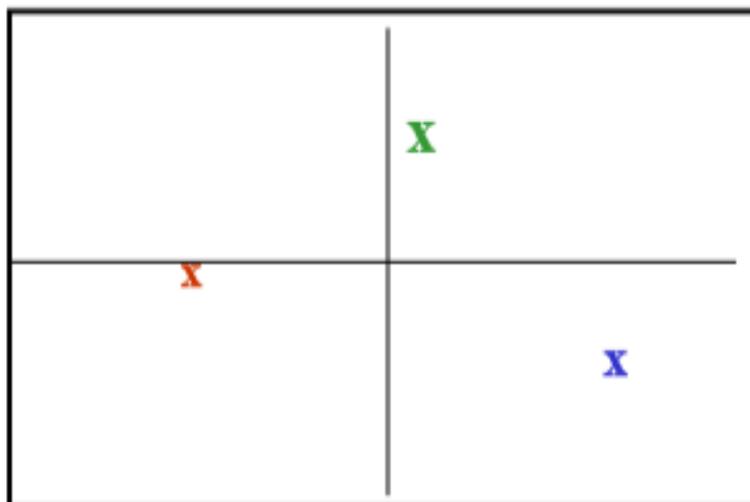


Fig.2.11 Représentation de chaque catégorie par son centre de gravité.

✚ Individus :

Individu de poids nul ne participant pas à l'analyse (fichier test).

Appliquer aux coordonnées de l'individu les expressions définissant les composantes principales

2.18 Exemple illustratif

Nous avons la matrice M indiquée dans le tableau suivant :

Etape1

X1*	X2*	X3*	X4*	X5*
2.5	2.4	4.3	2	0.3
0.5	0.7	0.5	7	1.0
2.2	2.9	2.7	2	2
1.9	2.2	2.51	1.2	2.12
3.1	3.0	3.01	3.20	3.0
2.3	2.7	2	2.8	1.6
2.0	1.6	3.6	3	1.3
1.0	1.1	3.1	4.1	0.2
1.5	1.6	0.26	0.6	1.8
1.1	0.9	0.77	0.5	0.12
2.3	7.3	8.02	1.2	7
3.5	1.3	1	0.2	0.3

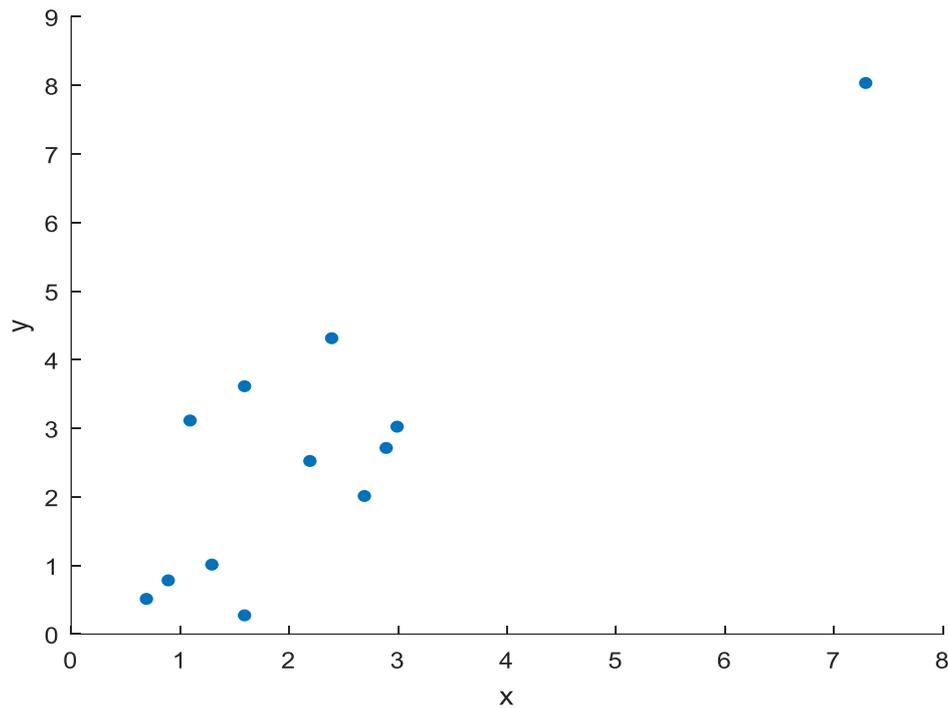


Fig.2.12 Représentation des points de la matrice (M)

Etape 2

Calcule de la moyenne :

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n} : n \text{ Représente le nombre de variables (x)..1}$$

$$\bar{y} = \frac{\sum y}{n} : n \text{ Représente le nombre de variables (y)..2}$$

$$\text{De 1 et 2 : } \begin{cases} \bar{x} = 1.81 \\ \bar{y} = 1.91 \end{cases}$$

En utilisant moyenne Les éléments existants et préexistants dans le tableau seront basés sur la relation suivante En créant une nouvelle matrice comme moyenne :

$$\begin{cases} X1 = X1^* - \bar{x} \\ X1 = X2^* - \bar{y} \dots\dots\dots(3) \end{cases}$$

En utilisant la relation (3) nous allons centrage les points et les noter dans le tableau suivant :

On en déduit la nouvelle matrice \mathbf{X} :

X1	X2	X3	X4	X5
-13.8	-3.0	0.9	1.5	-0.1
-15.8	-4.7	-2.8	6.5	0.5
-14.1	-2.5	-0.6	1.5	1.5
-14.4	-3.2	-0.8	0.7	1.6
-13.2	-2.4	-0.3	2.7	2.5
-14	-2.7	-1.3	2.3	1.1
-14.3	-3.8	0.2	2.5	12.5
-15.3	-4.3	-0.2	3.6	-0.2
-14.8	-3.8	-3.0	0.1	1.3
-15.2	-4.5	-2.5	0.0	-0.3
-14	1.8	4.6	0.7	6.5
-12.8	-4.1	-2.3	-0.2	-0.1

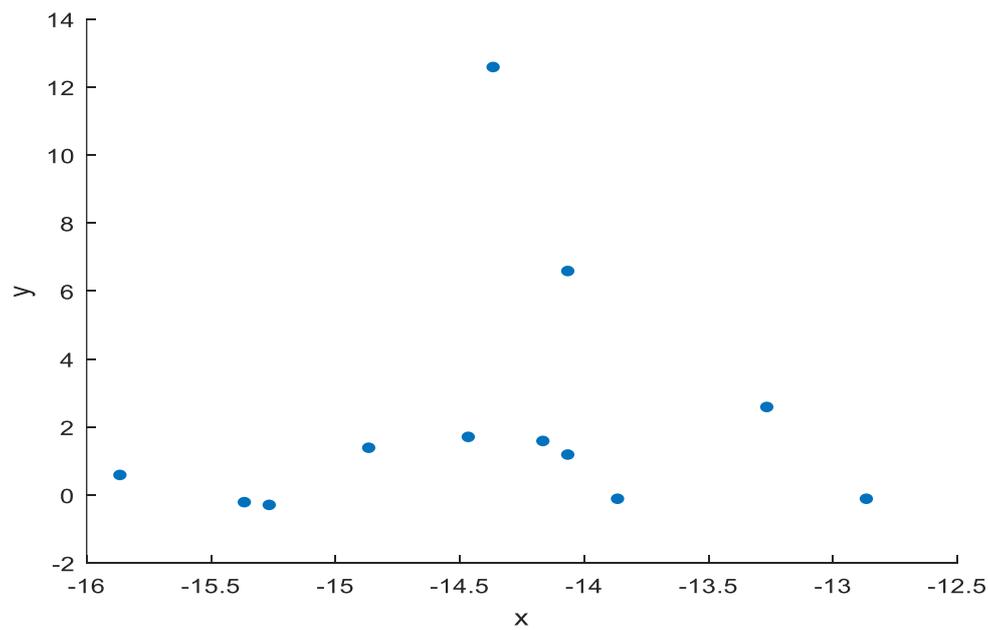


Fig.2.13 Représentation des points de la matrice (X)

Calcul de la matrice de variance-covariance de l'échantillon C :

Notez que les données (ajustées) définies auront des moyens zéro : $\bar{X} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$

$$C = \frac{1}{N-1} (X - \bar{X})' (X - \bar{X}) = \frac{1}{N-1} X'X \quad : N = \text{Nombre de variables} = 10$$

$$C = \begin{pmatrix} 0.7 & 0.5 & 0.5 & -0.8 & 0.3 \\ 0.5 & 3.0 & 3.2 & -0.8 & 2.3 \\ 0.5 & 3.2 & 4.2 & -0.3 & 3.9 \\ 0.8 & 0.8 & 0.3 & 3.6 & 0.3 \\ 0.3 & 2.3 & 3.9 & 0.2 & 14 \end{pmatrix}$$

Nous allons représenter la matrice M et la matrice X avec les points bleus représentant les points M et les points verts X, dans **Fig.2.14**

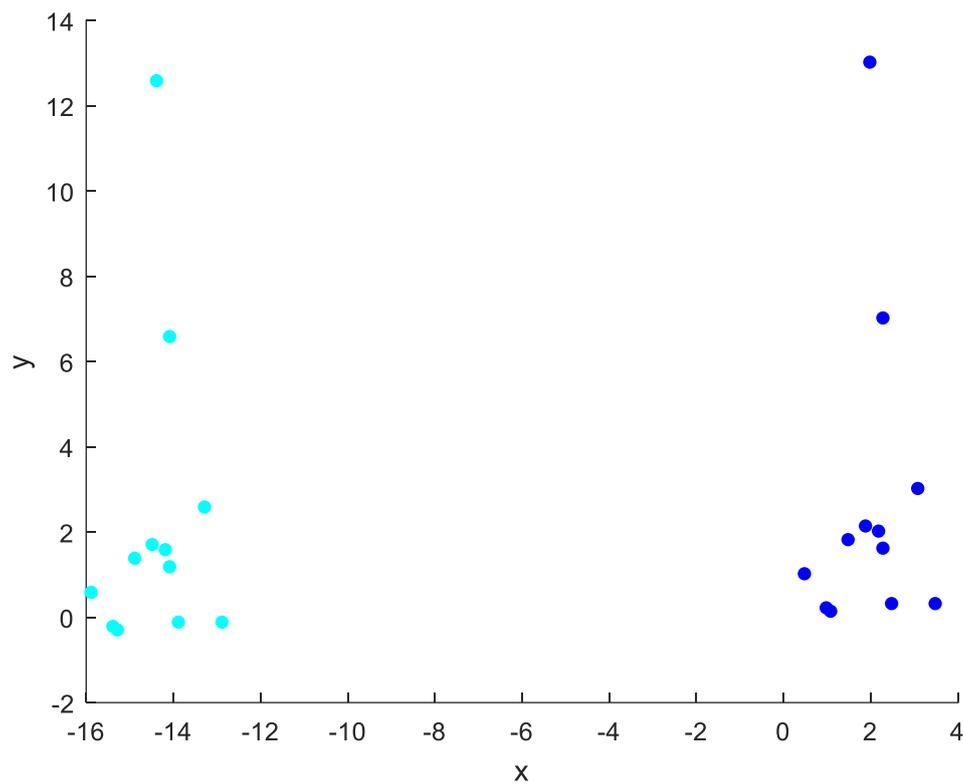


Fig.2.14 Représentation des points de la matrice (X) et (M)

Etape 3

Calcule des valeurs propres λ_i , et des vecteurs propres (non ou normalisés) e_i de C , ordonner les paires correspondantes des valeurs propres les plus élevées aux valeurs propres les plus basses

Trouver des valeurs propres en résolvant : $\det(C - I\lambda)$

$$\rightarrow \left(\begin{pmatrix} 0.7 & 0.5 & 0.5 & -0.8 & 0.3 \\ 0.5 & 3.0 & 3.2 & -0.8 & 2.3 \\ 0.5 & 3.2 & 4.2 & -0.3 & 3.9 \\ 0.8 & 0.8 & 0.3 & 3.6 & 0.3 \\ 0.3 & 2.3 & 3.9 & 0.2 & 14 \end{pmatrix} - \begin{bmatrix} \lambda & 0 \\ \lambda & 0 \end{bmatrix} \right) = 0$$

$$\lambda_1 = 0.37, \lambda_2 = 0.32, \lambda_3 = 0.4, \lambda_4 = 0.2, \lambda_5 = 0.04$$

Trouver un vecteur propre en résolvant $\sum e_i = \lambda_i e_i$

e_1	e_2	e_3	e_4	e_5
-1.49	2.1	0.8	0.0	-1.1
-2.8	-3.8	3.2	0.02	0.6
-0.44	0.8	0.00	0.1	.03
-0.58	0.6	-0.8	-0.3	-0.05
0.6	0.2	0.8	1.27	0.04
-1.12	0.1	0.4	0.6	0.55
9.37	-4.2	-1.4	-0.04	-0.5
-2.44	-0.5	2.1	0.7	-0.9
-1.86	-0.05	-2.3	-1.08	0.8
-3.36	4.52	-1.9	-0.42	0.09
7.09	0.78	1.4	1.06	0.6
-2.9	3.2	-2.4	0.3	-0.44

Etape 4

Calcul de la qualité de représentation

La variance totale = $Q_j = \frac{\sum_{i=1}^j \lambda}{\sum_{i=1}^N \lambda} \geq 10\%$

$Q_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5} = 0.2781 = 27.81\% > 10\%$ Et de là : Cette solution est acceptable

$Q_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5} = 0.2406 = 24.06\% > 10\%$ Et de là : Cette solution est acceptable

$Q_3 = \frac{\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5} = 0.3007 = 30.07\% > 10\%$ Et de là : Cette solution est acceptable

$Q_4 = \frac{\lambda_4}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5} = 0.1503 = 15.03\% > 10\%$ Et de là : Cette solution est acceptable

$Q_5 = \frac{\lambda_5}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5} = 0.0306 = 3.06\% < 10\%$ Et de là : Cette solution n'est pas acceptable

On peut prouver que: **variance totale de l'échantillon = somme des valeurs propres**

par ce processus, nous pourrions extraire des lignes qui caractérisent les données.

Le premier vecteur propre passera par le milieu des points de données, comme s'il s'agissait de la ligne de meilleur ajustement.

Le deuxième vecteur propre nous donnera l'autre modèle, moins important, dans les données.

Suivez la ligne principale, mais êtes sur le côté de la ligne principale d'un certain montant.

tableau2.1 Valeurs propres et Pourcentages de la variance totale

Variable	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5
valeurs propres	$\lambda_1 = 0.37$	$\lambda_2 = 0.32$	$\lambda_3 = 0.4$	$\lambda_4 = 0.2$	$\lambda_5 = 0.04$
% de la variance totale	27.81%	24.06%	30.07%	15.03%	3.06%

Trouver la matrice de transformation V basée sur la sélection de PCs

Alors dans cet exemple, nous pouvons soit

Sélectionnez les vecteur propre dont la lignée était supérieure à, $> 10\%$ Voir le [tableau2.1](#)

Ou Identifier tous les éléments vecteur propre

Etape5

Soit V la matrice de tous les éléments vecteur propre, dériver le nouvel ensemble de données en prenant $Y = MV$

Fondamentalement, nous avons transformé nos données afin qu'elles soient exprimées en termes de modèles entre eux où les modèles sont les lignes qui décrivent le plus étroitement les relations entre les données $Y = MV$

Y1*	Y2*	Y3*	Y4*	Y5*	Y6*	Y7*	Y8*	Y9*	Y10*	Y11*	Y12*
4.0.7	-2.1	1.3	-4.9	8.1	0.63	7.04	-0.08	-16.6	-19	34.2	-13.5
-0.07	-1.6	1.9	-2.8	9.8	4.5	0.1	-6.9	-4.7	-10.2	5.1	4.9
2.8	-7.3	2.3	-2.7	6.8	1.2	3.4	-4.5	-11.14	-14.77	33.1	-9.3
1.4	-4.3	1.8	-2.5	5.3	1	3.7	-3.3	-9.2	-12.47	27.6	-9.5
0.7	-8.6	2.5	-3.9	9.2	1.7	10.39	-7.9	-13.2	-19.6	40.5	-11..8
2.1	-9.4	2.1	-2.5	7.2	1.1	6.3	-6.4	-10.3	-14.6	31.3	7.11
-11.9	8.4	4.9	-5.1	8.8	8.4	-0.42	-12.3	-2.7	-15.8	33.6	-15.8
0.7	3.2	1.3	-4.1	8.6	-0.01	0.08	0.21	-11.3	-13.8	15.3	-5.22
3.29	-8.44	1.2	-0.4	2.3	-0.43	5.93	-6.01	-2.01	-6.1	19.14	-3.8
-0.78	-4.02	0.3	-0.9	2.1	6.2	5.3	-2.01	-4.4	-5.7	12.8	-3.8
-1.95	-4.17	7.3	-4.3	11.3	-3.06	-24.3	0.3	-21.4	-24.2	65.1	-22.1
0.3	-11.5	-0.3	-2.2	3.5	-0.6	25.7	-7.5	-9.4	-13.9	32.2	-11.4

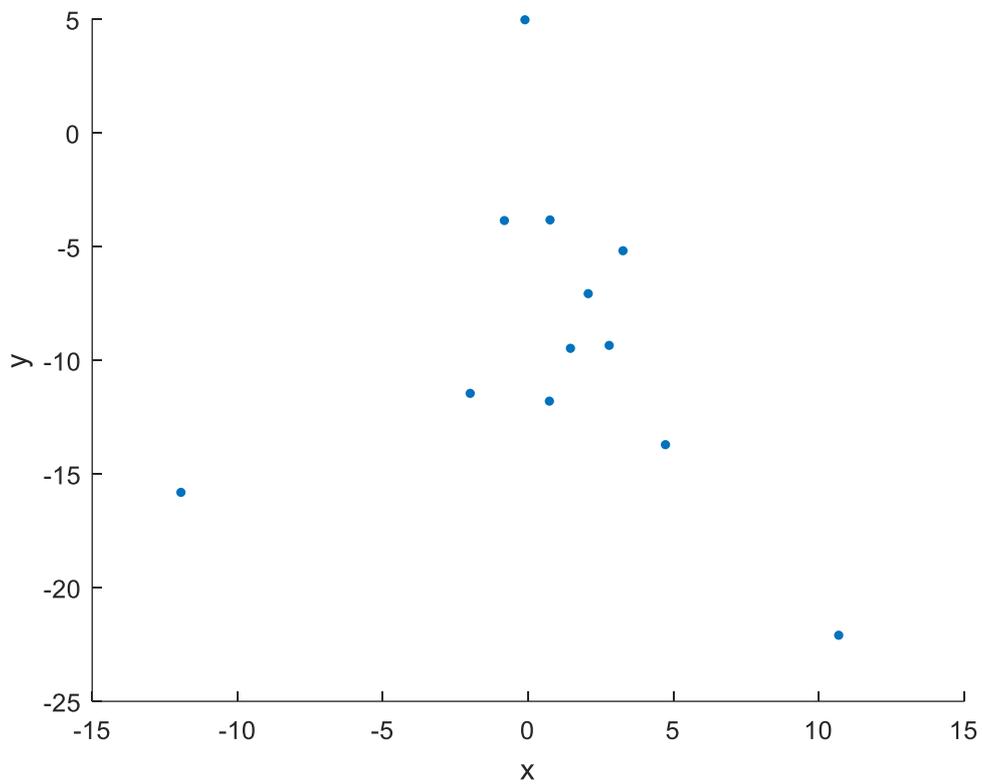


Fig.2.15 Représentation des points de la matrice (Y)

Soit Y1 la nouvelle matrice construite à partir des composantes principales. On sélectionne les vecteur propre dont la lignée était supérieure à, > 10%

$Y1 = MV1$

	Y1	Y2	Y3	Y5	Y6
.	7.98	44.9	66.14	-2.4	161.03
Y1 =	10.63	32.9	32.92	-28.9	-23.32
	-5.71	8.2	8.28	30.63	-7.85
	5.089	0.86	0.86	1.37	0.0577

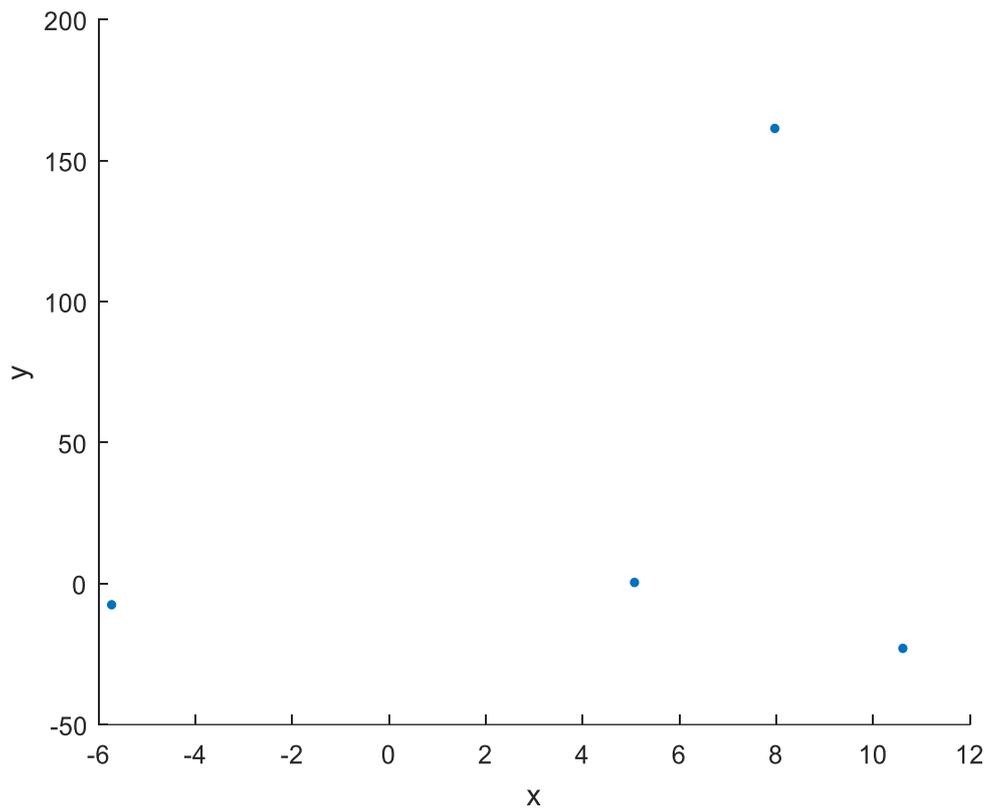


Fig.2.16 Représentation des points de la matrice (Y1)

2.19 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la méthode d'analyse en composantes principales ACP, à savoir son principe, les outils de calcul mathématiques (covariance, variance, valeurs propres, vecteurs propres et qualité de représentation) et un exemple illustratif pour bien montrer son efficacité dans la réduction de dimension d'espace. On va utiliser cette méthode dans le chapitre suivant comme un moyen de diagnostic de défauts de la machine asynchrone



Chapitre 3

*Application de la méthode
d'analyse en composantes
principales (ACP) au diagnostic de
la machine asynchrone*

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous appliquerons la méthode d'analyse en composantes principales que nous avons observée au chapitre 2, afin de diagnostiquer les différents dysfonctionnements de la machine asynchrone décrits au chapitre 1.

Dans un premier temps, dans ce chapitre, nous remarquerons la représentation des différents défauts de la machine asynchrone et l'extraction de ces données sous la forme d'une matrice qui comprend tous les points nécessaires à une étude, méthode d'analyse des principaux composants nous permettra de diviser ces données en plusieurs parties pour nous faciliter l'étude du diagnostic et donner des signaux clairs et différents, plus précis et moins de points.

3.2 Description du procédé

3.2.1 Présentation du banc moteur

Les données du banc d'essai utilisées dans cette thèse sont celles du laboratoire génie électrique Biskra (LGEB), site université Biskra, Algérie (données fournies par [Leb 07]). Le banc est composé d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil Leroy Somer LS132S, IP 55, classe F, T°C normalisée = 40°C, régime nominal S1. Ce moteur est caractérisé par :

- ✚ La tension nominale entre phases : 400 V
- ✚ La fréquence d'alimentation : 50 Hz
- ✚ La vitesse nominale : 1440 tr/min
- ✚ La puissance utile nominale : 3 kW
- ✚ Le facteur de puissance : $\cos\phi = 0.84$
- ✚ Le courant nominal : 6,4 A
- ✚ Le nombre de paires de pôles : $p = 2$
- ✚ Le nombre d'encoches au rotor $N_r = 28$
- ✚ Le nombre d'encoches au stator $N_s = 48$

Les enroulements du stator sont couplés en étoile. La charge se compose d'une machine CC et d'une banque de résistances. À l'armature, la machine CC peut fournir jusqu'à 60 A à environ 115 V, ou près de 7 kW à 2800 tr / min. La résistance de l'armature est de 214 W m. La figure suivante montre le banc d'essai moteur utilisé..

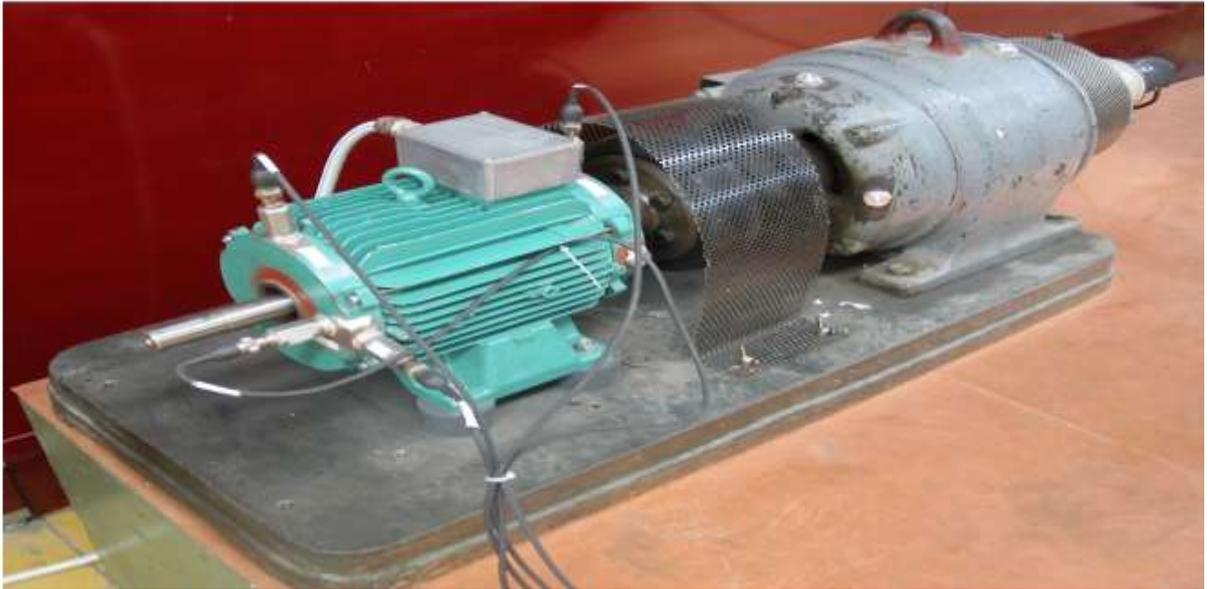


Fig.3.1 Moteur accouplé à sa charge

3.2.2 Acquisitions des données

Les signaux enregistrés par le système d'acquisition sont :

- ✚ les trois courants d'alimentation de la machine
- ✚ Les signaux ont été enregistrés, au cours des différents modes de fonctionnement, à l'aide d'un système d'acquisition Gould Nicolet Odyssey équipé d'une carte spatiale 1104. Ce système d'acquisition utilisé pour mesurer ces signaux possède:
 - ✚ Huit entrées différentielles appelées canaux rapides pouvant être échantillonnées jusqu'à 10 kHz sur 14 bits. Ces entrées étaient utilisées pour mesurer les tensions et les courants.
 - ✚ Huit entrées en mode commun appelées voies lentes sur lesquelles la fréquence d'échantillonnage peut atteindre 1 MHz sur 16 bits. L'une de ces entrées a été utilisée pour mesurer la vitesse de rotation.

le taux d'échantillonnage peut atteindre 1 MHz sur 16 bits. L'une de ces entrées a été utilisée pour mesurer la vitesse de rotation.

La **Fig.3.2** montre l'appareil configuré pour l'acquisition du signal: charge de la machine et unité d'acquisition du signal

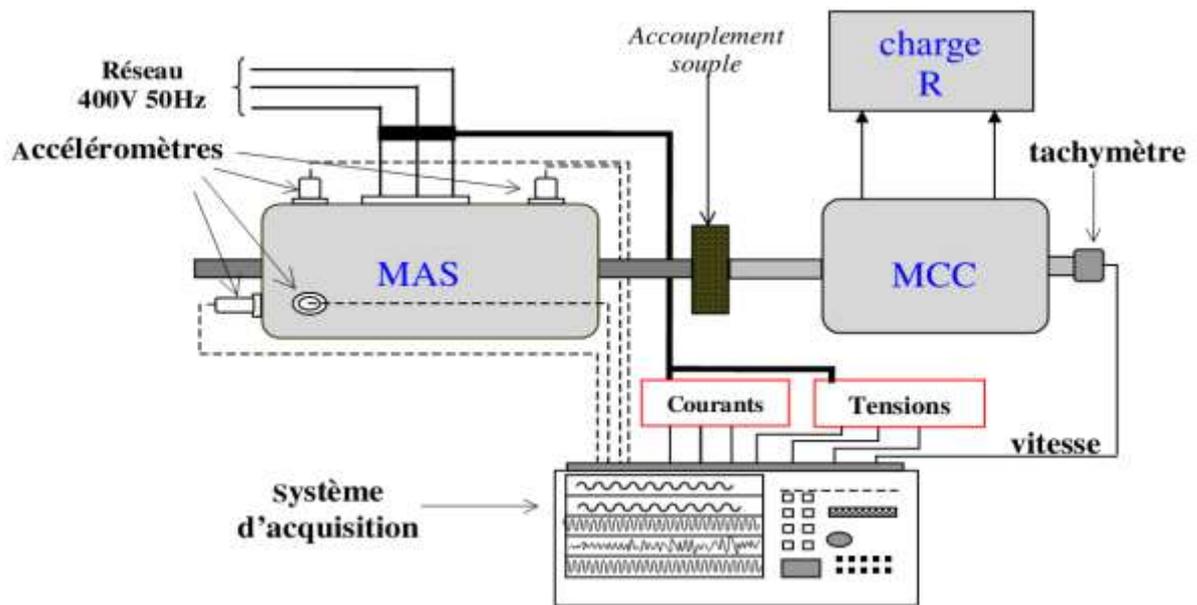


Fig.3.2 Système d'acquisition des signaux

Toutes les acquisitions ont été effectuées en régime permanent pendant une période de 10 secondes, avec une fréquence d'échantillonnage de 10 kHz. C'est 100 000 points pour chacun des signaux mesurés. Pour le traitement (notamment la fréquence) des signaux, il faut prendre un certain nombre de points en $2N$. Les signaux sont filtrés, avant le calcul spectral, par un filtre passe-bas numérique.

L'ensemble d'acquisition de données est composé de 9 signaux de courant statorique enregistrés sur les différents niveaux de charge normalisés (0%, 50% et 100%). Différents modes de fonctionnement de la machine ont été considérés, à savoir:

- ✚ La machine saine.
- ✚ Défaut stator.
- ✚ Défaut rotor.

3.3 Présentation de la base de signaux utilisée

3.3.1 Elaboration d'une base de signaux

Cette étape consiste à construire une base de signaux dans laquelle chaque signal correspond à un courant de stator dans une phase. Il existe trois modes de fonctionnement de la machine. Le premier mode correspond au bon fonctionnement de la machine avec des vitesses de chargement différentes. 9 signaux sont alors générés (3 courants de phase pour chaque taux de charge). Le deuxième mode correspond à la défaillance provoquée par la rupture des barres sur le rotor. Une barre cassée avec des vitesses de chargement différentes

est considérée. Ce mode de fonctionnement est donc représenté par 9 signaux. Le troisième mode de fonctionnement est lié au défaut de court-circuit créé au niveau du stator. Le taux de court-circuit à considérer est de 5%. Ce type de défaut est représenté en base par 9 signaux.

Les différents modes de fonctionnement utilisés pour constituer l'ensemble d'apprentissage et les ensembles de test. Ces modes de fonctionnement, qui ont servi à valider la procédure de diagnostic, sont listés dans le **Tableau.3.1**.

Chacun d'eux sera présenté par une classe dans l'espace de décision, les pannes ont été créées simultanément avec le rotor avec différents niveaux de charge.

Tableau.3.1 Les différents modes de fonctionnement

Mode de fonctionnement	Types de défauts	Taux de charge	Nombre de signaux
Machine saine	Aucun défaut	(0%, 50%, 100%)	9
2 barres cassées	Défaut rotor (barres cassées)	(0%, 50%, 100%)	9
5% de court-circuit	Défaut stator (court-circuit)	(0%, 50%, 100%)	9

3.3.2 Normalisation des données

Pour rendre la prise de décision plus facile et plus efficace, les données de sortie sont standardisées. En effet, préalablement à cette normalisation, un mode de fonctionnement a une large diffusion de ses vecteurs du fait de la fluctuation de la charge. Ce mode de fonctionnement est représenté par plusieurs classes dans X_{ap} . Ces différentes classes correspondent à différents niveaux de charge de la machine. Par standardisation, c'est-à-dire en dépassant cet état de charge, un mode de fonctionnement est représenté par une seule classe qui résume toutes les fluctuations de charge. Décrivons simplement cette approche:

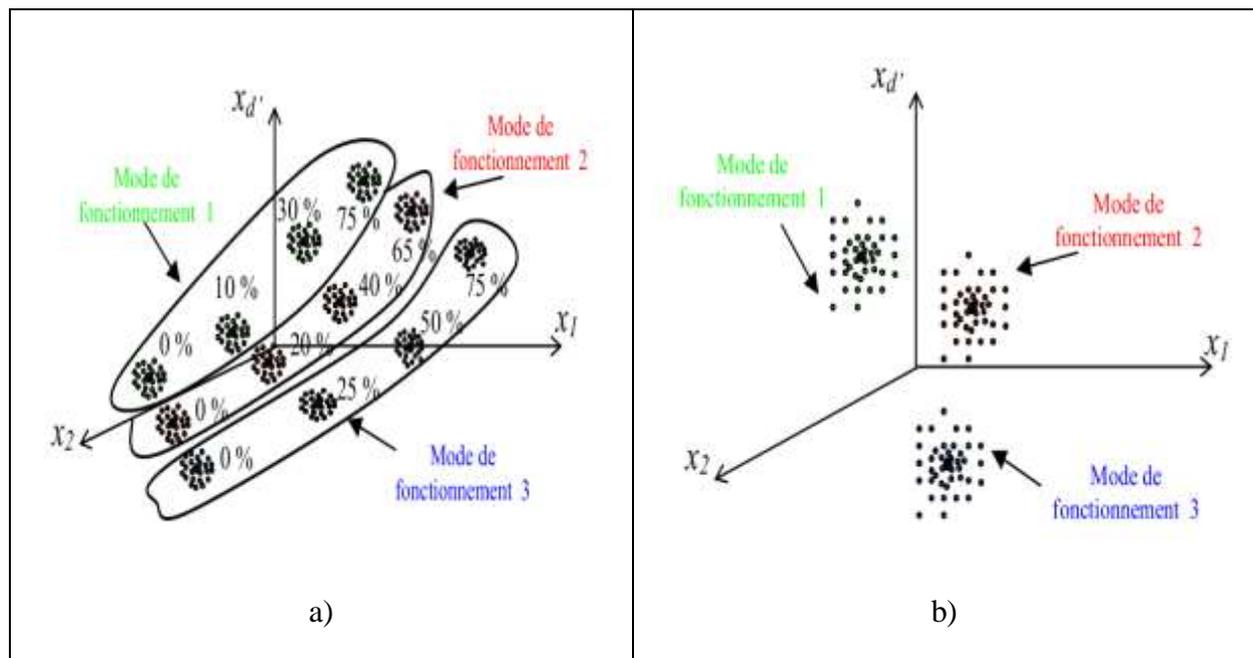


Fig.3.3 Représentation schématique de modes de fonctionnement a) dépendant du niveau de charge b) indépendant du niveau de charge

La **Fig.3.3** a) montre trois modes de fonctionnement différents. Chaque mode se compose de quatre classes, qui correspondent à 4 niveaux de charge. Le but est de garder la configuration de la figure 3.3 b) libre de l'état de charge.

Pour ce faire, les données sont normalisées par la valeur d'amplitude de base de chaque signal mesuré. On obtient ainsi les signaux suivants qui sont utilisés pour calculer les paramètres du vecteur de forme (signatures de défaut):

- Trois flux standardisés

$$Ia_n = \frac{Ia}{Ia_1} ; Ib_n = \frac{Ib}{Ib_1} ; Ic_n = \frac{Ic}{Ic_1} \quad (3.1)$$

L'indice 1 représente la valeur de la 1ère harmonique.

Cette normalisation peut conduire à un meilleur diagnostic. Tous les niveaux de charge (0 à 100%) ne peuvent pas être caractérisés pour chaque mode de fonctionnement, ce qui signifie que le bloc d'apprentissage X_{ap} ne peut pas être complet. Cependant, si une nouvelle mesure

est effectuée dans le système pour un niveau de charge qui n'est pas défini pour ce mode, cette mesure peut être rejetée par la règle de décision. Avec la normalisation, ce mode de fonctionnement est représenté par une seule classe quel que soit le niveau de charge. La nouvelle mesure peut être influencée et non rejetée.

Grâce à cette standardisation, la seule évolution possible entre les classes est due aux différents types d'erreurs et à leur gravité.

Il est important de noter que pour la suite de l'étude, les données utilisées sont la moyenne nulle et l'écart type de 1 (homogénéité des paramètres du vecteur de forme), c'est-à-dire les données «centrales». Ils sont standardisés en ce qui concerne le chargement.

3.4 Extraction des paramètres

Cette phase implique la caractérisation des signaux issus des courants statoriques à l'aide d'une série de paramètres. Il est donc extrait des trois courants qui circulent à travers les trois phases de la machine pour chaque mode de fonctionnement de la machine (en panne ou en panne). Paramètres du stator. Ces paramètres sont déterminés à l'aide des représentations de fréquence.

Plus précisément, nous avons divisé les signaux de base en segments (intervalles) de 2048 points chacun pour chaque mode de fonctionnement. Pour chaque segment d'une phase, nous avons des paramètres.

3.4.1 Paramètre dans le domaine temporel

Nous avons extrait 30 paramètres pour chaque partie des signaux de base. Ces paramètres ont été calculés en tenant compte de $N = 2048$ échantillons de chaque portion du signal.

Une enquête se concentre sur le développement des signaux primaires au fil du temps. La capacité est modifiée en présence de faisceaux réfractés, ainsi que les courants statorique et rotorique en cas de panne, de sorte que les figures suivantes montrent la distribution temporelle des courants en cas de panne, par rapport au fonctionnement sain.

Nous simulerons les différents défauts de la machine asynchrone afin qu'à chaque fois nous changerons la charge sur la machine asynchrone pour nous donner différentes courbes qui sont proches d'être des fonctions sinusoïdales.

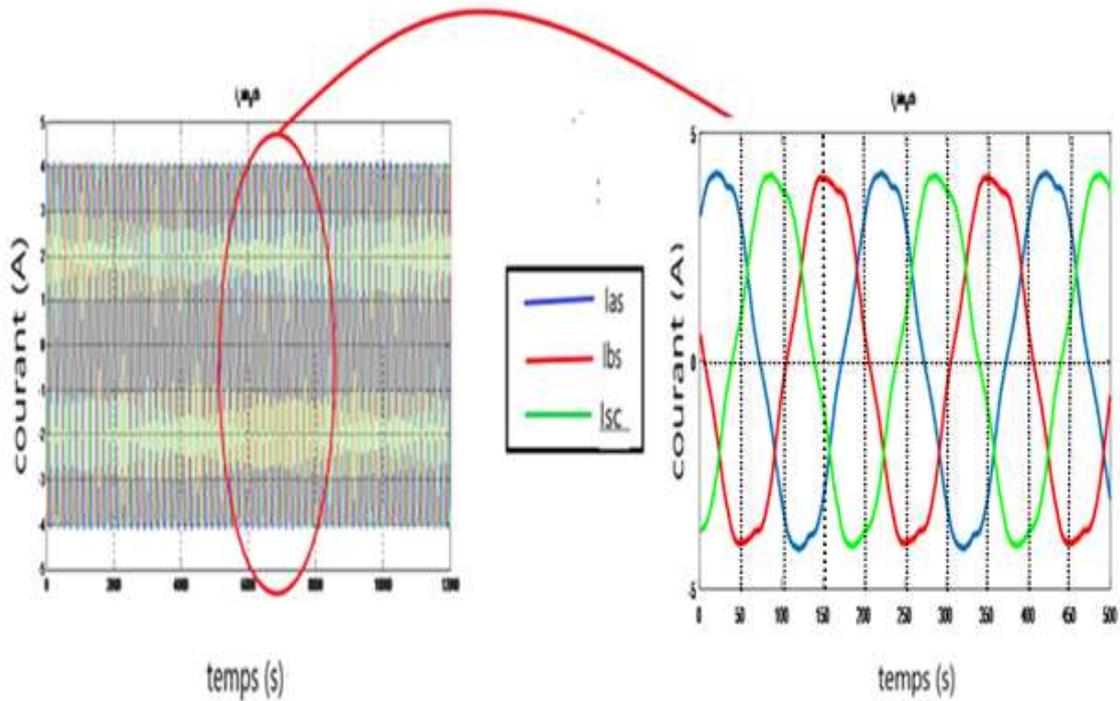


Fig.3.4 Courants de ligne de la MAS en fonctionnement sain avec (sans charge)

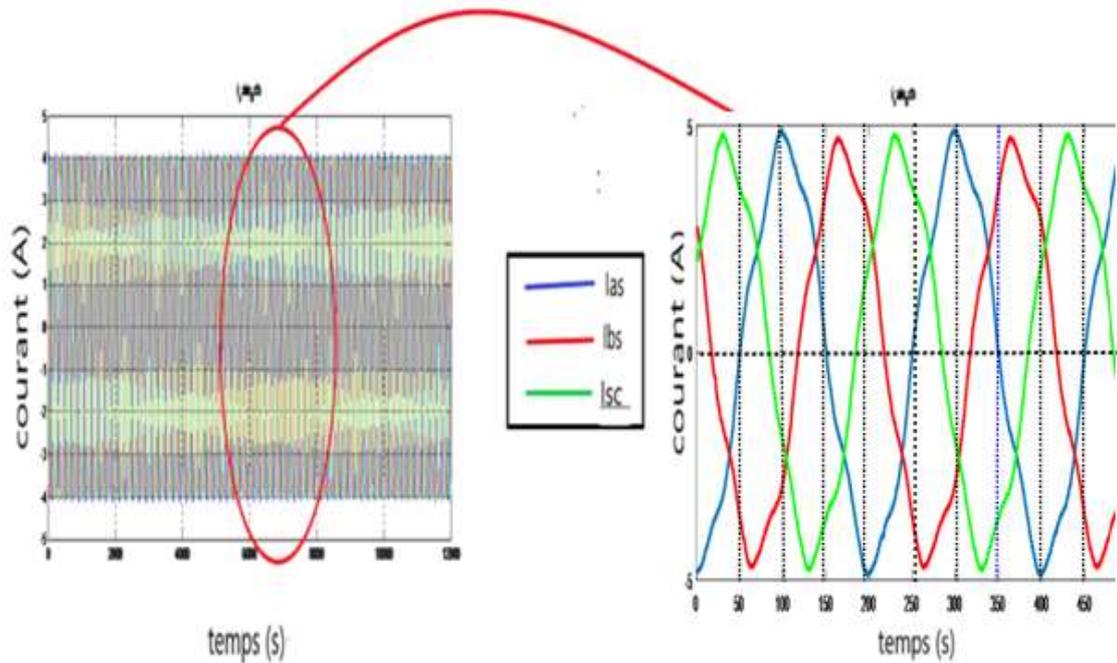


Fig.3.5 Courants de ligne de la MAS en fonctionnement sain avec (20% charge)

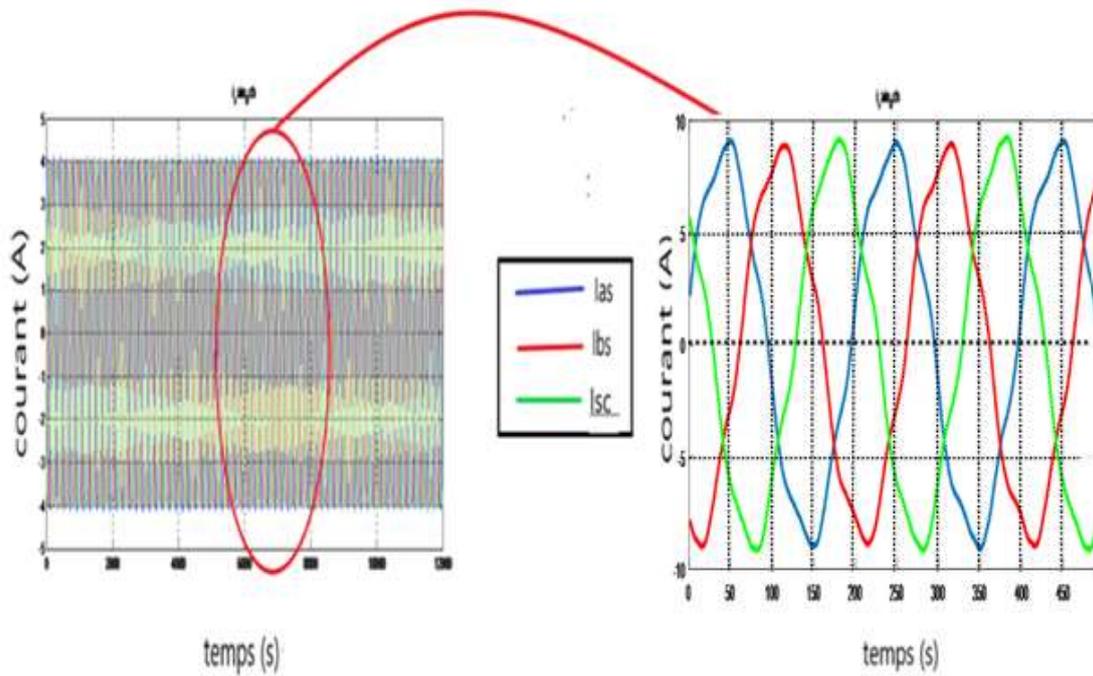


Fig.3.6 Courants de ligne de la MAS en fonctionnement sain avec (100% charge)

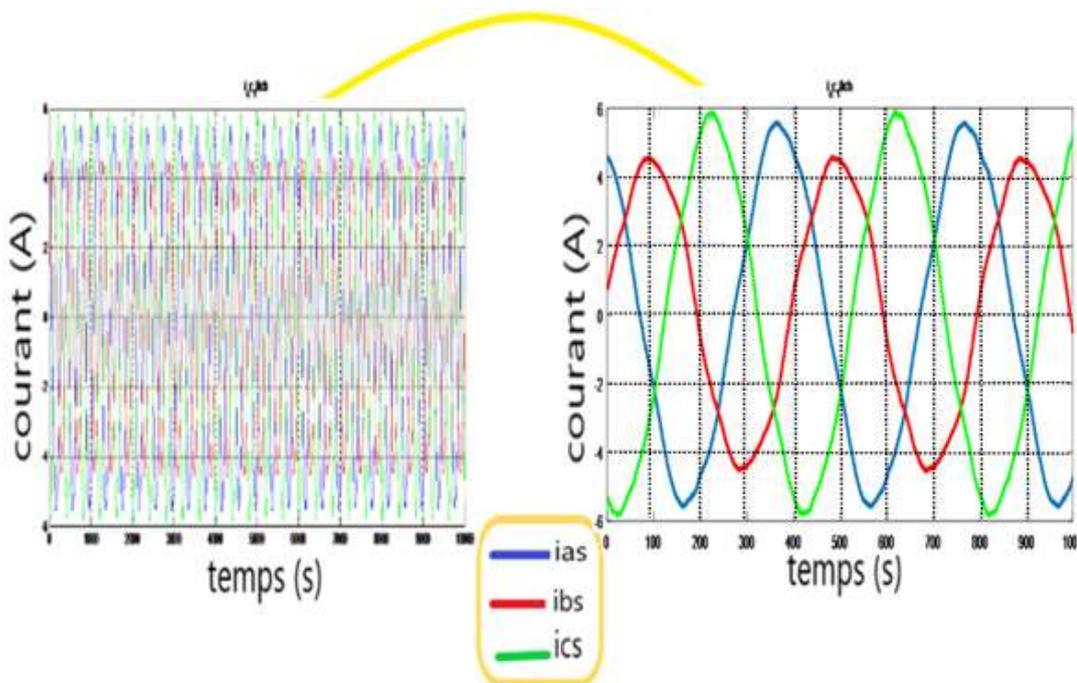


Fig.3.7 Effet d'un défaut de 12.5% de spires court-circuitées sur le déphasage entre les courants (avec 10% charge)

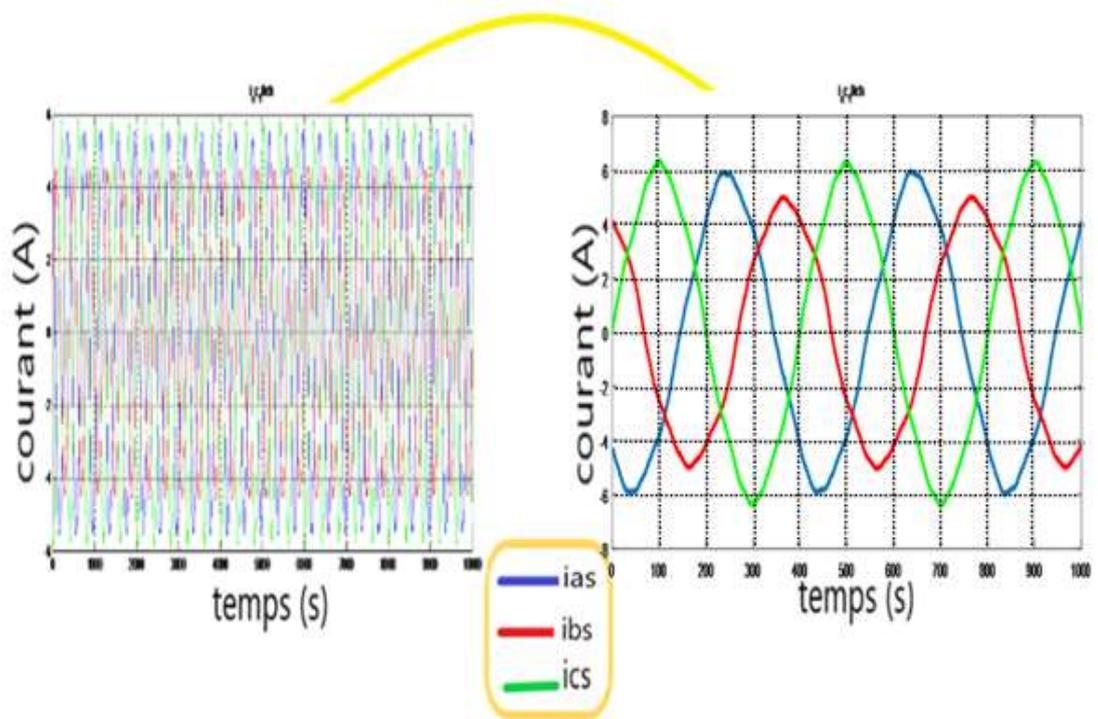


Fig.3.8 Effet d'un défaut de 12.5% de spires court-circuitées sur le déphasage entre les courants (avec 20% charge)

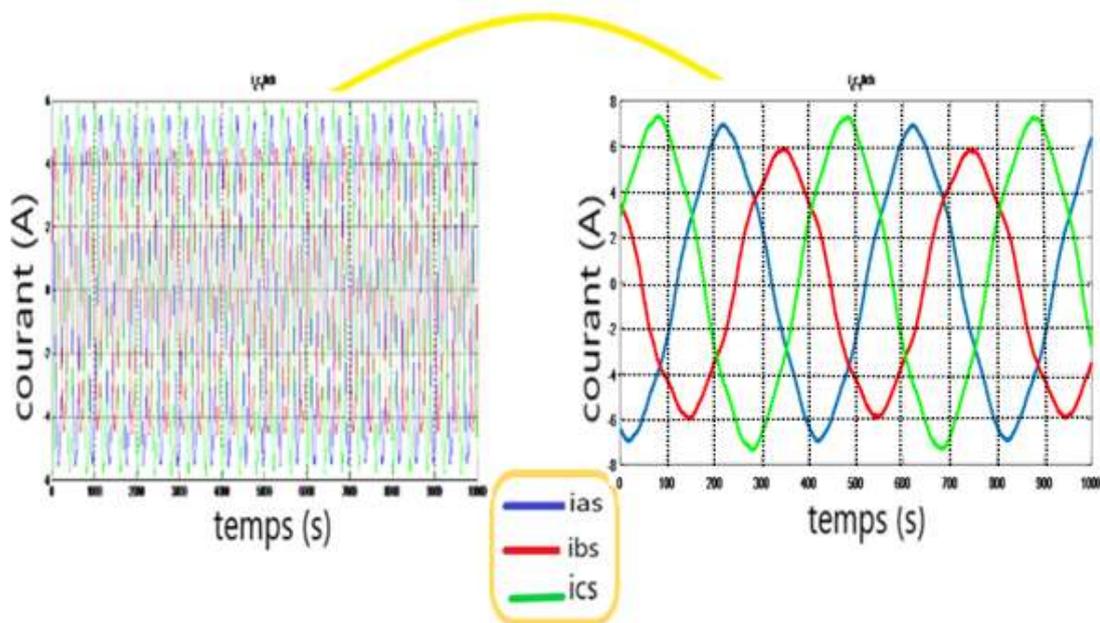


Fig.3.9 Effet d'un défaut de 12.5% de spires court-circuitées sur le déphasage entre les courants (avec 40% charge)

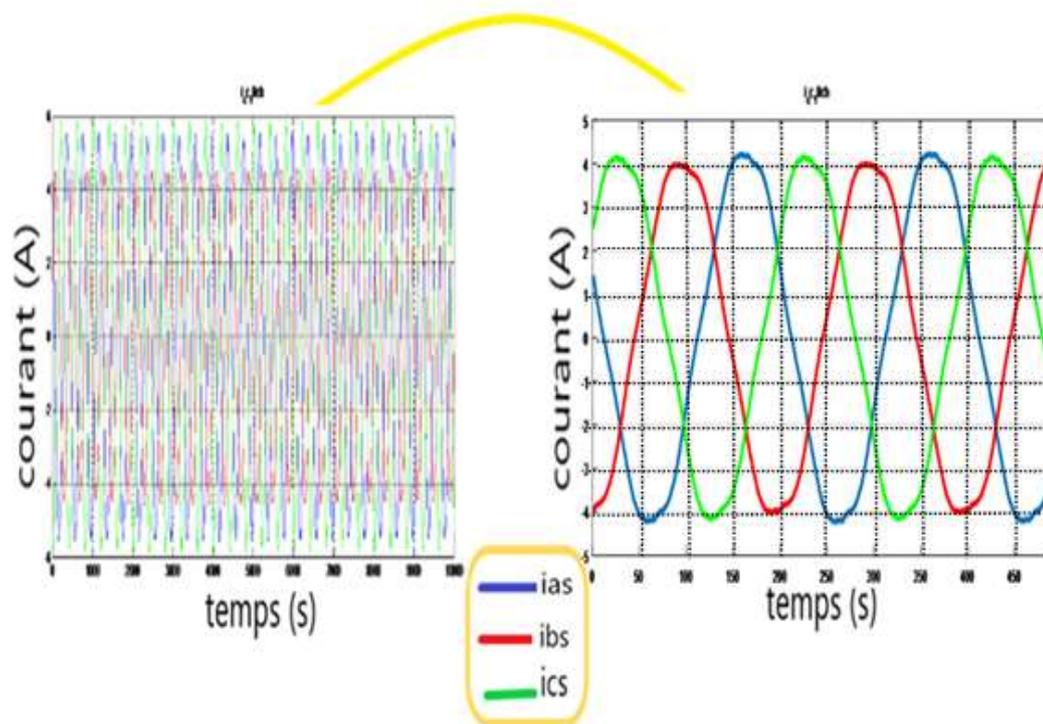


Fig.3.10 Courant statoriques en fonction de la sévérité du défaut rotorique(avec sans charge) .

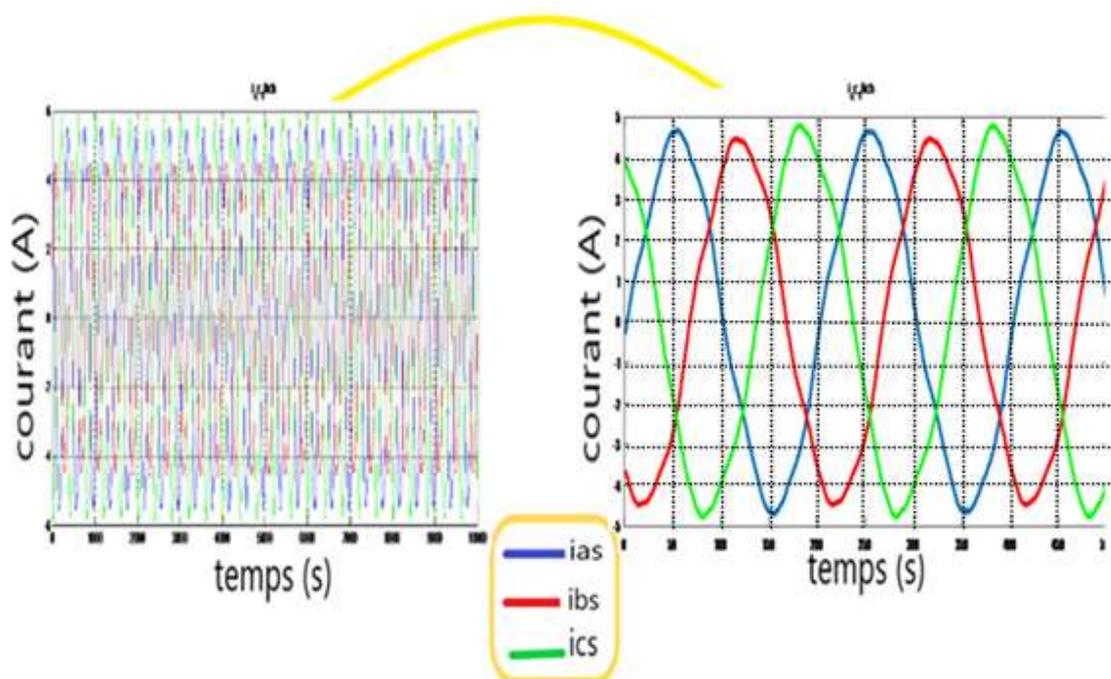


Fig.3.11 Courant statorique en fonction de la sévérité du défaut rotorique(avec 20% charge)

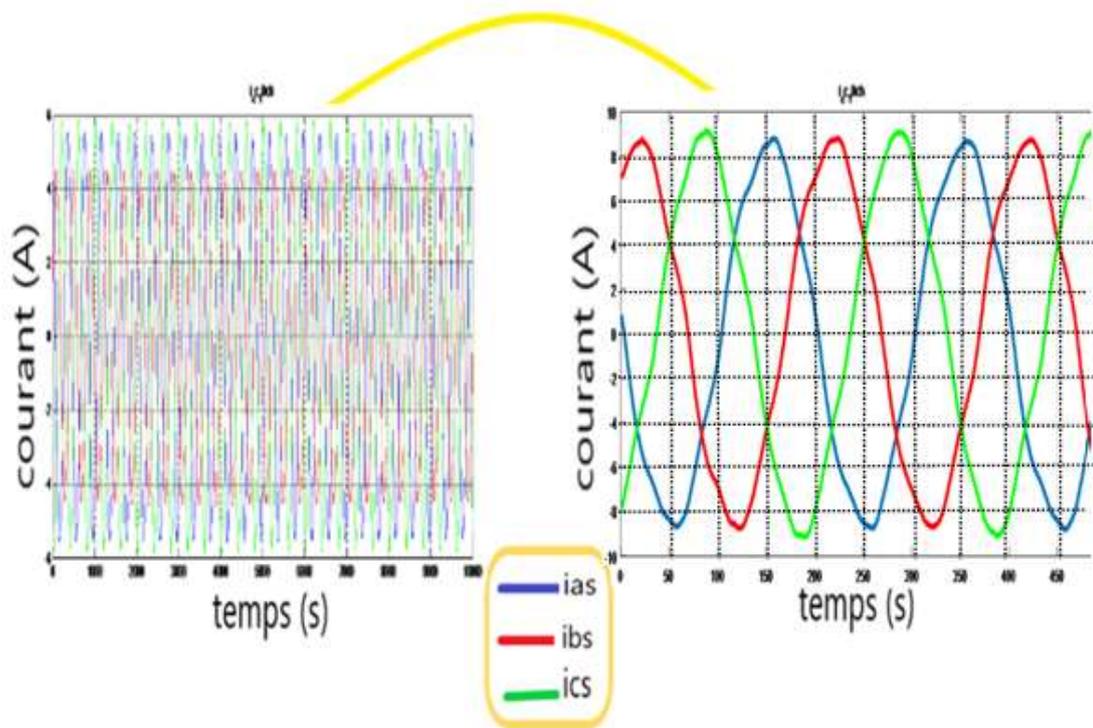


Fig.3.12 Courant statorique en fonction de la sévérité du défaut rotorique(avec 100% charge)

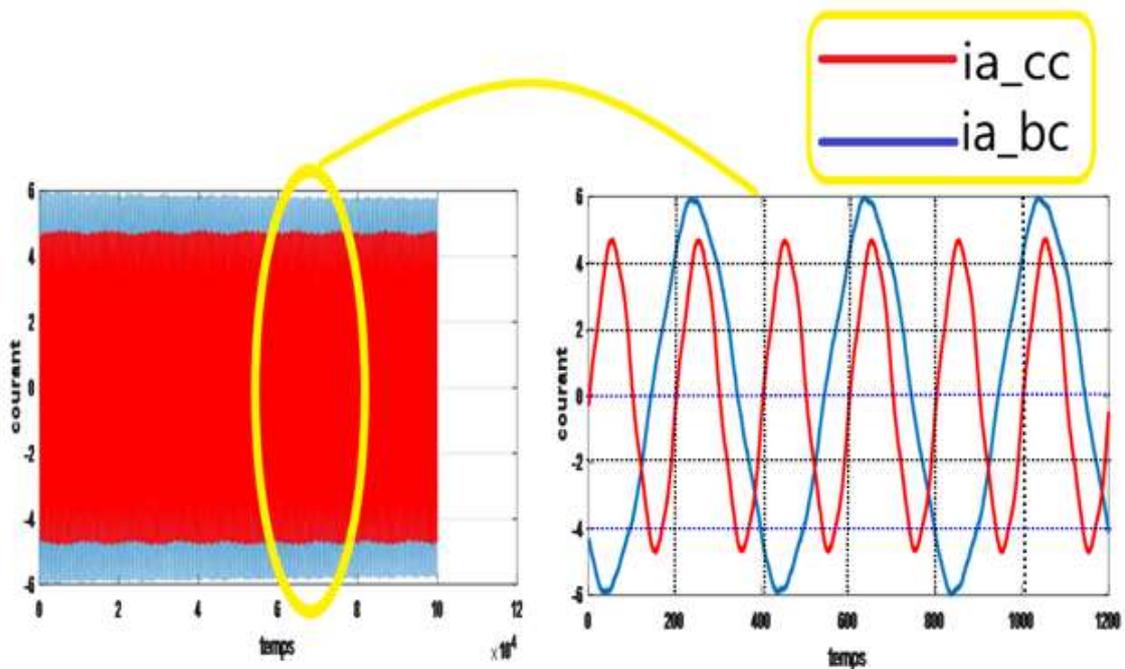


Fig.3.13 Courants statorique de la MAS en présence de défaut simultané stator/ rotor(ia_cc et ia_bc avec 20% charge)

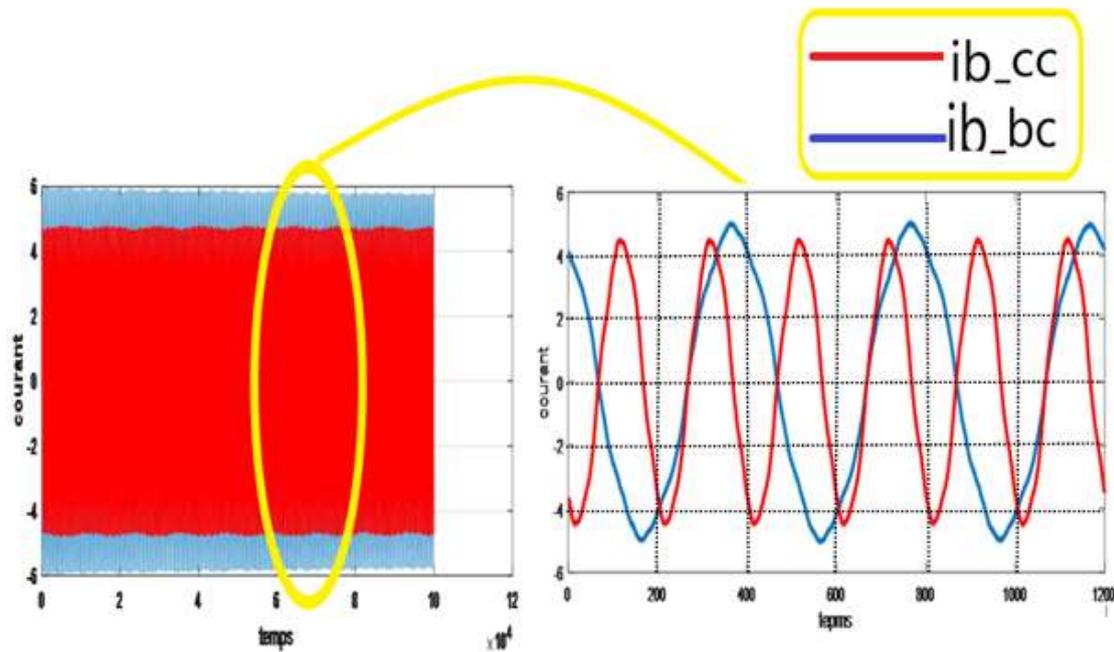


Fig.3.14 Courants statorique de la MAS en présence de défaut simultané stator/rotor(*ib_{cc}* et *ib_{bc}* avec 20% charge)

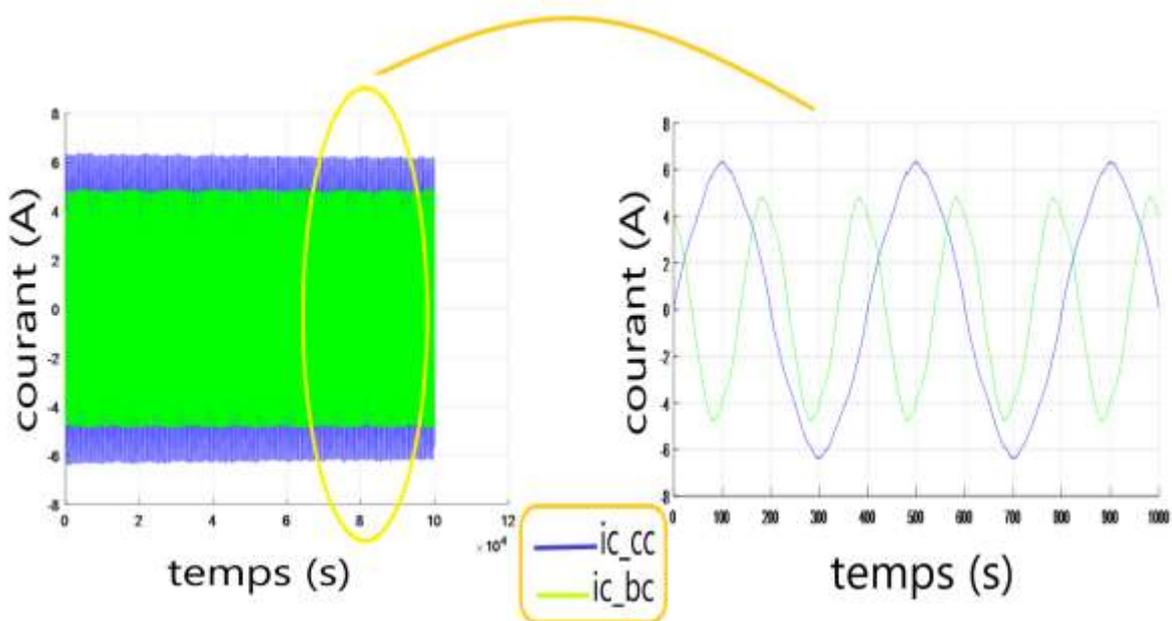


Fig.3.15 Courants statorique de la MAS en présence de défaut simultané stator/rotor(*ic_{cc}* et *ic_{bc}* avec 20% charge)

3.4.2 Paramètre dans le domaine fréquentiel

Nous avons précédemment appliqué des simulations sur la machine asynchrone dans l'échelle de temps, de sorte qu'elle nous a donné différents dessins qui expriment le changement lors de l'augmentation de défaut.

Nous allons maintenant faire les mêmes simulations sur le même mode asynchrone mais au niveau de la fréquence pour voir comment la différence correspond.

L'analyse spectrale du courant statorique est effectuée en utilisant la transformée de fourrier (FFT) du résultat obtenu . L'analyse fréquentiel des courants statorique reste la méthode la plus utilisée car le spectre résultant contient une source de renseignement sur des défauts qui apparaissent au sein d'une machine asynchrone. Les résultats montrés dans les Figures [Fig.3.16](#) et [Fig.3.17](#) et [Fig.3.18](#) indiquent que les fréquences des défauts barre cassée et court circuit peuvent toujours être distinguées. On voit clairement l'apparition des raies latérales.

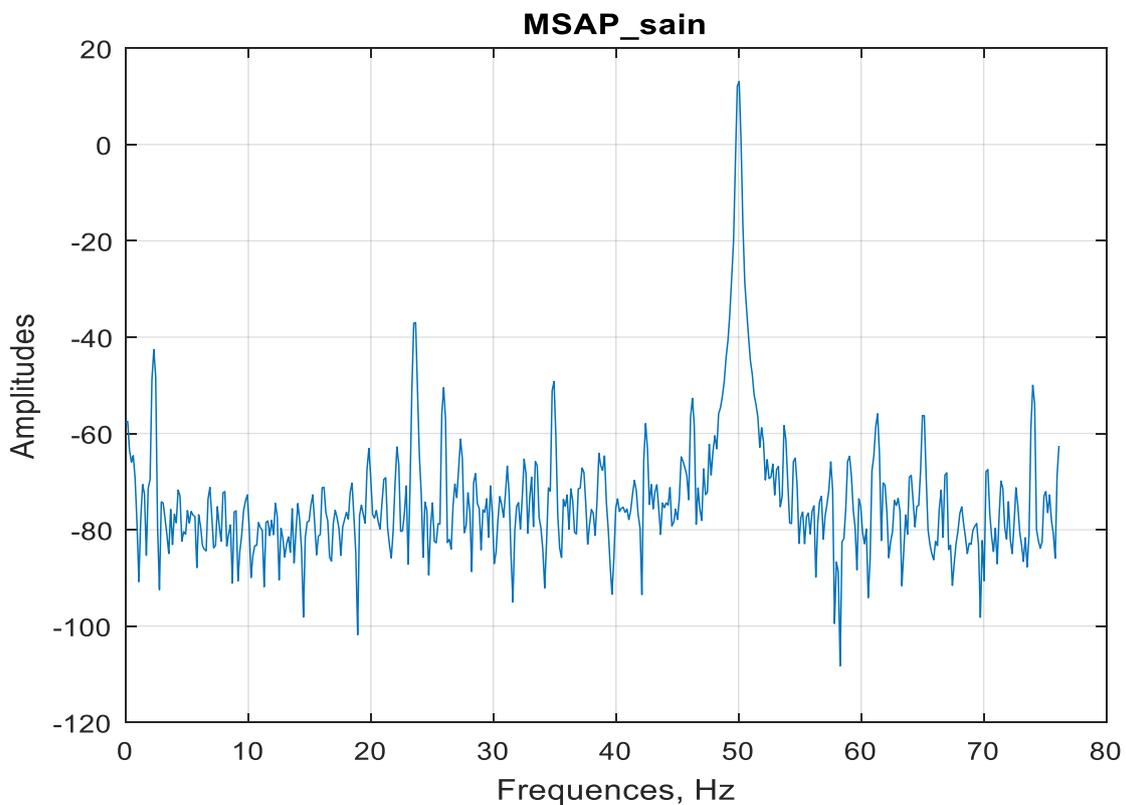


Fig.3.16 Spectre du courant de la MSA sain sans charge

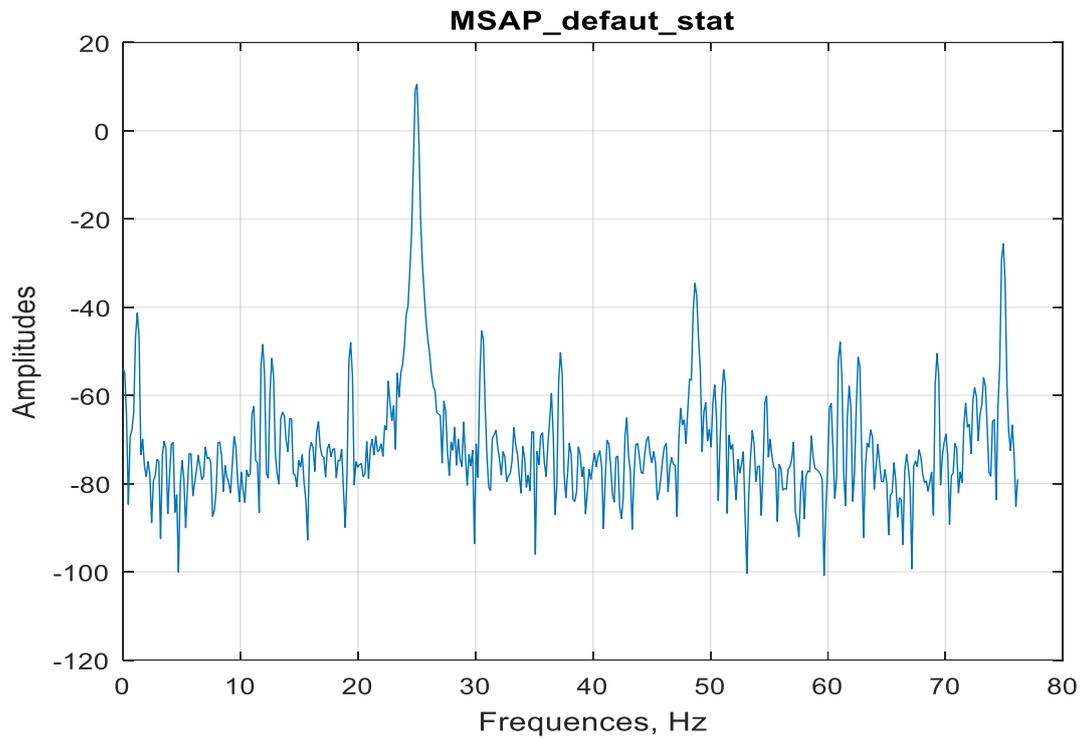


Fig.3.17 Spectre du courant de la MSA avec défaut satorique sans charge

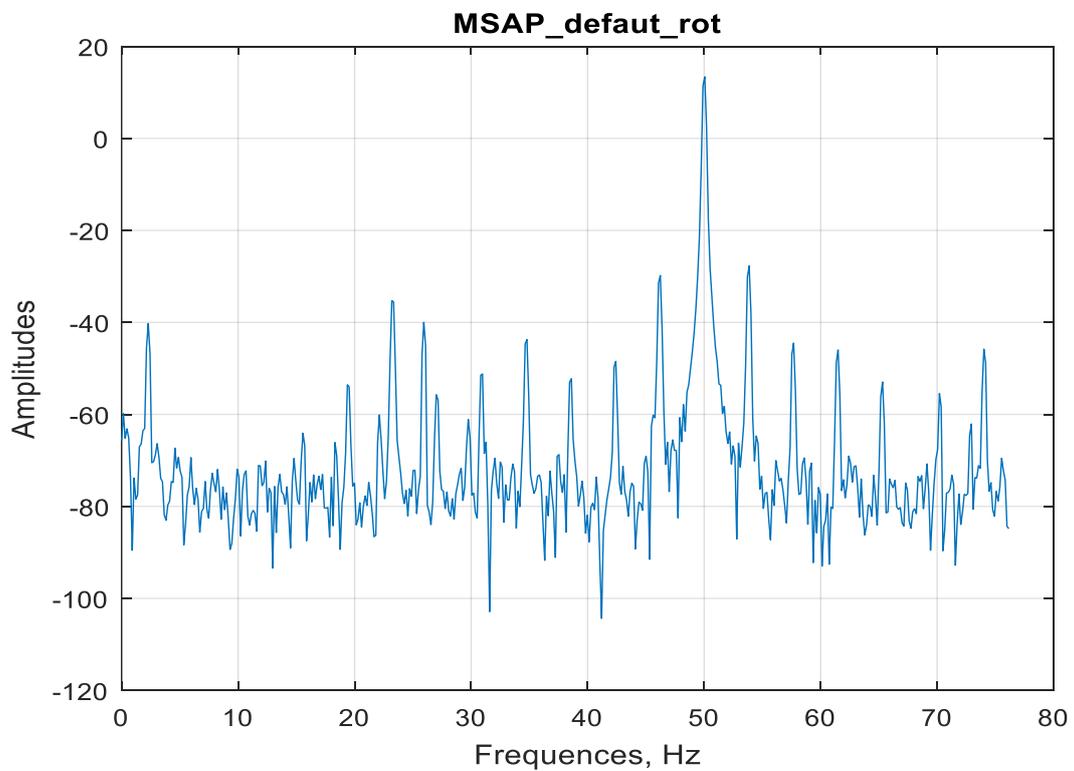


Fig.3.18 Spectre du courant de la MSA avec défaut rotorique sans charge

3.5 Sélection des paramètres par le critère d'ACP

Durant la phase d'extraction des paramètres, les prototypes ou les observations de chaque classe sont caractérisées par un nombre très élevés de paramètres, Nous allons donc faire plusieurs opérations pour définir les nouveaux paramètres.

Dans un premier temps résumons l'analyse en composantes principales à l'aide des neuf étapes de la **Fig.3.19**

- ✚ **Étape 1** : La première étape concerne la mise en forme des données brutes.
- ✚ **Étape 2** : La deuxième étape consiste à centrer et réduire les données. Elles sont centrées afin d'obtenir des propriétés intéressantes, et réduites pour uniformiser les unités de mesure.
- ✚ **Étape 3** : Points sur la matrice où est considéré comme juxtaposition de lignes.
- ✚ **Étape 4**: Points sur la matrice où est considéré comme juxtaposition de colonnes.
- ✚ **Étape 5**: Les individus sont représentés dans un espace à K dimensions. Dans le nuage NI Selon les valeurs propres, et les vecteurs propres, nous intéressons aux distances interindividuelles qui déterminent les ressemblances. Le centre de gravité G représente un individu moyen.
- ✚ **Étape 6** : Les variables sont représentées dans un espace à I dimensions. Nous nous intéressons ici aux angles des points. Le cosinus de l'angle est le coefficient de corrélation. Toutes les variables sont équidistantes de l'origine car les données ont été réduites, ainsi le nuage NK se situe sur une hyper sphère.
AF : Analyse Factorielle. Cette phase permet de mettre en évidence une suite de directions. Dans l'étape 7 ces directions sont des directions d'allongement, et dans l'étape 8 les axes s'interprètent comme des variables synthétiques.
- ✚ **Étape 7** : Cette étape consiste à projeter les points du nuage NI sur le premier plan factoriel. C'est un premier ajustement, il peut y en avoir d'autres à suivre. Les distances s'interprètent alors comme des ressemblances entre les individus
- ✚ **Étape 8** : Cette étape consiste à projeter les points du nuage NK sur le premier plan factoriel. Ici aussi, c'est un premier ajustement, et il peut y en avoir d'autres à suivre. Les coordonnées représentent les coefficients de corrélation avec les facteurs sur les individus.

Les relations de transition expriment les résultats d'une analyse factorielle (AF) dans un espace en fonction des résultats de l'autre.

- ✚ **Etape 9** : Cette étape est la représentation simultanée de nuages de points qui se trouvent initialement dans des espaces de dimensions différentes. Cette représentation issue des relations de transition permet des interprétations des axes simultanés.

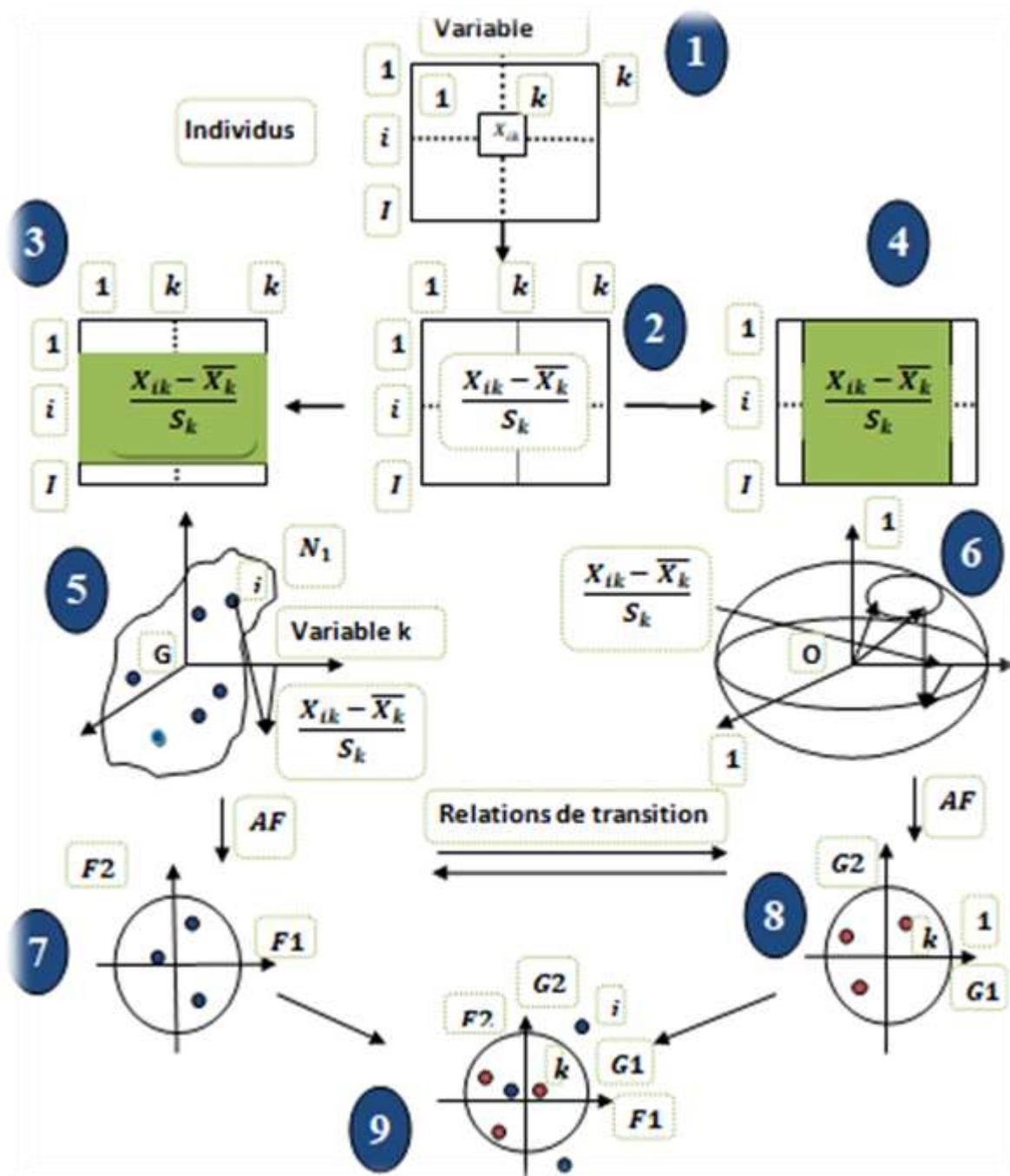


Fig.3.19 Résumé de l'ACP

3.6 Application de L'ACP dans le diagnostic des défauts de la MAS

En traitant les défauts, nous analysons les données représentées en de très nombreux points. En pratique, on peut expérimenter des dimensions élevées. ACP (Analyse en composantes principales) permet de réduire ces dimensions en ne Des fonctionnalités indépendantes.

D'après ce que nous avons vu précédemment, nous l'avons fait Sélection des paramètres par le critère d'ACP Pour que nous abandonnions ces points préexistants sur les nouveaux paramètres selon ACP ,selon se diviser [entableau3.1](#), Basé sur les valeurs propres, et les vecteurs propres existants et Nous abandonnerons toutes les deux divisions pour les nouveaux paramètres , Naturellement, nous appliquerons ces paramètres dans **à savoir dans le domaine temporelle et fréquentiel.**

3.7 Résultats expérimentaux et interprétations

Nous avons appliqué l'analyse en composantes principales sur différentes données pour récupérer les informations les plus pertinentes de celles-ci

Il s'agira de faire une projection dans un nouveau espace, où les différentes directions (les nouveaux axes) seront les vecteurs propres de la matrice de covariance des données elles-mêmes.

De ces axes qui sont ortho normaux, nous garderons que ceux dont les valeurs propres sont les plus importants, et donc ceux qui contiennent l'information la plus pertinente.

Où les formes sont représentées [Fig.3.20 et Fig.3.21](#) [et Fig.3.22 et Fig.3.23](#) Répartissez les points dans les nouveaux paramètres selon ACP dans domaine temporelle.

Nous allons donc installer les charges et comparer la condition sain Pour machine asynchrone avec défaillance stator et rotor

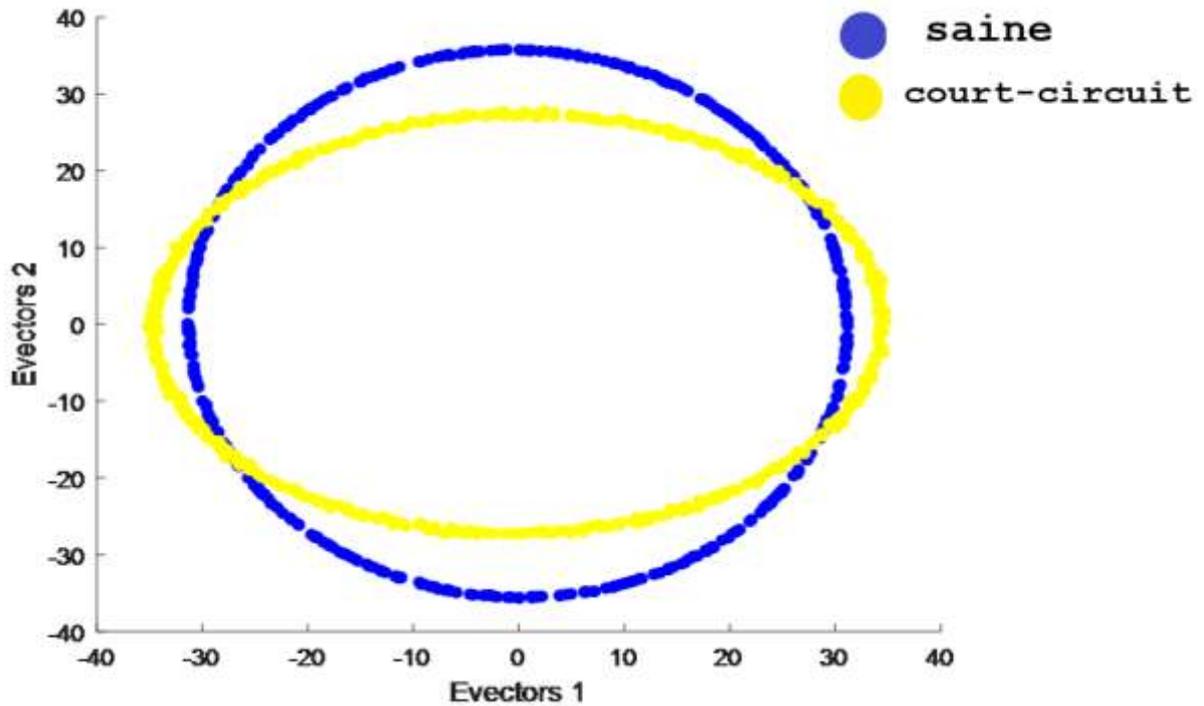


Fig.3.20 Représentations des vecteurs propres de la MAS sain et avec défaut statorique dans le domaine temporel

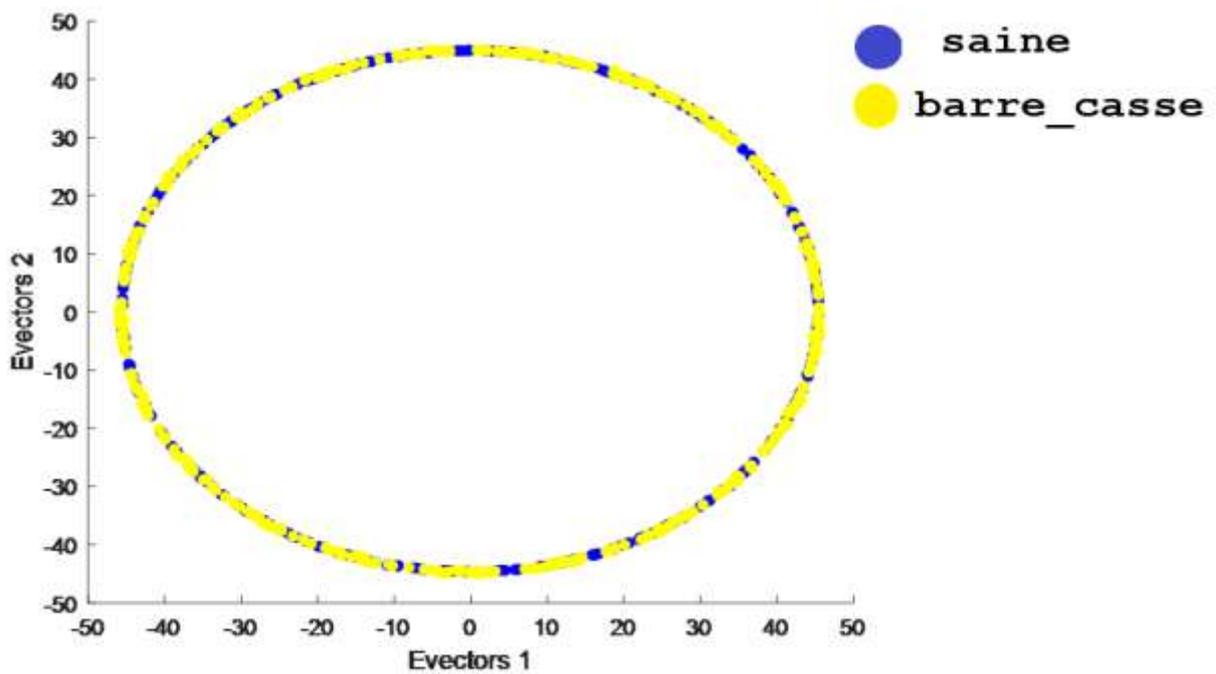


Fig.3.21 Représentations des vecteurs propres de la MAS sain et avec défaut rotorique dans le domaine temporel

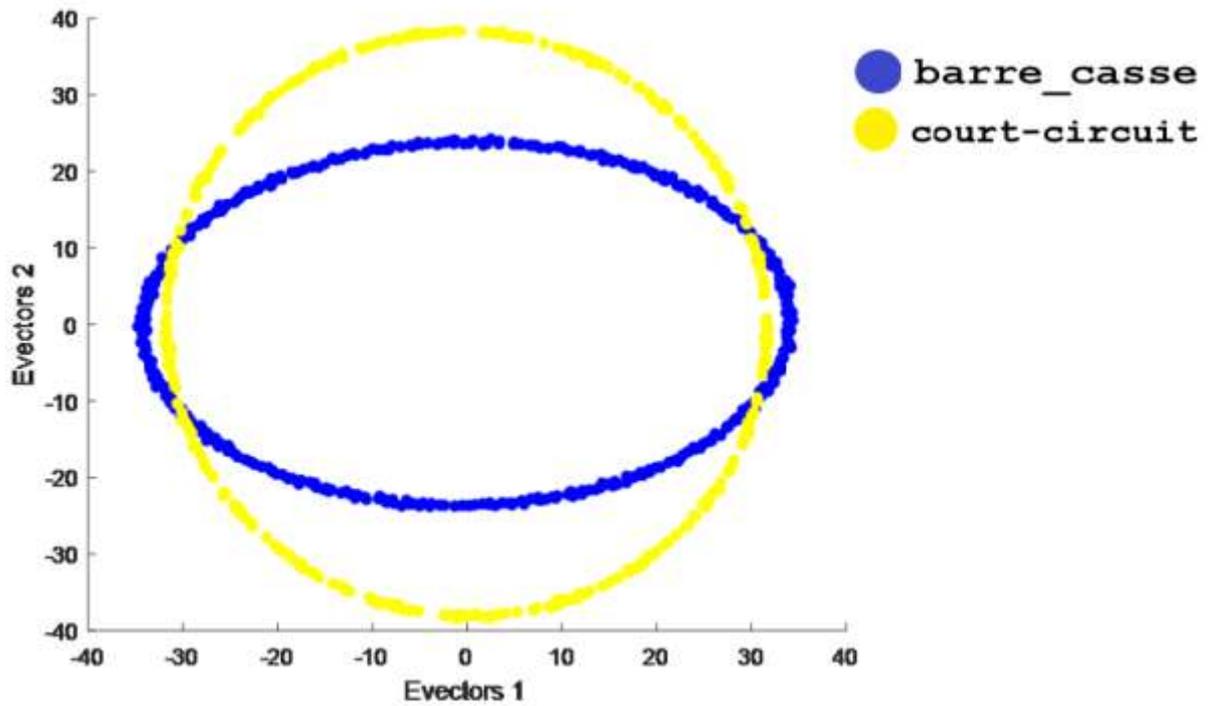


Fig.3.22 Représentations des vecteurs propres de la MAS avec défaut rotorique/ rotorique dans le domaine temporel

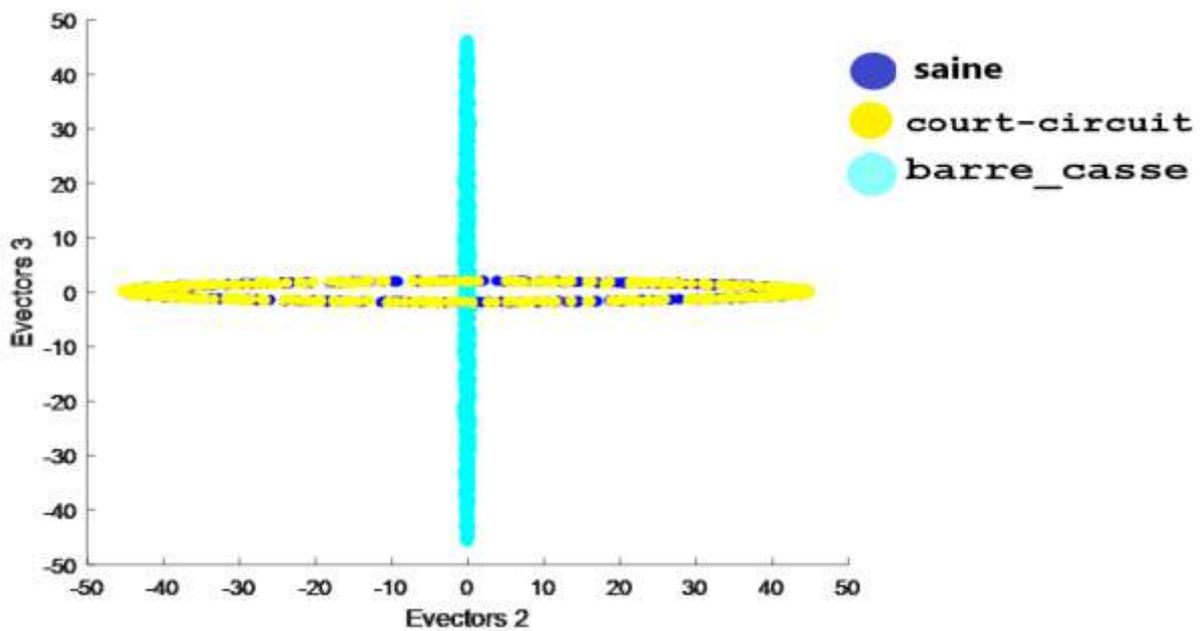


Fig.3.23 Représentations des vecteurs propres de la MAS sain et avec défaut rotorique/ rotorique dans le domaine temporel

Nous allons maintenant calculer ce qu'on appelle la qualité de représentation ou la variance totale par la relation (3.1).

Cette qualité est donnée par le pourcentage d'inertie associé à un axe, c'est-à-dire le rapport de l'inertie de la projection du nuage sur l'axe et de l'inertie totale du nuage

Cette qualité mesure "l'importance" d'un axe factoriel. Bien sûr les premiers axes auront plus d'importance que les suivants. Nous devons juger ces pourcentages en fonction de la taille du tableau. Par exemple, 10% est une valeur faible si le tableau comporte 10 variables c'est une valeur forte dans le cas de 100 variables. Du fait de la dualité, il est équivalent de calculer ces pourcentages d'inertie à partir du nuage **NI** des individus ou **NK** des variables.

En raison de notre grande taille de matrice, nous avons choisi un ratio 80% Une référence pour notre mesure de la qualité voir **Tableau.3.2.**

tandis que **Fig.3.24** Il nous exprime les variations du taux d'erreur indiqué dans le ballon bleu sur les axes.

$$\Rightarrow \begin{cases} Q_j = \frac{\sum_{i=1}^j \lambda}{\sum_{i=1}^N \lambda} \geq 80\% & \text{Et de là: Cette solution est acceptable} \\ Q_j = \frac{\sum_{i=1}^j \lambda}{\sum_{i=1}^N \lambda} \leq 80\% & \text{Et de là: Cette solution n'est pas acceptable} \end{cases} \quad (3.1)$$

Tableau.3.2. la variance totale dans le domaine temporel

Variable	vecteurs propres1	vecteurs propres2	vecteurs propres2
valeurs propres	$\lambda_1=1.3921$	$\lambda_2=0.0049$	$\lambda_2=0.0113$
la variance totale	99.21%	0.24%	0.73%

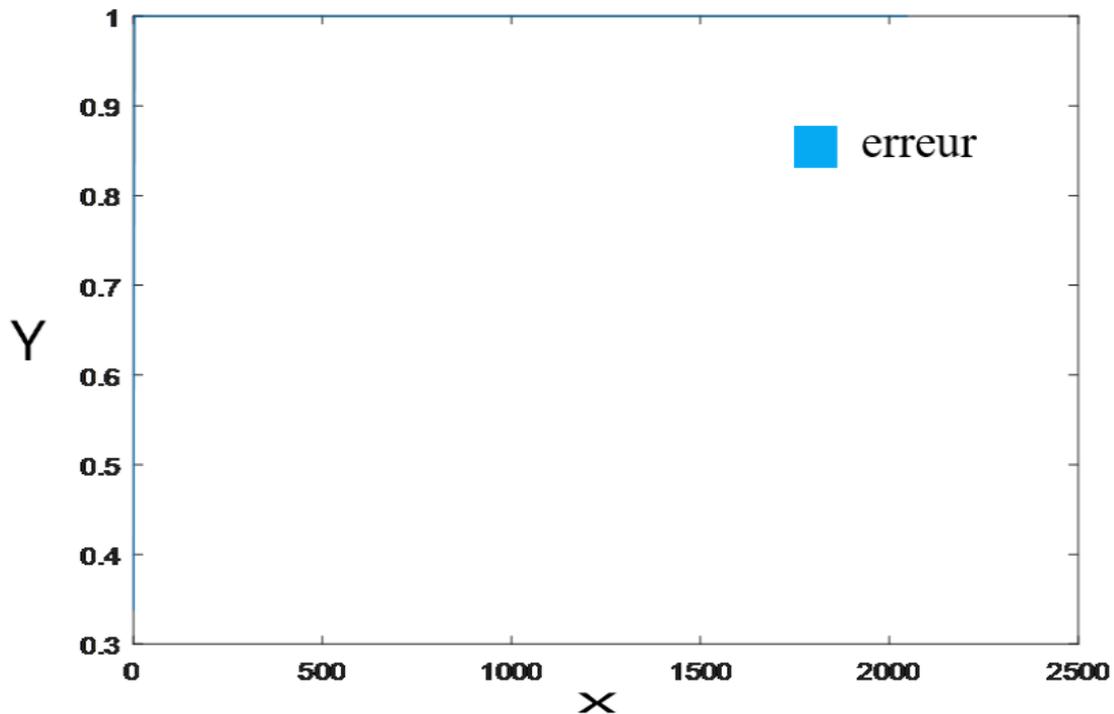


Fig.3.24 Illustration du pourcentage d'erreur dans le domaine temporel

Résultats applicables obtenus dans les figures précédentes ,ne sont qu'un pas vers la "clarification" du problème de la relation (ou différence) qui existe entre les ACP et les principaux composants précédents dans domaine temporelle ,Il serait intéressant, à partir de cas concrets sur des données réelles, de les approfondir afin d'élucider les parts communes et spécifiques des deux analyses, puisqu'il existe une relation explicite entre les composantes spectrales, d'une part, et celles principales, d'autre part, d'un processus stationnaire et sa version centrée. Cet investissement pourrait développer une méthodologie pouvant être étendue à d'autre cas

En effet, au vu des résultats théoriques obtenus au chapitre précédent, il semble opportun voire nécessaire de suggérer, à partir d'exemples d'applications, l'approfondissement des parts communes et spécifiques des ACP centrée dans le domaine des fréquences, qui se résument chacune à une famille d'ACP de composantes spectrales. Voir [Fig.3.25](#), [Fig.3.26](#) [Fig.3.27](#),[Fig.3.28](#)

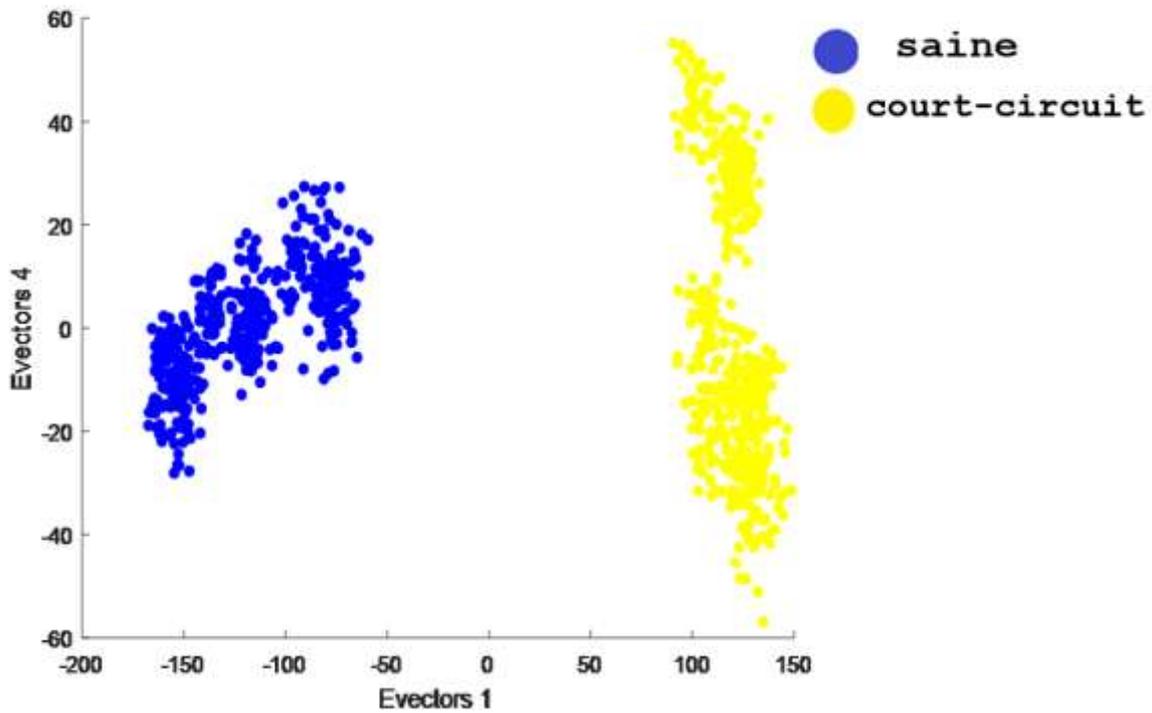


Fig.3.25 Représentations des vecteurs propres de la MAS sain et avec défaut statorique dans le domaine fréquentiel

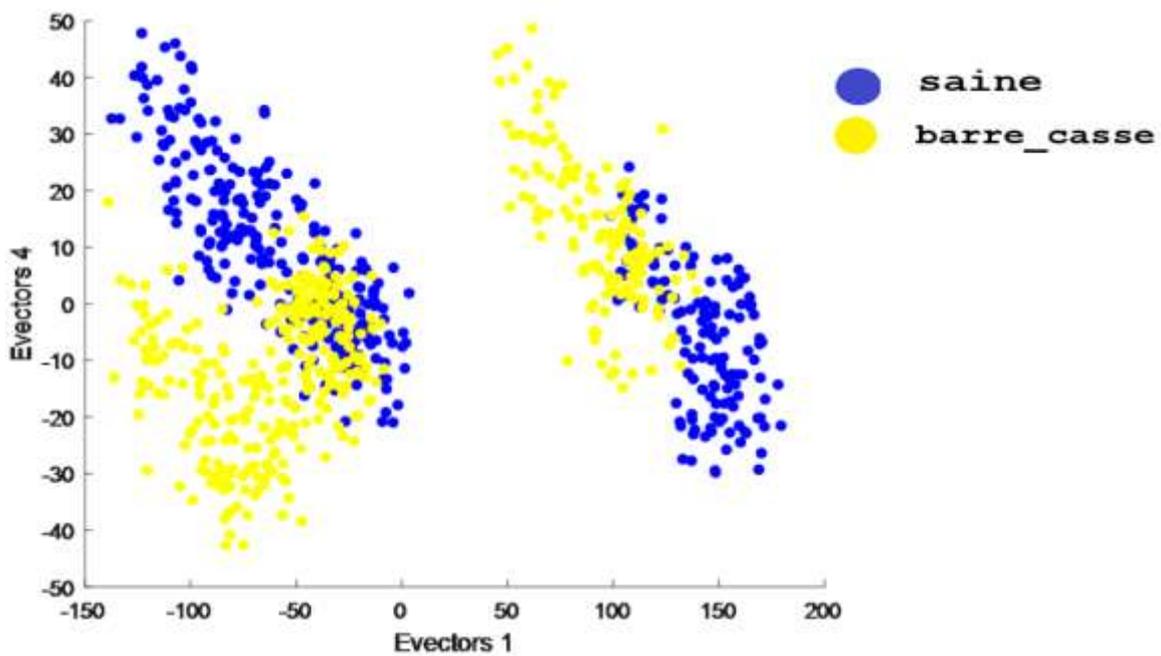


Fig.3.26 Représentations des vecteurs propres de la MAS sain et avec défaut rotorique dans le domaine fréquentiel

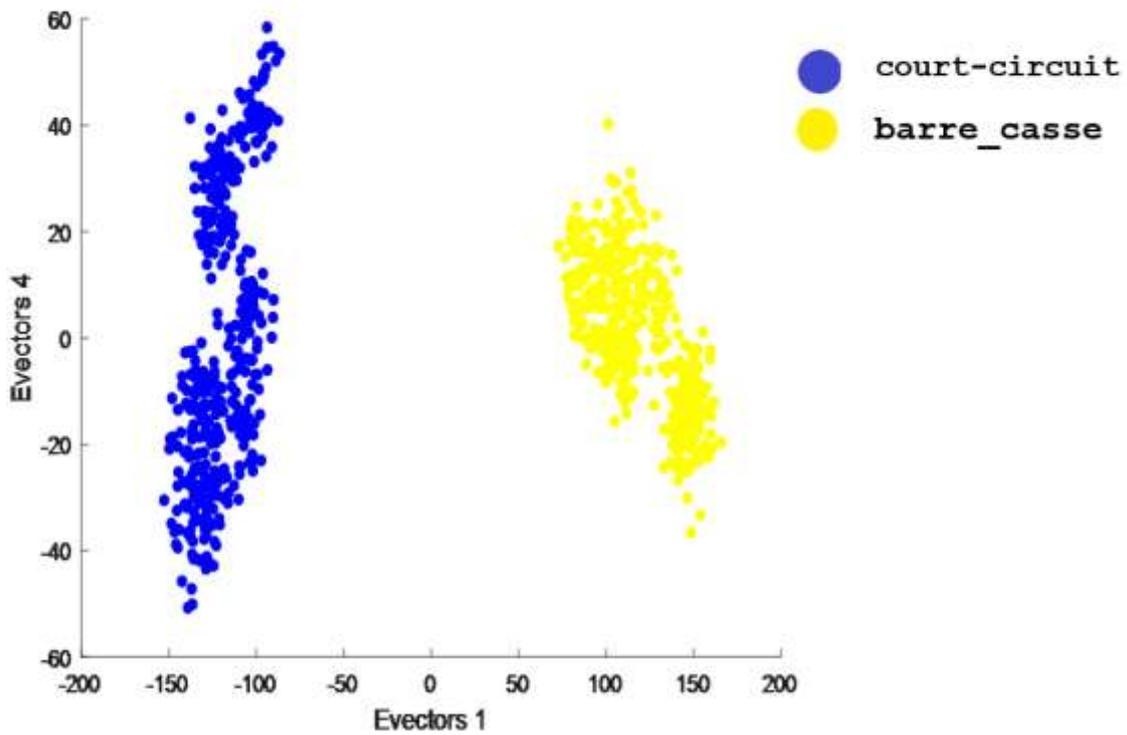


Fig.3.27 Représentations des vecteurs propres de la MAS avec défaut statorique/rotorique dans le domaine fréquentiel

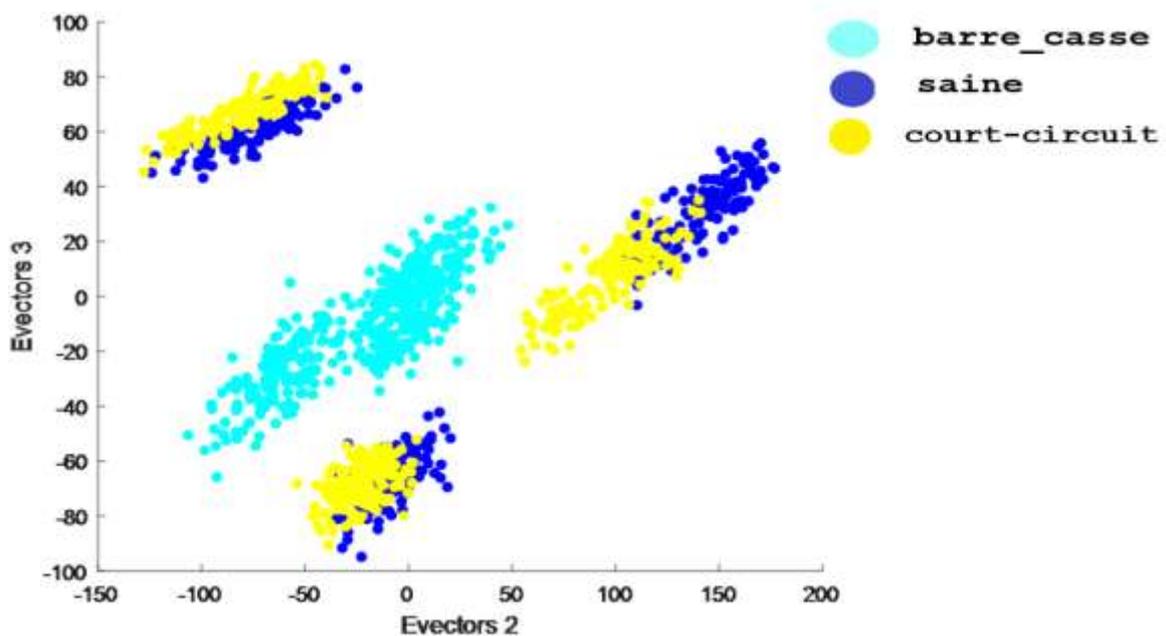


Fig.3.28 Représentations des vecteurs propres de la MAS sain et avec défaut statorique/rotorique dans le domaine fréquentiel

Trouvez le pourcentage d'erreur dans le domaine des fréquences Nous appliquerons la même étude que nous avons faite en domaine temporelle ,En fonction de la relation(3.1) cela nous permettra de trouver les valeurs dans **Tableau.3.3**.

Alor nous pouvons l'obtention de **Fig.3.24**

Tableau.3.3. la variance totale dans le domaine fréquentiel

Variable	vecteurs propres1	vecteurs propres2
valeurs propres	$\lambda_1=0.6303$	$\lambda_2=0.3697$
variance totale%	63.03%	36.97%

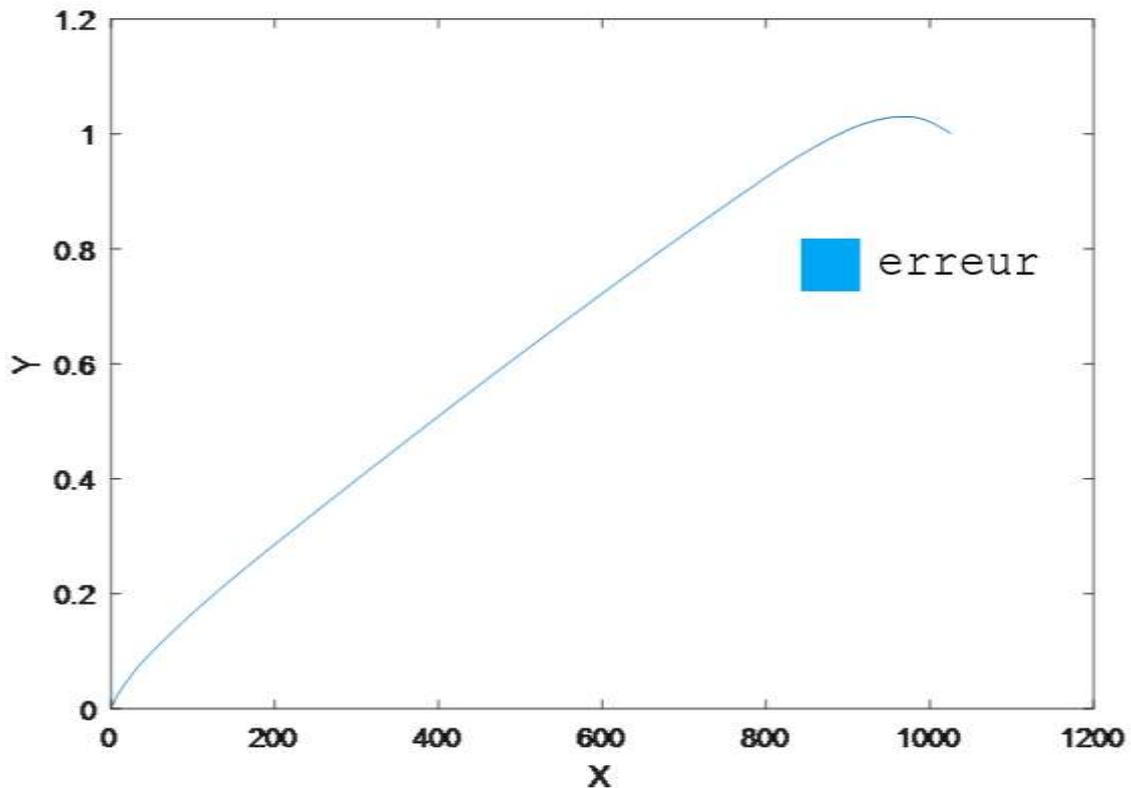


Fig.3.29 Illustration du pourcentage d'erreur dans le domaine fréquentiel

3.8 Conclusion

L'objectif de ce chapitre C'est l'évaluation des performances de la méthode d'analyse en composantes principales sur le diagnostic acceptable des défauts d'une machine asynchrone, Nous nous sommes donc appuyés dans cette méthode sur l'analyse des défauts de la machine asynchrone au niveau du rotor et du stator dans le domaine temporel et fréquentiel d'une manière qui nous permet de détecter ces défauts d'une manière satisfaisante.

L'application de l'ACP pour le diagnostic des défauts de la MSA dans le domaine temporel a donné des résultats acceptables, par contre, on a remarqué que l'ACP dans le domaine fréquentiel a donné des résultats très satisfaisants. Elle a bien pu différencier entre les différentes classes à savoir la MSAP saine, MSAP à défaut rotorique et MSAP à défaut statorique



*Conclusion Générale et
Perspectives*

Conclusion Générale et Perspectives

Les machines électriques asynchrones nécessitent une détection rapide et précoce de leurs défaillances, à cause de leurs utilisations fréquentes dans diverses applications. Le travail présenté dans ce mémoire expose l'apport de la méthode de l'analyse en composantes principales (ACP) au diagnostic des défauts des machines asynchrones.

Pour aborder l'étude, nous avons établi un état de l'art des défauts pouvant intervenir dans la machine asynchrone et des méthodes classiques permettant de les identifier.

Notre travail consiste en des procédures qui ont de nombreuses utilisations sur lesquelles nous pouvons les implémenter de sorte que cela nous donne un mécanisme pour créer un diagnostic précis qui nous permet de reconnaître pleinement les modèles et les mesures qui sont effectués sur le processus.

La méthode que nous avons utilisée pour caractériser la machine asynchrone est appelée méthode d'analyse en composantes principales (ACP). En raison de l'énorme quantité d'information existante au niveau de la MSAP, le diagnostic sera difficile. A cet effet l'utilisation de l'ACP a réduit la dimension de l'ensemble de données tout en maintenant la variabilité dans l'ensemble de ces données.

Ceci est accompli en passant à un nouvel ensemble de variables, les composantes principales qui sont présentées par les vecteurs propres. Ils ne sont pas corrélés, et ils sont disposés de sorte que les premiers éléments conservent la même variance trouvée dans toutes les variables d'origine.

Pour la meilleure application de cette méthode, nous avons divisé l'étude sur la machine asynchrone en trois modes de fonctionnement :

- ✚ MAS sain
- ✚ MAS avec défaut satorique
- ✚ MAS avec défaut rotorique

Nous avons réalisé chaque mode de fonctionnementséparément et nous l'avons représentée graphiquement selon plusieurs charges. Ainsi nous avons obtenu les données dans le domaine temporel, puis, nous lui avons appliqué la méthode d'analyse en composantes principales (ACP).

Sur les mêmes informations trouvées précédemment, nous lui avons appliqué la transformée de Fourier pour avoir des données dans le domaine fréquentiel. Ensuite, nous avons procédé à l'analyse en composantes principales pour répondre au problème de diagnostic de la MSAP.

Donc on peut dire que l'évaluation des performances de la méthode d'analyse en composantes principales sur le diagnostic des défauts d'une machine asynchrone est acceptable, Nous nous sommes donc appuyés dans cette méthode sur l'analyse des défauts de la machine asynchrone au niveau du rotor et du stator dans le domaine temporel et fréquentiel d'une manière qui nous permet de détecter ces défauts d'une manière satisfaisante.

L'application de l'ACP pour le diagnostic des défauts de la MSA dans le domaine temporel a donné des résultats acceptables, par contre, on a remarqué que l'ACP dans le domaine fréquentiel a donné des résultats très satisfaisants. Elle a bien pu différencier entre les différentes classes à savoir la MSAP saine, MSAP à défaut rotorique et MSAP à défaut statorique

Enfin, la méthode d'analyse des composants principaux est une méthode efficace pour analyser, diagnostiquer et étudier toutes les machines synchrones, asynchrones et autres.



Bibliographie

Bibliographie

- [1] P. Tavner, L. Ran, J. Penman, and H. Sedding, Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines, 2 ed. London, United Kingdom: Institution of Engineering and Technology, 2008
- [2] IEEE, "Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part I," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-21, pp. 853-864, 1985
- [3] H. Henao, C. Demian, and G. A. Capolino, "A frequency-domain detection of stator winding faults in induction machines using an external flux sensor," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 39, pp. 1272-1279, September/October 2003.
- [4] Isabelle Guyon, Steve Gunn, Masoud Nikraves, Lotfi A. Zadeh (Eds.), « Feature Extraction, Foundations and Applications », Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006.
- [5] H. RAZIK, G. DIDIER « diagnostic de la machine asynchrone », Groupe de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Nancy, G.R.E.E.N, 7 Janvier 2003.
- [6] M. D. Negrea, "Electromagnetic flux monitoring for detecting faults in electrical machines," Doctoral thesis, Electrical and Communications Engineering, Helsinki University of Technology, Helsinki, Finland, 2006.
- [7] B. Vaseghi, "Contribution à l'étude des machines électriques en présence de défaut entrespires," Thèse de doctorat, GREEN - Groupe de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Nancy, Nancy Université - Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009.
- [8] G.M. JOKSIMOVIC, J. PENMAN, « The detection of inter-turn short circuits in the stator windings of operating motors », IEEE Transactions on industrial Electronics, Vol.47, no.5, pp.1078-1084, Octobre 2000
- [9] M. S. Naït-Saïd, M. E. H. Benbouzid et A. Benchaib, « Detection of broken bars in induction motors using an extended kalman filter for rotor resistance sensorless estimation », IEEE Transactions on EnergyConversion, Vol.15, no 1, pp.66-70, Mars 2000.

- [10] D. Thailly, "Etude du champ de dispersion des machines à courant alternatif : Application au diagnostic," Thèse de doctorat, Laboratoire Systèmes Electrotechniques et Environnement (LSEE), Université d'Artois, Béthune, France, 2007.
- [11] A. H. Bonnett and G. C. Soukup, "Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 28, pp. 921-937, 1992.
- [12] A. H. Bonnett and C. Yung, "Increased Efficiency Versus Increased Reliability," *Industry Applications Magazine*, IEEE, vol. 14, pp. 29-36, 2008.
- [13] O. V. Thorsen and M. Dalva, "A survey of faults on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminals, and oil refineries," *Industry Applications*, *IEEE Transactions on*, vol. 31, pp. 1186-1196, 1995.
- [14] W. T. Thomson, "A review of on-line condition monitoring techniques for three-phase squirrelcage induction motors—past, present and future," in *2nd IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives - SDEMPED '99*, Gijon, Spain, 1999, pp. 3-17.
- [15] O. V. Thorsen and M. Dalva, "Failure identification and analysis for high-voltage induction motors in the petrochemical industry," *Industry Applications*, *IEEE Transactions on*, vol. 35, pp. 810-818, 1999.
- [16] J.P.CARON, J.P. HAUTIER, « Modélisation et commande de la Machine Asynchrone », Editions TECHNIP 1995 France.
- [17] J. CHEN & R.J. PATTON, « Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems », Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [18] Jean-Paul Benzécri ; *Analyse des données. T2* (leçons sur l'analyse factorielle et la reconnaissance des formes et travaux du Laboratoire de statistique de l'Université de Paris 6, T. 2 : l'analyse des correspondances), Dunod Paris Bruxelles Montréal, 1973
- [19] Jean-Paul Benzécri et Al. *Pratique de l'analyse des données. T1* (analyse des correspondances. Exposé élémentaire), Dunod Paris, 1984,
- [20] Jean-Paul Benzécri et Al. *Pratique de l'analyse des données. T2* (abrégé théorique. Études de cas modèle), Dunod Paris, 1984

- [21] Brigitte Escofier et Jérôme Pagès, *Analyses factorielles simples et multiples ; objectifs, méthodes et interprétation*, Dunod, Paris, 2008, 4^e éd. (1^{re} éd. 1988), 318 p. (ISBN 978-2-10-051932-3)
- [22] François Husson, Sébastien Lê et Jérôme Pagès, *Analyse des données avec R*, Presses Universitaires de Rennes, 2009, 224 p. (ISBN 978-2-7535-0938-2)
- [23] Ludovic Lebart, Morineau Alain, Piron Marie; *Statistique exploratoire multidimensionnelle*, Dunod Paris, 1995
- [24] Jérôme Pagès, *Analyse factorielle multiple avec R*, EDP sciences, Paris, 2013, 253 p. (ISBN 978-2-7598-0963-9)
- [25] Mathieu Rouaud ; Probabilités, statistiques et analyses multicritères [archive] Un livre de 290 pages qui traite de l'ACP (les principes et de nombreux exemples concernant, entre autres, les isolants thermiques et les eaux minérales). Version numérique libre et gratuite.
- [26] Michel Volle, *Analyse des données*, Economica, 4^e édition, 1997, (ISBN 2-7178-3212-2)
- [27] CLEVELAND, W. S. and GUARINO, R. (1976). Some robust statistical procedures and their application to air pollution data. *Technometrics*
- [28]https://fr.wikipedia.org/wiki/Analyse_en_composantes_principales#Exemples_introductis
- [29] [.http://www.mathevry.cnrs.fr/_media/members/aguilloux/enseignements/l3bi/partie3.pdf](http://www.mathevry.cnrs.fr/_media/members/aguilloux/enseignements/l3bi/partie3.pdf)
- [30]<http://www2.agroparistech.fr/IMG/pdf/AnalyseComposantesPrincipalesAgroParisTech.pdf>
- [31] <http://iml.univ-mrs.fr/~reboul/ADD3-MAB.pdf>
- [32] interprétation d'une ACP
- [33] un Livre.L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES (A.C.P.)(Pierre-Louis GONZALEZ)
- [34]..... un Livre Analyse en Composantes Principales (ACP)(Master MMAS - Université de Bordeaux)
- [35]..... AHAMAD, B. (1967). An analysis of crimes by the method of principal components. *Appl. Statis*