

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES  
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ELECTRIQUE

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commandes électriques

*Thème*

**Utilisation de l'intelligence artificielle pour le  
diagnostic des systèmes  
Applications au Moteur Synchrone à Aimants  
Permanent**

Préparé par :

ZIDANE HADJ AISSA  
ZOUJJI MOKHTAR

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Qualité
C. BELFEDHAL	Pr	Président
D. TOUMI	MCA	Examinateur
S. LARIBI	MCA	Examinatrice
S. HASSAINE	Pr	Encadrant
A. TAHRI	MCB	Co-Encadrant

PROMOTION : 2022/2023

# *Remerciements*

*Tout d'abord, Merci Allah de nous avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'y aller jusqu'au bout du rêve et la volonté et la patience de mener à terme le présent travail.*

*C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière que nous remercions nos encadreurs Messieurs Hassaine Said et Tahri Ahmed pour leur soutiens, leur conseils judicieux et leurs grandes bienveillances durant l'élaboration de ce projet.*

*Nous remercions nos parents, nos frères, sœurs et toute nos familles pour leur soutien. Sans leurs encouragements, nous n'aurons pas pu mener à bien ce travail.*

*Nous remercions également les membres des jurys pour l'effort qu'ils feront dans le but d'examiner ce modeste travail.*

*Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce travail.*

### Résumé:

Grâce à leurs performances en termes d'efficacité énergétique, les machines synchrones à aimants permanents (*MSAP*), sont utilisées dans les chaînes de traction, des véhicules hybrides et électriques. Toutefois, en raison de conditions de fonctionnement assez sévères, différents types de défauts sont capables de survenir dans les composants de la machine, ses organes de commande ou de mesure. Ainsi, l'intégration d'une approche du diagnostic intelligent de défauts de l'actionneur devient de plus en plus primordiale. Dans ce contexte, l'objectif du mémoire est de contribuer au diagnostic et à la caractérisation de défauts dans la *MSAP* en faisant appel aux techniques de l'intelligence artificielle. une approche analytique de modélisation de la *MSAP* et des défauts de court-circuit inter-spores, est proposée. L'intérêt majeur du tel modèle, dans le cadre du diagnostic, est d'étudier le comportement de la machine en présence de défauts étudiés afin d'en déduire les méthodes de détection intelligentes à base des réseaux de neurones les plus adaptées.

**Mots clés :** Machines synchrones ; Modélisation; Diagnostic, Court-circuit;

### Abstract:

Thanks to their performance in terms of energy efficiency, permanent magnet synchronous machines (PMSMs) are used in the traction systems of hybrid and electric vehicles. However, due to relatively harsh operating conditions, various types of faults can occur in the machine components, control units, or measuring devices. Thus, the integration of an intelligent diagnostic approach for actuator faults becomes increasingly crucial. In this context, the objective of this thesis is to contribute to the diagnosis and characterization of faults in PMSMs by employing artificial intelligence techniques. an analytical approach for modeling PMSMs and inter-turn short-circuit faults is proposed. The major advantage of such a model, within the diagnostic framework, is to study the machine's behavior in the presence of the studied faults in order to deduce the most suitable intelligent detection methods based on neural networks.

**Keywords:** Synchronous machine; diagnosis, short-circuit; modeling.

### ملخص:

بفضل أدائها في مجال كفاءة الطاقة، تُستخدم آلات المغناطيس الدائم التزامنية في سلاسل الجر للمركبات الهجينة والكهربائية. ومع ذلك، بسبب ظروف التشغيل القاسية، يمكن حدوث مختلف أنواع العيوب في مكونات الجهاز وأجهزته التحكمية والقياسية. وبالتالي، يصبح دمج نهج تشخيص العيوب الذكي للمحرك أمراً أكثر أهمية. في هذا السياق، يهدف هذا البحث إلى المساهمة في تشخيص وتوصيف العيوب في آلة المغناطيس الدائم التزامنية باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي. يتم تقديم نهج تحليلي لنموذج آلة المغناطيس الدائم التزامنية وعيوب الدوائر القصيرة بين اللفات. والميزة الرئيسية لهذا النموذج، في سياق التشخيص، هي دراسة سلوك الجهاز في وجود العيوب المدروسة لاستنتاج أساليب الكشف الذكية المعتمدة على شبكات الأعصاب الأكثر ملاءمة.

## *Liste des Abréviations*

MSAP	Machines Synchrones à Aimants Permanents.	
F.é.m	force électromotrice	[V]
$[V_s]$	Vecteur tensions statoriques	
$V_s$	Tensions de phases	[V]
$v_{as}, v_{bs}, v_{cs}$	Tensions des phases a,b,c	[V]
$[I_s]$	Vecteur courant statoriques	
$I_s$	Courant de phases	[A]
$i_{as}, i_{bs}, i_{cs}$	Courant des phases a,b,c	[A]
$[\Phi_s]$	Matrice de flux statorique	
$\Phi_s$	Flux statorique	[Wb]
$[R_s]$	Matrice des résistances statorique	
$R_s$	Résistance de phases	[ $\Omega$ ]
$R_{as}, R_{bs}, R_{cs}$	Résistance des phases a,b,c	[ $\Omega$ ]
$[\Phi_m]$	Vecteur du flux créé par les aimants	
$\Phi_m$	Flux créé par les aimants	[Wb]
$L_{ss}$	L'inductance qui est circulante symétrique	[H]
$[L_s]$	Matrice des Inductance statorique	
$L_s$	L'inductance statorique	[H]
$[E_s]$	Vecteur des f.é.m de phases	
$E_s$	f.é.m de phases.	[V]
$\theta$	La position angulaire du rotor.	[rad]
$\Phi_{mp}$	Valeur constante (amplitude) du créé par l'aimant à travers l'enroulement statorique	[Wb]
$\omega_r$	La pulsation mécanique du rotor	[Rad/s]
$P$	Nombre de paires de pôles	
$C_{em}$	Couple électromagnétique.	[N.M]
$J$	Moment d'inertie du rotor.	[kg·m <sup>2</sup> ]
$\Omega_r$	Vitesse de rotation électrique du rotor.	[rpm]
$F$	Le coefficient de frottement visqueux.	[N·s/m <sup>2</sup> ]
$C_{ch}$	Le couple de charge supplémentaire direct.	[N.M]
$N_s$	Nombre de spires par phase	

$N_f$	Nombre de spires de la partie du bobinage concernée par le défaut (sous-bobine bs2).	
$v_{bs1}$	Tensions traversant la bobine saine	[V]
$v_{bs2}$	Tensions traversant la bobine défectueuse	[V]
$R_{b1}$	Résistance de la sous-bobine saine	[ $\Omega$ ]
$R_{b2}$	Résistance de la sous-bobine en défaut ( $b_{s2}$ )	[ $\Omega$ ]
$L_{b1}$	L'inductance de la sous-bobine saine ( $b_{s1}$ )	[H]
$L_{b2}$	L'inductance de la sous-bobine en défaut ( $b_{s2}$ )	[H]
$M_{b1b2}, M_{b2a}$ et $M_{b2c}$	Les inductances mutuelles entre la sous-bobine $b_{s2}$ et les bobines $b_{s1}, a_s$ et $c_s$ .	[H]
$\sigma$	Coefficient de gravité de court-circuit	
$r_f$	La résistance de défaut	[ $\Omega$ ]
$i_f$	Le Courant de défaut	[A]
$L$	L'inductance propre de chaque phase.	[H]
$M$	La mutuelle inductance entre les phases	[H]
$\sigma_{bob}$	Le rapport du nombre de spires court-circuitées de la partie en défaut	
$L_{bob1}$	Inductances propres élémentaire saine	[H]
$L_{bob2}$	Inductances propres élémentaire en défaut	[H]
$M_{bob12}$	Inductances propres élémentaire en défaut	[H]
$q$	bobine élémentaire	
FFT	Transformée de Fourier rapide	
ML	Machine Learning (Apprentissage automatique)	
ANN	réseaux de neurones	
RGL	Régressions logistiques	
TP	True positives (vrais positifs)	
TN	True Negatives (Vrais négatifs).	
FP	False Positives (Faux positifs).	
FN	False negatives. (Faux négatifs).	

## *Sommaire*

Introduction générale.....	12
<b>Chapitre I :Etat de l'art de l'étude des Défaillances dans les Machines Électriques</b>	
I.1.Introduction.....	4
I.2.Constitution de la machine synchrone à aimant permanent.....	4
I.2.1. Stator.....	4
I.2.2. Rotor.....	4
I.3.Les différents types de la MSAP.....	5
I.4.Principe de fonctionnement de la machine synchrone à aimant permanent.....	6
I.5.Les défaillances dans les machines électriques.....	6
I.6.Etude statistique des défauts de la MSAP.....	7
I.7.Types des défauts dans les machines électriques.....	8
I.7.1.Défaillances des roulements mécaniques.....	8
I.7.2. Défauts rotoriques.....	8
I.7.3.Défauts statoriques.....	10
I.10.Surveillance et diagnostic de la <i>MSAP</i> .....	11
I.10.1. Surveillance.....	11
I.10.2. Diagnostic.....	12
Conclusion.....	14
<b>Chapitre II : Modélisation de la Machine Synchrone à Aimants Permanents à l'état sain et défaillant (court-circuit)</b>	
II.1. Introduction.....	16
II.2. Modélisation de la <i>MSAP</i> .....	16
II.2.1. Hypothèses considérées pour la modélisation.....	16
II.3. Modèle circuit électrique de la machine saine dans le repère triphasé.....	17
II.3.1. Les équations électriques.....	17
II.3.2. L'équation de couple électromagnétique.....	19
II.4. Modélisation de la machine en présence de défaut entre-spire.....	19
II.4.1. Défaut Court-circuit entre-spire.....	19
II.4.2. Modèles circuit électrique d'une <i>MSAP</i> en présence de défaut.....	20
II.4.3. Méthodes d'identification des paramètres du modèle circuit électrique.....	23
II.5.1. Résultats de simulation d'un fonctionnement sain.....	27
II.5.2. Résultats de simulation en présence de défaut.....	28
Conclusion.....	32

### **Chapitre III :Diagnostic de la Machine en présence de défaut de court-circuit entre-spices**

III.1.Introduction .....	34
III.1. Méthodes de diagnostic classique .....	34
III.1.1. Analyse des composantes symétriques des courants.....	34
III.1.2. Analyse du courant statorique par FFT .....	39
III.2. Méthodes de diagnostic intelligentes .....	40
III.2.1. Réseaux de neurones (ANN).....	40
III.2.2.1. Régression logistique ( <i>RLG</i> ) .....	43
III.3. Application au diagnostic de la machine synchrone a aimant permanent.....	44
III.3.1. Les étapes d'apprentissage.....	44
III.3.2. Test des Modèles.....	46
III.3.3. Comparaison des résultats.....	51
III.3.4. Vérification des Modèles .....	52
III.3.5. L'état de l'isolateur de moteur.....	56
III.4. Validation expérimentale .....	57
III.5. Analyse de défaut de Court-circuit avec effet du contrôleur.....	<b>59</b>
III.5.1. Résultats de simulation.....	59
III.5.2 Démarche de diagnostic en utilisant les modèles intelligents développées.....	61
Conclusion.....	<b>61</b>
Conclusion générale .....	<b>62</b>
Annexe A .....	<b>64</b>
Annexe B.....	<b>65</b>
Bibliographie.....	<b>66</b>

## **LISTE DES FIGURES**

### **Chapitre I : Etat de l'art de l'étude des Défaillances dans les Machines Électriques**

<b>Figure.I. 1.</b> Structure de machine (Rotor et Stator).....	5
<b>Figure.I. 2.</b> Types de rotor.....	5
<b>Figure.I. 3.</b> Les différents types de la MSAP .....	6
<b>Figure.I. 4.</b> Répartition des causes de défaillance des machines électriques.....	7
<b>Figure.I. 5.</b> Distribution des défauts dans une machine électrique.....	7
<b>Figure.I. 6.</b> Classification des défauts selon leurs origines .....	8
<b>Figure.I. 7.</b> Types d'excentricités statique (a), dynamique (b) et mixte (c).....	9
<b>Figure.I. 8.</b> Représentation de court-circuit inter-spires (a), inter-phases (b) et entre phase et neutre (c) .....	11
<b>Figure.I. 9.</b> Classification des méthodes du diagnostic .....	12

### **Chapitre II : Modélisation de la Machine Synchrone à Aimants Permanents à l'état sain et défaillant (court-circuit)**

<b>Figure.II. 1.</b> Schéma de la coupe transversale (a), et bobinage statorique équivalent (b) d'une MSAP .....	17
<b>Figure.II. 2.</b> Représentation schématique d'un défaut d'isolation entre spires sur une phase de stator ( $b_s$ ). .....	20
<b>Figure.II. 3.</b> Schéma équivalent de la machine à aimants avec un défaut entre-spires dans la phase $b_s$ . .....	21
<b>Figure.II. 4.</b> Schéma d'une bobine de phase d'une MSAP à rotor lisse, à une encoche par pôle et par phase et à $p$ paires de pôles. Elle comporte $p$ bobines élémentaires. ....	24
<b>Figure.II. 5.</b> Schéma d'un défaut de court-circuit entre-spires d'une bobine élémentaire (la $1^{ère}$ par exemple). .....	25
<b>Figure.II. 6.</b> Schéma d'un défaut de court-circuit entre-spires comprenant $q-1$ bobines élémentaires complètes et une fraction d'une bobine élémentaire (de $\sigma_{bob}\%$ la $q^{ème}$ bobine élémentaire par exemple).....	26
<b>Figure.II. 7.</b> Évolutions des courants statorique $iabc$ de la MSAP.....	27
<b>Figure.II. 8.</b> Evolution du couple électromagnétique.....	27
<b>Figure.II. 9.</b> Evolution de la vitesse de rotation .....	27
<b>Figure.II. 10.</b> Evolutions des courants statoriques $iabc$ à l'instant $t=0.7s$ . ....	28
<b>Figure.II. 11.</b> Evolution du courant du défaut à l'instant $t=0.7sec$ .....	30
<b>Figure.II. 12.</b> Evolution du couple électromagnétique.....	31
<b>Figure.II. 13.</b> Evolution de vitesse de rotation .....	32



**Chapitre III :Diagnostic de la Machine en présence de défaut de court-circuit entre-spires**

<b>Figure.III 1.</b> Bloc de composantes symétriques des courants.....	35
<b>Figure. III 2.</b> Evolutions des composantes positive et négative pour $r_f = 10$ et $\sigma = 0.5$ .....	35
<b>Figure. III 3.</b> Evolutions des composantes positive et négative pour $r_f = 1$ et $\sigma = 0.5$ .....	36
<b>Figure.III 4.</b> Evolutions des composantes positive et négative pour $r_f = 0.1$ et $\sigma = 0.5$ .....	36
<b>Figure. III 5.</b> Variation de l'amplitude de composants symétrique (Négative). .....	36
<b>Figure. III 6.</b> L'amplitude de composante symétrique négative. ....	37
<b>Figure.III 7.</b> L'angle de composante symétrique négative en présence de défaut à la phase a.....	38
<b>Figure III 8.</b> L'angle de composante symétrique négative en présence de défaut à la phase c.....	38
<b>Figure. III 11.</b> Structure de réseau de neurones à 3 couches.....	41
<b>Figure. III. 12.</b> Principe de calcul de réseaux de neurones.....	41
<b>Figure. III 13.</b> Principe de Feedforward et Backpropagation. ....	43
<b>Figure. III 14.</b> Types des régressions logistiques.....	44
<b>Figure. III 15.</b> Confusion Matrix. ....	46
<b>Figure.III 16.</b> Résultat de vérification de Modèle de l'emplacement la phase de défaut (Cas sain)...	52
<b>Figure.III 17.</b> Résultat de vérification de Modèle de l'emplacement la phase de défaut (Cas de défaut à la phase a).....	52
<b>Figure.III 18.</b> Résultat de vérification de Modèle de détection l'emplacement de défaut (Cas de défaut à la phase b).....	52
<b>Figure.III 19.</b> Résultat de vérification de Modèle de détection l'emplacement de défaut (Cas de défaut à la phase c).....	53
<b>Figure.III 20.</b> Résultat de vérification de Modèle de détection l'emplacement de défaut (Cas de défaut à la phase a « $f=20$ $r_f=5$ $\sigma=0.2$ »).....	53
<b>Figure.III 21.</b> Résultat de vérification de Modèle de prédit la gravité de défaut ( $\sigma=0$ , $f=66.67$ ).....	53
<b>Figure.III 22.</b> Résultat de vérification de Modèle de prédit la gravité de défaut ( $\sigma=50\%$ , $f=66.67$ )....	54
<b>Figure.III 23.</b> Résultat de vérification de Modèle de prédit la gravité de défaut ( $\sigma=30\%$ , $f=66.67$ )...	54
<b>Figure.III 24.</b> Résultat de vérification de Modèle de prédit la gravité de défaut ( $\sigma=20\%$ , $f=66.67$ )...	54
<b>Figure.III 25.</b> Résultat de vérification de Modèle de prédit la résistance de défaut ( $r_f=0.1$ ).....	55
<b>Figure.III 26.</b> Résultat de vérification de Modèle de prédit la résistance de défaut ( $r_f=3.5$ ).....	55
<b>Figure.III 27.</b> Résultat de vérification de Modèle de prédit la résistance de défaut ( $r_f=6$ ).....	55
<b>Figure.III 28.</b> L'état de l'isolation à l'aide de variation de la résistance de défaut.....	57
<b>Figure.III 29.</b> Evolutions des Tension $V_{abc}$ .....	57
<b>Figure.III 30.</b> Evolutions des Cornant $I_{abc}$ et $I_{cc}$ .....	57
<b>Figure.III 31.</b> Harmonique orge 5 de tension.....	58
<b>Figure.III 32.</b> Résultat de validation de module.....	58
<b>Figure.III 33.</b> Evolutions des Cornant $I_{abc}$ (Cas de défaut à la phase a ,b et c ).....	59

<b>Figure.III 34.</b> Evolutions des Cornant $I_c$ (Cas de défaut à la phase a ,b et c ).....	59
<b>Figure.III 35.</b> Evolutions des Tension $V_{abc}$ (Cas de défaut à la phase a).....	60
<b>Figure.III 36.</b> Evolutions des Tension $V_{abc}$ (Cas de défaut à la phase b).....	60
<b>Figure.III 37.</b> Evolutions des Tension $V_{abc}$ (Cas de défaut à la phase c).....	60

***LISTE DES TABLEAU***

**Tableau.III. 1.**Matrice de confusion de Modèle ANN (Modèle de détection l'emplacement de défaut) ..... 46

**Tableau.III. 2.**Matrice de confusion de Modèle RGL (Modèle de détection l'emplacement de défaut) ..... 47

**Tableau. III. 3.**Matrice de confusion de Modèle ANN (Modèle de prédit la gravité de défaut) ..... 47

**Tableau. III. 4.**Matrice de confusion de Modèle RGL (Modèle de prédit la gravité de défaut) ..... 48

**Tableau. III. 5.**Matrice de confusion de Modèle ANN (Modèle de prédit de la résistance de défaut) 49

**Tableau.III. 6.**Matrice de confusion de Modèle RGL (Modèle de prédit de la résistance de défaut).. 50

**Tableau.III. 7.**Performance du modèle de détection la phase de défaut ..... 51

**Tableau.III. 8.**Performance du modèle de prédit la gravité de défaut ..... 51

**Tableau.III. 9.**Performance du modèle de prédit de la résistance de défaut ..... 51

**Tableau.III. 10.** L'état de l'isolateur de moteur ..... 56

# **Introduction générale**

# Introduction générale

La détection et la localisation des défaillances dans les systèmes industriels sont essentielles pour améliorer la productivité. L'objectif principal est de repérer et d'identifier les défaillances des équipements. Les machines électriques sont largement utilisées dans de nombreux processus et leur surveillance est devenue une préoccupation constante, en particulier dans les systèmes embarqués. Les défauts dans les machines électriques peuvent avoir une origine mécanique (excentricité du rotor, problèmes d'attelage, usure des roulements), électrique (court-circuit dans l'enroulement statorique, rupture de barre ou d'anneau) ou magnétique (problèmes d'isolation entre les tôles statoriques). Les variables mesurables telles que les courants, les tensions, la vitesse ou la température peuvent fournir des informations significatives sur les défauts et servir à déterminer un ensemble de paramètres représentant les signatures de défaillance du moteur.

Cette étude se concentre sur les défauts électriques pouvant survenir au niveau du stator des machines à aimants permanents. Les défauts de bobinage sont parmi les plus courants. Les machines à aimants permanents génèrent un flux permanent grâce aux aimants présents dans le rotor. Les courts-circuits entre les spires sont particulièrement préoccupants, car même après la déconnexion de la machine de son alimentation, le défaut persiste. La présence d'un flux variable dans la spire en court-circuit induit une force électromotrice et un courant potentiellement destructeur. Étant donné la gravité de ces défauts, il est essentiel d'utiliser des techniques de détection réactives pour les détecter le plus tôt possible.

Le mémoire est structuré en trois chapitres :

**I. Le premier chapitre présente** les différents types de défaillances qui peuvent survenir sur les machines électriques. Une étude bibliographique sur les différents types de défauts (électriques, mécaniques,) pouvant se produire dans les machines électriques est présentée ainsi que les méthodes de surveillance d'apparition de ces défauts.

**II. Le deuxième chapitre** est consacré aux défauts de court-circuit entre spires dans une phase statorique, qui est l'un des défauts qui menace le plus les *MSAP*, notamment ceux utilisés dans les actionneurs des systèmes embarqués.

Nous présentons d'abord les hypothèses de modélisation d'une *MSAP* nécessaires à l'établissement d'un modèle simple de type circuit électrique. Ensuite, après un rappel du modèle de type circuit d'une *MSAP* à l'état sain avec un rotor lisse, nous présentons le modèle de la même machine en présence d'un défaut entre spires d'une phase, en augmentant l'ordre du modèle de la machine saine. Après la modélisation, nous avons montré les méthodes pour identifier les paramètres du modèle de circuit électrique. Enfin, nous présentons les résultats du moteur à l'état sain et défaillant.

**III.** Le **troisième le chapitre** examine les approches de diagnostic classique et intelligentes. Nous commençons par discuter des méthodes de diagnostic classiques, parmi lesquelles nous utilisons l'analyse des composantes symétriques des courants et l'analyse du courant statorique par transformée de Fourier (*FFT*). Ensuite, nous introduisons les méthodes intelligentes, notamment les réseaux de neurones et la régression logistique, que nous avons également employé. Enfin, nous présentons les résultats obtenus après l'application de chaque méthode.

**Chapitre I**

**Etat de l'art de l'étude des Défaillances**  
**dans les Machines Électriques**

## I.1. Introduction

Un moteur synchrone à aimant permanent est un type de moteur électrique où les aimants permanents sont utilisés pour produire un champ magnétique constant. Contrairement aux moteurs asynchrones, les moteurs synchrones tournent à une vitesse constante qui dépend de la fréquence du courant d'entrée et du nombre de pôles magnétiques dans le rotor.

Les moteurs synchrones à aimant permanent sont largement utilisés dans les applications qui nécessitent une haute précision de vitesse, une efficacité énergétique élevée et une faible maintenance. Ces moteurs sont particulièrement adaptés pour les applications industrielles, telles que les pompes, les ventilateurs, les compresseurs et les machines-outils. Ils sont également de plus en plus utilisés dans les véhicules électriques et les énergies renouvelables, tels que les éoliennes. En raison de leur conception avancée, les moteurs synchrones à aimant permanent sont plus coûteux que les moteurs asynchrones, mais ils offrent des performances supérieures et une longue durée de vie. [05]

## I.2. Constitution de la machine synchrone à aimant permanent

La machine synchrone à aimants permanents est un dispositif électromécanique qui comprend un stator et un rotor. Le stator est une partie fixe où se trouvent les enroulements liés à la source. Le rotor est une partie mobile qui est monté sur l'axe de rotation [01].

### I.2.1. Stator

Le stator est constitué d'un certain nombre de bobines réparties dans des encoches qui constituent trois bobinages indépendants. Elles sont destinées à créer un champ magnétique et tournant lorsqu'on les alimente par un système de tensions ou de courants triphasés. Les topologies rencontrées dans les bobinages des machines tournantes à courants alternatifs sont nombreuses. On distingue deux grandes catégories de bobinage. Les bobinages dits réguliers, parmi lesquels on trouve les bobinages à pas diamétral, les bobinages à pas raccourcis, les bobinages répartis et les bobinages non réguliers, comme les bobinages à trous ou à nombre fractionnaire d'encoches par pôle et par phase [01].

### I.2.2. Rotor

Le rotor, quant à lui, est constitué d'un noyau de fer sur lequel sont disposées des aimants permanents qui servent à générer une excitation permanente. Les aimants permanents sont des matériaux magnétiques "durs", c'est-à-dire des matériaux qui, une fois aimantés, conservent leur aimantation à la température d'utilisation. Leurs propriétés magnétiques sont déterminées tout d'abord par les propriétés intrinsèques des composés qui les constituent. Elles dépendent aussi fortement de la microstructure du matériau liée au procédé de fabrication. Les aimants permanents peuvent être montés en surface ou insérés dans le rotor [01].

Il existe deux types de rotors:

**Rotors à pôles lisses:** L'entrefer est d'épaisseur constante; en un point donné, elle ne dépend pas de la position de l'arbre. On les trouve sur les machines [02] :

- à faible nombre de pôles (2 ou 4)
- de faible diamètre



- de longueur importante.

**Rotors à pôles saillants :** L'épaisseur de l'entrefer est variable ; en un point donné, elle dépend de la position de l'arbre. On les trouve sur les machines [02]:

- à nombre de pôles élevés (jusqu'à 40)
- de diamètre élevé, de longueur relativement faible.

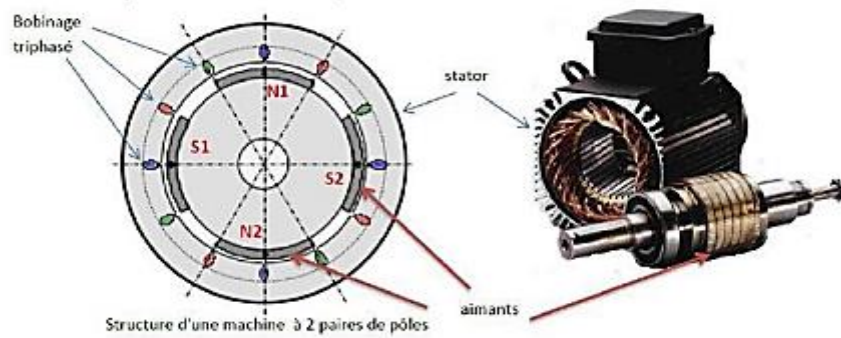
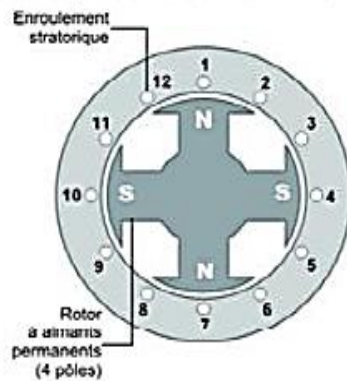


Figure. I. 1 Structure de machine (Rotor et Stator).

### Rotor à pôles saillants



### Rotor à pôles lisses

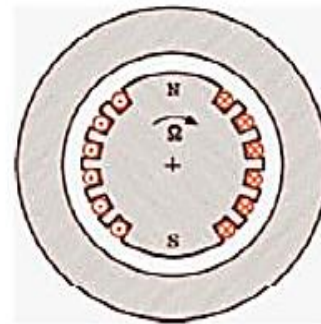


Figure. I. 2.Types de rotor

## I.3 Les différents types de la MSAP

Les machines à aimants permanents peuvent être construites avec plusieurs de configurations rétorques. Leur classification globale en terme du placement des aimants est le suivant [03]:

- Aimants en surface
- Aimants insérés
- Aimants enterrés
- Aimants à concentration de flux

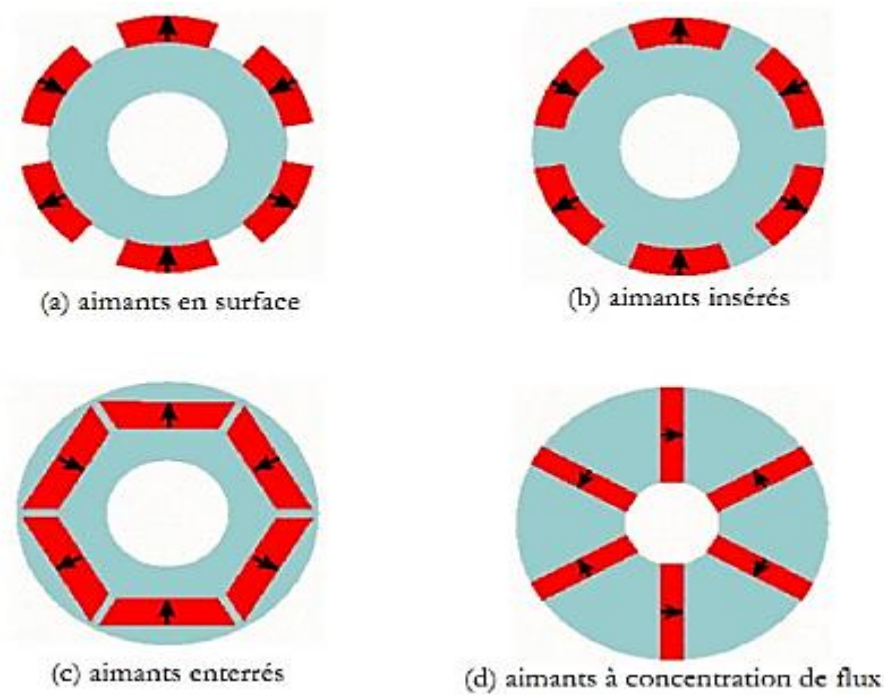


Figure.I. 3.Les différents types de la MSAP

#### I.4 Principe de fonctionnement de la machine synchrone à aimant permanent

Elle comprend principalement deux parties mobiles l'une par rapport à l'autre: l'inducteur qui crée un champ magnétique et l'induit dans lequel ce champ induit une force électromotrice; ces deux parties sont séparées par un entrefer.

Les bobines (phases) du stator sont reliées à une source triphasée de tensions sinusoïdales. La superposition des trois flux magnétiques créée par les trois bobines du stator produit un flux magnétique sinusoïdal tournant à la fréquence de la source de tension. Ce flux magnétique tournant interagit avec le flux de rotor dans l'entrefer qui sépare le stator du rotor et crée ainsi une force électromagnétique. Cette force se traduit par la rotation du rotor. La vitesse de rotation du rotor est proportionnelle à la fréquence de la source de tension [4].

#### I.5 Les défaillances dans les machines électriques

Par panne d'une machine électrique, on entend tout événement qui entraîne un comportement anormal de la machine et qui peut l'endommager à court ou à long terme. Les pannes peuvent être de différents types, électriques, mécaniques ou encore magnétiques. Leurs raisons sont nombreuses et peuvent être divisées en trois groupes [05] :

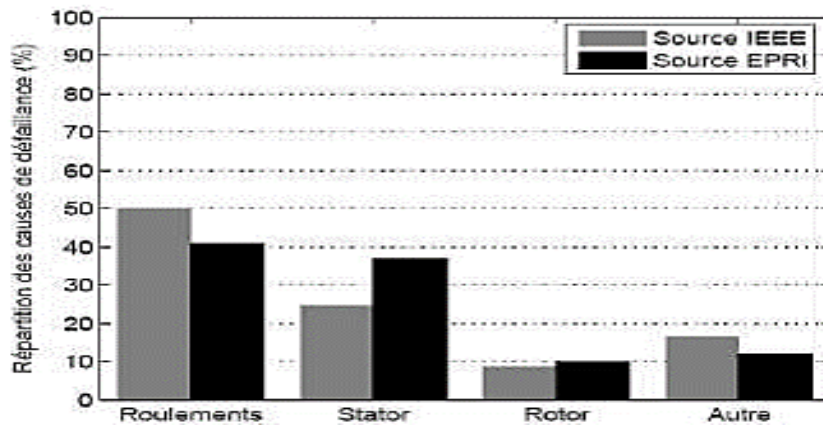
- **Les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts:** surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), survoltage d'alimentation, problème d'isolation électrique, usure des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations, [05]
- **Les amplificateurs de défauts:** surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement, [05].

- **Les vices de fabrication et les erreurs humaines:** défauts de fabrication, composants défectueux, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine, [05].

### I.6 Etude statistique des défauts de la MSAP

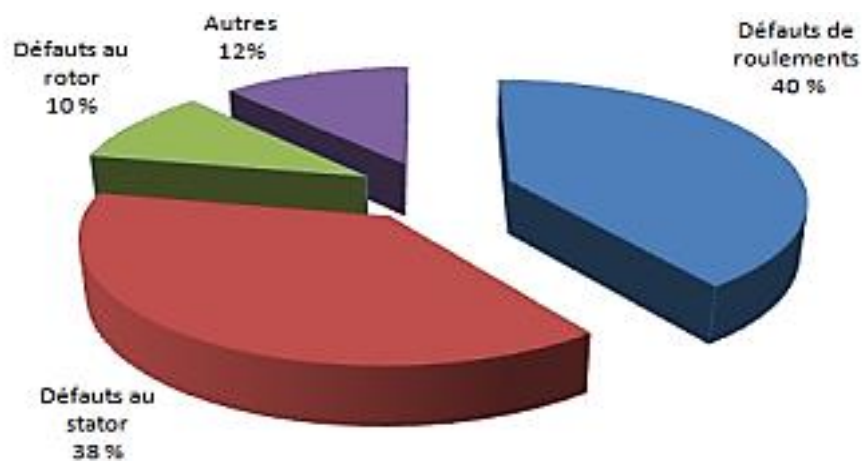
Des études statistiques ont montré que les pannes imputables aux défauts des bobinages statoriques sont parmi les défauts les plus fréquents après les défauts de roulement, quelle que soit la gamme de puissance des machines considérées. Selon les différentes sources citées, les pannes dues aux défaillances du bobinage statorique représentent entre 25 et 35% des pannes totales [10].

Les moteurs fonctionnent très souvent dans des conditions extrêmes (offshores). Ils sont souvent démarrés directement en ligne, ce qui conduit à de grands courants de démarrage et fortes pulsations du couple. Ces conditions sont néfastes pour le moteur, et conduisent à affaiblir ces différents composants avec le temps (Fig.I.5)



**Figure.I. 4.** Répartition des causes de défaillance des machines électriques.

Si l'on compare les résultats de cette étude avec ceux présentés par IEEE et EPRI (Fig.I.4), il devient clair que la survenance d'un défaut dépend considérablement de l'application spécifique de la machine et de son environnement [10].



**Figure.I. 5.** Distribution des défauts dans une machine électrique

## I.7 Types des défauts dans les machines électriques

Dans les machines électriques, les défauts peuvent provenir de la partie fixe (stator) ainsi que de partie mobile (rotor), d'où la classification ci-après [12].

### I.7.1 Défaillances des roulements mécaniques

Les roulements mécaniques représentent l'élément de maintien de l'axe de la machine permettant d'assurer une bonne rotation du rotor. La défaillance de ces derniers présente la plupart des défauts survenant dans les roulements des moteurs à induction ainsi que les raisons de leur vieillissement.

Ce type de défaut se traduit par des oscillations du couple de charge, une apparition de pertes supplémentaires et un jeu entre la bague interne et la bague externe du roulement entraînant des vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinal de la machine. Dans le cas le plus défavorable, la présence d'un roulement défectueux peut amener au blocage du rotor [05].

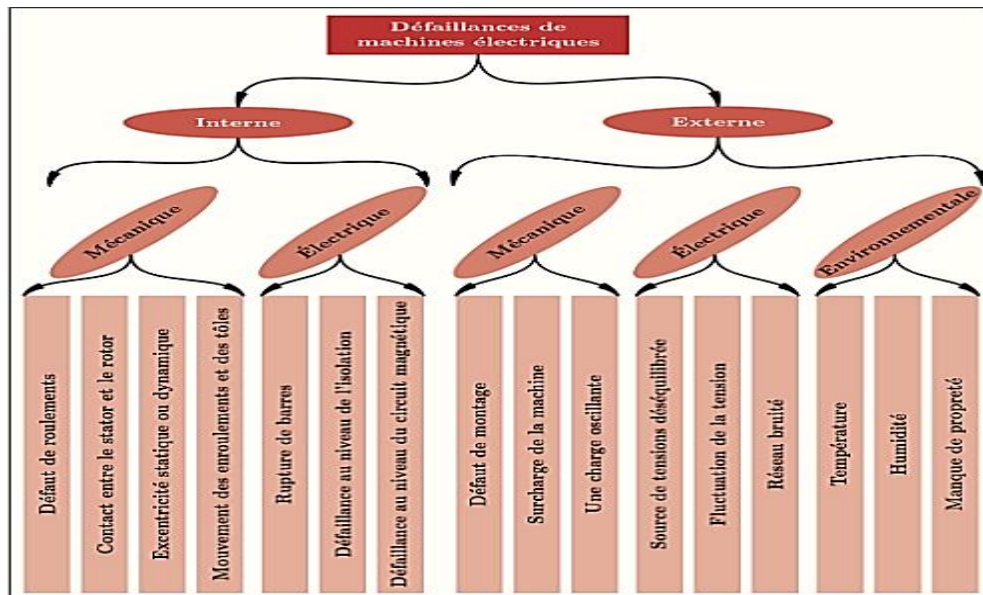


Figure.I. 6. Classification des défauts selon leurs origines

### I.7.2. Défauts rotoriques

Presque toutes les machines électriques ont une similarité de construction du stator et, par conséquent, les défauts sont également les mêmes. Toutefois, il existe une gamme de configurations du rotor selon le type de la machine pour le rotor, les défaillances sont essentiellement dues à un problème [06]:

Thermique (surcharge,...),

Électromagnétique (force en  $B^2(t)$ ...),

Résiduel (déformation,...),

Dynamique (arbre de transmission,...),

Environnemental (agression,...),

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du rotor, peuvent être définis comme suit: [05]

Excentricité statique et dynamique,

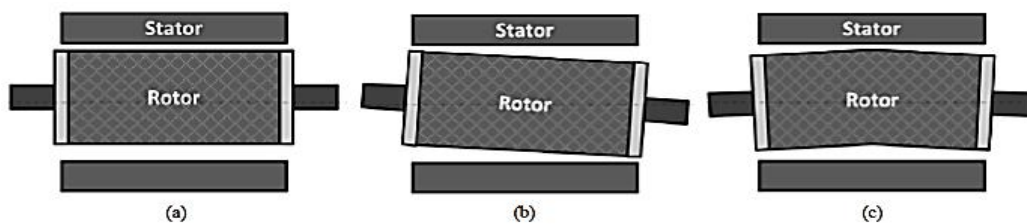
Désaimantation (*MSAP*).

### a. Excentricité statique et dynamique

Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations du couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor). Ce phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique) dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut de roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage) [07].

Trois cas d'excentricité sont généralement distingués :

- L'excentricité statique, le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe.
- L'excentricité dynamique, le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe.
- L'excentricité qu'on pourrait qualifier de 'mixte', associant les deux cas précédemment cités. Ce défaut modifie les comportements magnétique et mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur l'armature statorique ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation. D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements [07].



**Figure.I. 7.**Types d'excentricités statique (a), dynamique (b) et mixte (c)

### b. Désaimantation (MSAP)

La machine à aimants permanents est constituée d'un rotor équipé d'aimants permanents, qui peuvent être montés en sa surface ou bien intégrés. La démagnétisation de ces aimants est une des problématiques les plus courantes de ce type de machine, en raison de leur coût relativement élevé qui représente environ 80% du coût réel de la machine [09].

Dans des conditions normales, les aimants produisent un flux rotorique constant. Cependant, ce flux peut varier pour des nombreuses causes, elles que:

- La réaction d'induit: le courant au stator créé un champ qui s'oppose à celui produit par les aimants ce qui peut déplacer leur point de fonctionnement hors de la zone limite de réversibilité,
- La température élevée: qui réduit l'induction rémanente des aimants.
- Les fissures: qui se forment dans les aimants lors de leur fabrication et qui peuvent conduire à leur désintégration et donc leur détérioration.

### I.7.3 Défauts statoriques

L'armature statorique, munie de son bobinage est une partie de la machine qui subit beaucoup de contraintes et dont les effets sont plus importants à cause de la complexité de la structure et la fragilité de certaines parties telles que les isolants. Pour le stator [05], les origines les plus fréquents des défauts du bobinage statorique, peuvent être classés en quatre classes [09]:

- **Thermique:** l'isolation est conçue pour avoir une certaine durée de vie à la température nominale. Toutefois, si la température augmente au-dessus de cette température de fonctionnement, la durée de vie raccourci rapidement. Cette augmentation de la température peut être due à une variation de tension ou du déséquilibre, à la répétition des démarrages dans un court laps de temps, à des surcharges, à une mauvaise ventilation ou alors à une haute température ambiante [08].
- **Electrique:** une tension supérieure à la valeur nominale ou de hautes valeurs de  $dV/dt$  dû à l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du convertisseur statique, vont conduire à la dégradation du diélectrique assurant l'isolation des bobines. La présence d'un fort champ électrique interne conduira à des décharges partielles dans les cavités de l'isolant. Il en résulte des spots carbonisés dans l'isolation. Ces spots causent des déformations du champ électrique (augmentation dans la région du défaut) [08].
- **Mécanique:** les démarrages répétitifs des machines ont pour conséquence d'augmenter la température dans le cuivre (bobinage statorique et cage). Cet effet cyclique provoque des dilatations et contractions répétitives de l'isolant. Cela pourrait entraîner des fissures dans l'isolant qui peuvent se propager et provoquer un début de court-circuit interne. Les efforts mécaniques sur les tôles et les conducteurs ont des composantes alternatives qui provoquent des vibrations de la structure. Ces vibrations provoquent l'érosion et l'abrasion de l'isolant entraînant leur détérioration. [05].
- **Environnemental:** la présence d'humidité ou de produits chimiques dans l'air ambiant peut détériorer la qualité de l'isolation et conduire à défaut d'enroulement. Le début de la dégradation entraîne des courants de fuites qui accélèrent la détérioration de l'isolant jusqu'au court-circuit franc. Une autre conséquence est la création de l'ozone et les oxydes d'azote qui peuvent se combiner avec l'humidité pour former de l'acide nitrique, qui détruit l'isolant. [05]

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit [06]

#### a. Défauts d'isolant dans un enroulement

Les pannes dues aux défauts des enroulements statoriques représentent entre 25% et 35% des pannes totales [09]. La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique,...) engendrent une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et mécanique.

Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné. Les différentes causes pour ce type de défaut sont [05]:

- Dégradation de l'isolant à la fabrication.
- Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.



- Courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge.
- Vibrations mécaniques.
- Vieillesse naturelle des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée.
- Même dans une utilisation normale, l'isolant finit naturellement par se dégrader.
- Fonctionnement dans un environnement sévère.

Lorsque le défaut de l'isolant se crée sur une spire, le courant de défaut circule entre le cuivre de cette spire et la tôle du stator (défaut phase - masse). Il peut aussi circuler entre deux spires d'une même phase si l'isolant qui les sépare est détérioré (défaut entre-spires). Dans le cas des bobinages à deux couches, une même encoche peut contenir des conducteurs de deux phases différentes. La détérioration simultanée et dans une même zone, des isolants de ces deux bobines provoque un contact électrique entre deux spires de deux phases différentes (défaut phase-phase). Ce type de défaut peut aussi exister dans les bobinages à une couche au niveau des têtes de bobines où les conducteurs de deux phases différentes peuvent entrer en contact. La topologie du circuit électrique est ainsi influencée par ces défauts [05].

### b. Défauts de court-circuit

Les défauts aux bobinages sont dus principalement à la détérioration des isolants des conducteurs lors du fonctionnement de la machine. Dans la plupart des cas, cette dégradation entraîne un court-circuit inter-spires et qui peut se dégénérer en des court-circuits inter-bobines, inter-phases et entre phases et neutre, jusqu'à l'arrêt complet probable de la machine. Ces trois types de court-circuits sont représentés dans la figure I.8. Un défaut de court-circuit inter-spires produit une valeur très importante du courant circulant dans la branche court-circuitée de la phase ce qui résulte d'un échauffement excessif des conducteurs. Dans ses conditions de fonctionnement, le moteur peut tomber en panne après quelques minutes de sa mise en service. En effet, et selon une règle générale, toute augmentation de 10°C de température par rapport à sa valeur nominale, réduit la durée de vie des conducteurs deux fois plus vite [09].

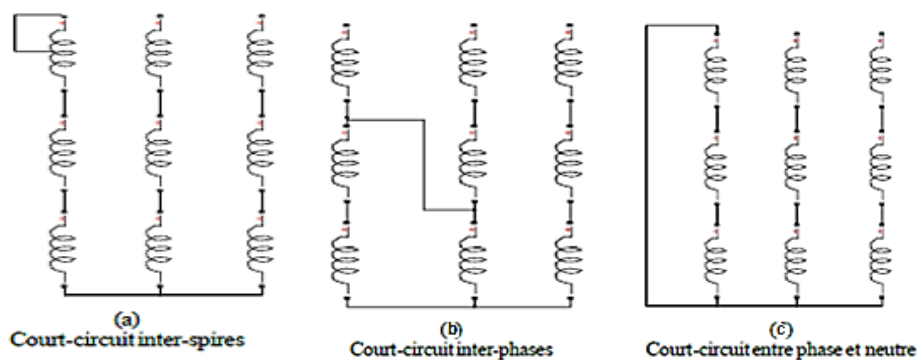


Figure.I. 8.Représentation de court-circuit inter-spires (a), inter-phases (b) et entre phase et neutre (c)

## I.10.Surveillance et diagnostic de la MSAP

### I.10.1. Surveillance

La surveillance d'un système est une tâche continue et en temps réel pour déterminer l'état d'un système. Elle se fait à travers l'enregistrement des informations pouvant indiquer la survenue d'éventuelles anomalies dans le comportement du système [11].

## I.10.2. Diagnostic

Dans l'industrie, le diagnostic est défini par l'ensemble d'actions visant à évaluer un procédé (système) et identifier la cause probable des défaillances à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test de son fonctionnement. [11]

Le diagnostic est en principe défini comme un processus à trois phases :

- Détection du mode de fonctionnement.
- Qualification du mode de fonctionnement.
- Décision à partir de la reconnaissance du mode de fonctionnement.

### (a) Classification des méthodes de diagnostic

On peut globalement distinguer deux grandes familles dans les méthodes de diagnostic:

- Les méthodes basées sur une modélisation des systèmes ou des signaux "diagnostic quantitatif".
- Les méthodes basées sur l'intelligence artificielle "diagnostic qualitatif".

En réalité, ces deux méthodes ne sont pas disjointes. Elles peuvent exister au sein d'un même système de diagnostic. L'utilisation conjointe des méthodes quantitatives et qualitatives permet l'exploitation de l'ensemble des données concernant le fonctionnement du système. La Fig. I.9 donne un panorama général des différentes méthodes de diagnostic [11]. Dans le diagnostic quantitatif, on peut distinguer deux types d'approches:

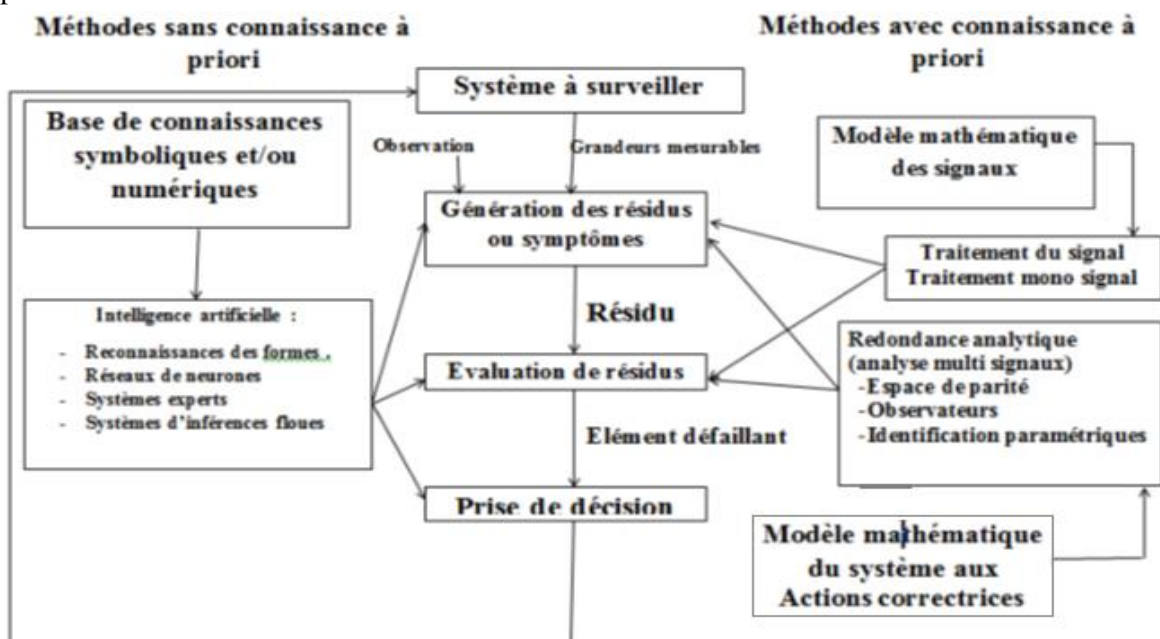


Figure.I. 9. Classification des méthodes du diagnostic

### a.1 Approches à base de modèle

Les méthodes de détection de défauts qui nécessitent une connaissance préalable du système. Elles impliquent la comparaison des signaux expérimentaux avec des modèles ou des paramètres pour détecter et identifier les défauts probables. Ces techniques exigent une connaissance de la plage de variation des modèles et des paramètres en fonction des conditions de fonctionnement. Ces techniques peuvent être classées en trois catégories [12].



- **Approche par estimation paramétrique**

Cette approche basée sur un modèle mathématique pour détecter et identifier les défaillances. Cette méthode nécessite la connaissance d'un modèle mathématique du système et l'estimation des paramètres à partir de mesures réelles. Pour détecter et identifier une défaillance, on compare les valeurs estimées avec les valeurs de référence de l'état normal du système [09].

- **Approche à base d'observateur**

Cette méthode consiste à estimer les états et les sorties du système en utilisant les grandeurs mesurables d'entrée et de sortie. Un vecteur de résidus est construit en comparant les sorties estimées et les sorties réelles. La détection d'une anomalie est effectuée en observant si un élément du vecteur de résidus dépasse un seuil de détection. Cette méthode permet de détecter et de localiser les anomalies [09].

- **Approche par espace de parité**

La méthode de la redondance analytique pour la détection de défauts dans un système. Cette méthode consiste à comparer les entrées et les sorties du système en utilisant des relations mathématiques pour vérifier leur cohérence. Le résidu est utilisé pour mesurer l'écart entre la mesure et la valeur calculée par le modèle, et une valeur non nulle indique la présence d'un défaut. Un résidu nul indique que le système est exempt de défaut [09].

## **a.2 Approches sans modèles**

Les approches de diagnostic sans modèles pour la détection de défauts dans un système. Ces approches ne nécessitent pas de modèle mathématique précis du système à surveiller, mais plutôt des indicateurs de défauts qui sont analysés par des techniques de traitement du signal ou des méthodes statistiques. Les méthodes sans modèle sont adaptées aux applications industrielles complexes où la conception d'un modèle précis est difficile, car elles s'appuient sur des connaissances du système basé sur l'expérience [12].

- **Approche signal (techniques de traitement du signal)**

L'approche de détection de défauts se base sur les modifications des caractéristiques des grandeurs électriques ou mécaniques mesurables d'un système, qui ont des profils typiques pour un état normal ou défaillant. En comparant ces profils, on peut identifier l'état réel du système et diagnostiquer les défauts. Les outils de détection de défauts sont classés en quatre catégories selon leur domaine d'application : temps, fréquences ... [01], [09], [05],[12].

- (a) Analyse fréquentielle**

L'analyse fréquentielle se base sur l'étude de la représentation du signal dans le domaine fréquentiel [09].

- (a.1) Analyse spectrale**

L'analyse spectrale est utilisée depuis longtemps pour détecter des défaillances dans les machines électriques, en particulier les ruptures de barres au rotor, la dégradation des roulements, les excentricités et les court-circuits dans les bobinages. Cette approche est efficace car de nombreux phénomènes se traduisent par l'apparition de fréquences directement liées à la vitesse de rotation ou à des multiples de la fréquence d'alimentation [05].

La surveillance par analyse spectrale de la machine consiste à effectuer une transformée de Fourier des grandeurs touchées par le défaut et à visualiser les fréquences parasites qui constituent la signature d'un défaut dans la machine. Les grandeurs sélectionnées peuvent être électriques (comme les courants de ligne) ou mécaniques (comme les vibrations et le couple électromagnétique). Cette technique est rapide et peu coûteuse car elle nécessite simplement un capteur de courant ou de vibration [05].

- **Méthodes par intelligence artificielle**

Les techniques d'Intelligence Artificielle (*IA*) exploitent les connaissances heuristiques du domaine. Ce terme comprend diverses techniques telles que les réseaux de neurones, la logique floue ou bien une combinaison neuro-floue [12].

- a. Réseaux de neurones**

Les réseaux de neurones formels sont des outils d'*IA* qui conviennent aux problèmes de classification par apprentissage. Leurs principaux avantages sont leur capacité d'apprentissage et de généralisation des connaissances acquises pour des entrées inconnues. Un réseau de neurones peut être utilisé comme un outil supplémentaire de surveillance ou comme un outil principal de détection et de diagnostic [09].

- b. Logique floue**

La logique floue est basée sur le raisonnement humain qui est souvent imparfait et imprécis. Le concept central de cette logique est celui des sous-ensembles flous et chaque entrée est associée à des sous-ensembles flous avec des fonctions d'appartenance correspondantes. Les systèmes flous traitent les valeurs des entrées par un système de règles de la forme « Si-Alors ». Ainsi, la mise en œuvre d'un classificateur flou nécessite deux étapes principales : le choix des fonctions d'appartenance et la construction des règles de décision [09], [12].

- c. Logique neuro-floue**

Logique neuro-floue qui combine la logique floue et les réseaux de neurones artificiels. Cette technique utilise un réseau de neurones pour générer les fonctions d'appartenance et les règles de décision du système flou, ce qui limite l'intervention de l'expert et du raisonnement humain. L'efficacité de la logique neuro-floue a été démontrée dans la classification des défauts par rapport à un réseau de neurones classique [09].

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous parlons d'abord sur le moteur synchrone, avec ses types et de principe de son fonctionnement, puis nous discutons pour les statistiques sur les défauts de ce moteur, en mentionnant ces défauts et la raison de leur apparition. Après cela, nous avons discuté sur le diagnostic et de ses méthodes, dont certaines que nous utilisons dans notre travail.

**Chapitre II :**  
**Modélisation de la Machine Synchrone à**  
**Aimants Permanents à l'état sain et**  
**défaillant (court-circuit)**

## II.1. Introduction

La machine synchrone à aimants permanents (*MSAP*) est une technologie de moteur électrique de plus en plus courante dans les applications industrielles et automobiles en raison de son haut rendement, de sa densité de puissance élevée et de sa faible maintenance. Cependant, comme tout système mécanique, la machine synchrone à aimants permanents peut être sujette à des dégradations et des pannes, ce qui peut réduire considérablement sa performance et sa durée de vie.

- la modélisation de la *MSAP* à l'état sain est essentielle pour comprendre les performances de la machine dans des conditions normales de fonctionnement.
- les modèles de la *MSAP* à l'état sain peuvent être utilisés pour concevoir et optimiser les performances de la machine pour différentes applications. Ils peuvent également être utilisés pour évaluer les performances de la machine en fonction de différentes configurations et paramètres de conception.

L'état court-circuit est l'une des dégradations les plus courantes qui peuvent affecter la *MSAP*. Cette dégradation peut entraîner une augmentation de la température, des vibrations excessives, une réduction de la durée de vie de la machine et une dégradation de ses performances.

- la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents à l'état court-circuit est essentielle pour comprendre les effets de cette dégradation sur les performances de la machine.
- les modèles de la *MSAP* à l'état court-circuit peuvent être utilisés pour évaluer les performances de la machine dans différentes conditions de court-circuit. Ils permettent également de développer des stratégies de maintenance prédictive pour minimiser les temps d'arrêt coûteux et prolonger la durée de vie de la machine.

## II.2. Modélisation de la *MSAP*

Dans cette partie, on présente un modèle de type circuit électrique pour un *MSAP* avec défaut entre-spines qui est beaucoup plus simple à utiliser. Ce circuit fait intervenir des résistances, inductances et mutuelles dont les valeurs peuvent être déterminées de différentes manières. Dans les modèles circuits, la première étape consiste à représenter le dispositif par autant de circuits qu'il en existe physiquement. Ce modèle n'est simple d'utilisation que sous certaines hypothèses que l'on doit justifier [06].

D'abord, nous présentons les hypothèses de modélisation d'une *MSAP*, nécessaires à l'établissement d'un modèle simple de type circuit électrique. Ensuite, après un rappel du modèle de type circuit d'une *MSAP* saine à rotor lisse, nous présentons le modèle de la même machine en présence d'un défaut entre spires d'une phase en augmentant l'ordre du modèle de la machine saine [06].

### II.2.1. Hypothèses considérées pour la modélisation

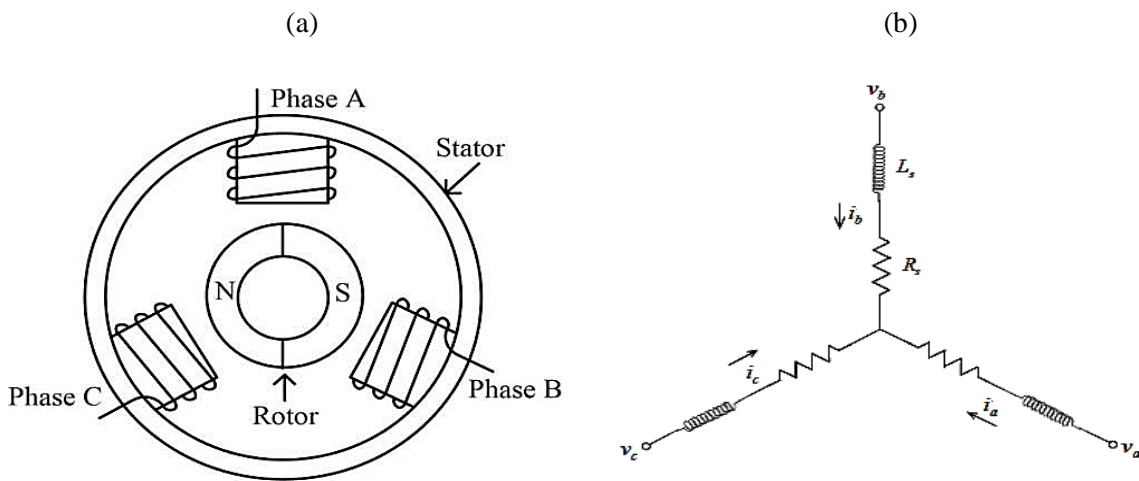
Toute approche de modélisation analytique nécessite généralement de poser certaines hypothèses sur les grandeurs du système pour la mise en équations de son comportement. Dans ce travail, les hypothèses considérées sont les suivantes [14] :

- Le rotor est également supposé lisse,
- L'entrefer est uniforme,

- Les trois phases du stator sont identiques, distribuées uniformément et elles possèdent les mêmes paramètres,
- Les trois phases du stator sont raccordées en étoile et le neutre est inaccessible,
- La perméabilité magnétique des parties ferromagnétique est considérée comme infinie,
- Le phénomène de saturation est négligé,
- La force magnétomotrice et le flux sont d'abord considérés comme distribués sinusoïdalement.

Ces hypothèses sont normalement connues comme étant appropriées pour un modèle global de paramètres pour les moteurs électriques [03].

### II.3. Modèle circuit électrique de la machine saine dans le repère triphasé



**Figure. II. 1.** Schéma de la coupe transversale (a), et bobinage statorique équivalent (b) d'une MSAP

Les machines MSAP sont des moteurs sans balais avec une distribution sinusoïdale des enroulements statorique. Le flux d'excitation vient des aimants situés sur ou à l'intérieur du rotor. Les lois de Kirchhoff sont appliquées pour développer le modèle électrique de la machine montrée dans la figure II.10.

#### II.3.1. Les équations électriques

##### a. L'équation de tension

L'équation de tension dans le référentiel du stator ( $abc$ ) peut être mise sous la forme :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\Phi_s] \quad [\text{II.1}]$$

Où  $V_s$ ,  $R_s$ ,  $\Phi_s$ ,  $I_s$ , indiquent les grandeurs et paramètres électromagnétique de phases, définit comme suit :

$$[V_s] = [v_{as} \quad v_{bs} \quad v_{cs}]^T: \text{vecteur des tensions de phases.}$$

$$[I_s] = [i_{as} \quad i_{bs} \quad i_{cs}]^T: \text{vecteur des courants de phases.}$$

$$[\Phi_s] = [\Phi_{as} \quad \Phi_{bs} \quad \Phi_{cs}]^T: \text{vecteur flux statorique.}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}: \text{matrice de résistance : } R_s = R_a = R_b = R_c$$

En examinant le système d'équations (II.1), on remarque que les tensions statoriques de phase se composent de deux parties: une partie résistive pour les chutes de tensions à travers la résistance et une partie

magnétique pour l'évolution du flux lié au stator. Ce modèle est applicable aux *MSAP* avec des enroulements de phase symétriques ou non symétriques, avec des variations dans la matrice des résistances et des inductances pour représenter la dissymétrie des enroulements [03].

### b. L'équation de flux magnétique

Pour les machines à aimants permanents, le flux magnétique  $\Phi_s$  est généré par deux sources différentes: le flux créé par les bobines statoriques et celui provenant des aimants situés sur le rotor. Ainsi  $\Phi_s$  peut être exprimé par l'équation matricielle suivante [03]:

$$[\Phi_s] = [L_s][I_s] + [\Phi_m] \quad [\text{II.2}]$$

Avec:

$$[\Phi_m] = [\Phi_{ma} \quad \Phi_{mb} \quad \Phi_{mc}]^T: \text{Vecteur du flux créé par les aimants.}$$

$[L_{ss}]$ : Matrice d'inductance qui est circulante symétrique.

La matrice d'inductance statorique est définie par :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix}$$

Dans le cas d'une machine avec des aimants en surface, l'inductance propre d'une phase et l'inductance mutuelle sont constantes et indépendants de la position du rotor, on aura les relations suivantes:

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L \quad \text{et} \quad L_{ab} = L_{ac} = L_{ba} = L_{bc} = L_{ca} = L_{cb} = M$$

Donc, on a la matrice d'inductance statorique est défini comme suit:

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix}$$

En général, les trois phases du stator sont connectées en étoile de sorte que:

$$i_{as} + i_{cs} + i_{bs} = 0 \quad [\text{II.3}]$$

Alors:

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L - M & 0 & 0 \\ 0 & L - M & 0 \\ 0 & 0 & L - M \end{bmatrix}$$

Dans ces conditions, la composante homopolaire du courant est nulle et seule l'inductance cyclique de la machine ( $L_s = L - M$ ) limite les courants de phases [05].

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

En appliquant l'équation [II.2] dans l'équation [II.1] on a :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + [L_s] \frac{d}{dt} [I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_m] \quad [\text{II.4}]$$

Avec:

$$[E_s] = -\frac{d}{dt} [\Phi_m] \quad [\text{II.5}]$$

$$[V_s] = [R_s][I_s] + [L_s] \frac{d}{dt} [I_s] + [E_s] \quad [\text{II.6}]$$

où:

$$[E_s] = [e_a \quad e_b \quad e_c]^T: \text{vecteur des f.é.m de phases.}$$

Le flux produit par les aimants permanents  $\Phi_m$  est lié à la position angulaire électrique  $\theta$  du rotor. En supposant que les enroulements du stator sont placés régulièrement avec un déphasage de  $\frac{2\pi}{3}$  et que la distribution de flux qui les traversent est sinusoïdale, alors il peut être exprimé sous la forme d'une fonction périodique de  $\theta$  comme suit :

$$[\Phi_m] = \begin{bmatrix} \Phi_{ma} \\ \Phi_{mb} \\ \Phi_{mc} \end{bmatrix} = \Phi_{mp} \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad [\text{II.7}]$$

Où  $\theta$  est la position angulaire du rotor.

Alors la dérivée sera exprimée par :

$$[E_s] = -\frac{d}{dt}[\Phi_m] = \Phi_{mp}\omega_r \begin{bmatrix} \sin(\theta) \\ \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad [\text{II.8}]$$

où  $\Phi_{mp}$  est la valeur constante (amplitude) du flux créé par l'aimant à travers l'enroulement statorique.

$\omega_r$ : La pulsation mécanique du rotor (en degré électrique).

### II.3.2. L'équation de couple électromagnétique

Le couple électromagnétique de MSAP à rotor lisse peut être exprimé comme suit :

$$C_{em} = P\Phi_m [i_{as} \quad i_{bs} \quad i_{cs}] \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad [\text{II.9}]$$

$P$  étant le nombre de paires de pôles et  $C_{em}$  est le couple électromagnétique.

La relation entre le couple électromagnétique et le couple de charge est donnée par l'équation [II.9].

$$J \frac{d}{dt} \Omega_r = C_{em} + C_L \quad [\text{II.10}]$$

Où :

$J$ : Moment d'inertie du rotor.

$\Omega_r$ : Vitesse de rotation électrique du rotor.

Le couple de charge complet se compose généralement de deux parties, la partie indépendante de la vitesse déterminée par le coefficient de frottement visqueux et le couple de charge supplémentaire direct:

$$C_L = f\Omega_r + C_{ch} \quad [\text{II.11}]$$

Où:

$f$ : coefficient de frottement visqueux

$C_{ch}$ : est le couple de charge supplémentaire direct.

## II.4. Modélisation de la machine en présence de défaut entre-spire

### II.4.1. Défaut Court-circuit entre-spire

Le court-circuit entre spires de la même phase est un défaut fréquent causé par des défauts d'isolation dans l'enroulement affecté. Ce défaut a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement

concerne, il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase touchée, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique pour les machines asynchrones. Cela peut provoquer une augmentation de la température dans le bobinage, accélérant ainsi la dégradation des isolants et entraînant d'autres défauts en cascade. Cependant, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement le même, à l'exception d'une augmentation des oscillations de couple dues au déséquilibre des courants de phase causé par le défaut [05].

#### II.4.2. Modèles circuit électrique d'une MSAP en présence de défaut

Dans ce paragraphe, nous désignons par court-circuit entre-spires tout défaut d'isolation pouvant intervenir entre deux spires d'une même phase du stator. Le défaut n'est pas forcément franc et une résistance équivalente permet de modéliser ce qui reste de la résistance de l'isolant entre les spires court-circuitées. La valeur de la résistance indique la sévérité du défaut d'isolation. Un schéma simplifié de la situation est donné sur la figure (II.2) montrant la résistance  $r_f$  du défaut. Le bobinage dans lequel survient le défaut est donc divisé en deux parties que l'on appellera ( $bs2$ ) pour la partie court-circuitée et ( $bs1$ ) pour la partie saine. En pratique la résistance  $r_f$  varie depuis une valeur infinie lorsque la machine est saine à zéro lorsque la machine est en présence d'un défaut franc de court-circuit entre-spires. Il est donc intéressant de déterminer le comportement de la machine lorsque cette résistance est suffisamment grande pour ne pas induire la destruction du bobinage et suffisamment petite pour que son effet soit perceptible sur les courants absorbés par la machine [05].

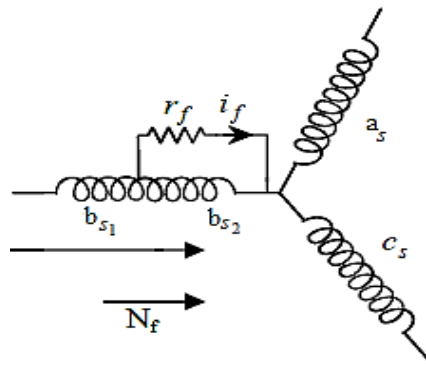
Nous avons défini le coefficient  $\sigma$  qui décrit le nombre relatif de spires court-circuitées. Nous avons donc :

$$N_f = N_{bs2} = \sigma(N_{bs1} + N_{bs2}) = \sigma N_s \quad [\text{II.12}]$$

où :

$N_s$ : nombre de spires par phase.

$N_f$ : nombre de spires de la partie du bobinage concernée par le défaut (sous-bobine  $bs_2$ ).



**Figure. II. 2.** Représentation schématique d'un défaut d'isolation entre spires sur une phase de stator ( $bs$ ).

##### a. Modèle de la MSAP en présence d'un défaut entre-spires dans le repère (abc)

Par rapport à la nomenclature présentée ci-haut, les équations électriques dans les deux parties qui composent la phase  $bs$  (sous-bobines  $bs1$  et  $bs2$  sur la figure II.3) [05] sont données par:

$$v_{bs1} = R_{b1}i_{bs} + L_{b1} \frac{d}{dt} i_{bs} + M_{b1b2} \frac{d}{dt} (i_{bs} - i_f) + M_{b1a} \frac{d}{dt} i_{as} + M_{b1c} \frac{d}{dt} i_{cs} + e_{b1} \quad [\text{II.13}]$$

$$v_{bs2} = R_{a2}(i_{bs} - i_f) + L_{b2} \frac{d}{dt} (i_{bs} - i_f) + M_{b1b2} \frac{d}{dt} i_{bs} + M_{b2a} \frac{d}{dt} i_{as} + M_{b2c} \frac{d}{dt} i_{cs} + e_{b2} \quad [\text{II.14}]$$



où:

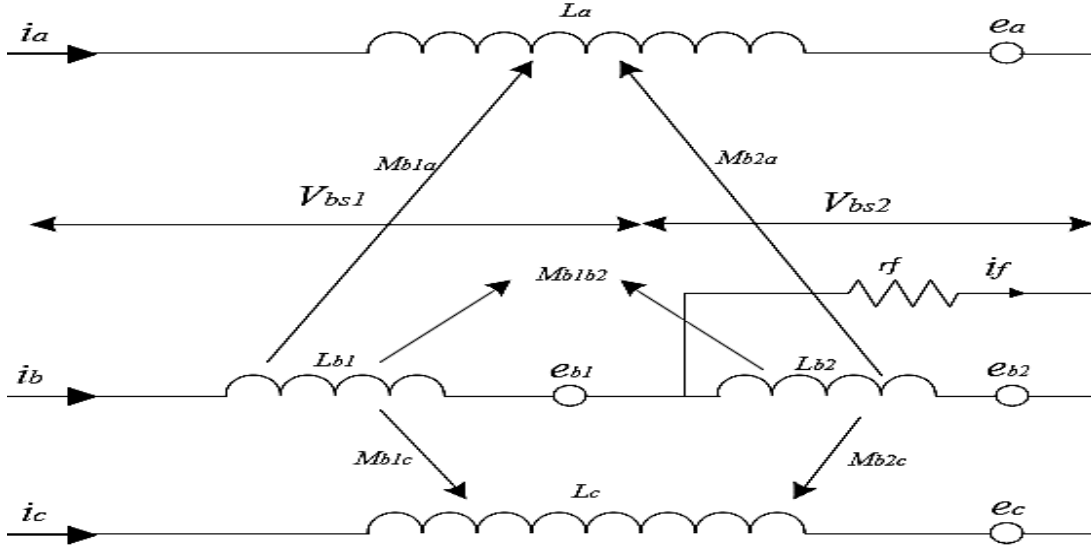
$v_{bs1}$ : Tensions traversant la bobine saine

$v_{bs2}$ : Tensions traversant la bobine défectueuse

$R_{b2}$ : La résistance de la sous-bobine en défaut ( $b_{s2}$ )

$L_{b2}$ : L'inductance de la sous-bobine en défaut ( $b_{s2}$ ).

$M_{b1b2}$ ,  $M_{b2a}$  et  $M_{b2c}$ : Les inductances mutuelles entre la sous-bobine  $b_{s2}$  et les bobines  $b_{s1}$ ,  $a_s$  et  $c_s$ .



**Figure.II. 3.** Schéma équivalent de la machine à aimants avec un défaut entre-spires dans la phase  $b_s$ .

Les résistances de la sous-bobine saine  $b_{s1}$  et de la sous-bobine court-circuitée  $b_{s2}$  sont notées par  $R_{b1}$  et  $R_{b2}$  respectivement; elles sont proportionnelles au nombre de spires des parties concernées. Par conséquent, nous pouvons les exprimer en fonction de la résistance de phase  $R_b$  et le coefficient  $\sigma$ . Nous avons donc :

$$R_{b1} = (1 - \sigma)R_b \quad [\text{II.15}]$$

$$R_{b2} = \sigma R_b$$

L'étude des circuits élémentaires de la phase  $a_s$  donne les relations suivantes :

$$v_{bs} = v_{bs1} + v_{bs2}$$

$$v_{bs2} = r_f i_f \quad [\text{II.16}]$$

$$i_{bs1} = i_{bs}$$

$$i_{bs2} = i_{bs} - i_f$$

Les équations des tensions des trois phases sont donc mises sous la forme:

$$v_{as} = R_s i_{as} + L \frac{d}{dt} i_{as} + e_{as} + (M_{b1a} + M_{b2a}) \frac{d}{dt} i_{bs} + M \frac{d}{dt} i_{cs} - M_{b2a} \frac{d}{dt} i_f \quad [\text{II.17}]$$

$$v_{bs} = v_{bs1} + v_{bs2} =$$

$$(R_{b1} + R_{b2}) i_{bs} + (L_{b1} + L_{b2} + 2M_{b1b2}) \frac{d}{dt} i_{bs} + (M_{b1a} + M_{b2a}) \frac{d}{dt} i_{as} +$$

$$(M_{b1c} + M_{b2c}) \frac{d}{dt} i_{cs} + (e_{b1} + e_{b2}) - R_{b2} i_f - (L_{b2} + M_{b1b2}) \frac{d}{dt} i_f \quad [\text{II.18}]$$

$$v_{cs} = R_s i_{cs} + L \frac{d}{dt} i_{cs} + e_{cs} + (M_{b1c} + M_{b2c}) \frac{d}{dt} i_{bs} + M \frac{d}{dt} i_{as} - M_{b2c} \frac{d}{dt} i_f \quad [\text{II.19}]$$

Les relations suivantes sont normalement admises:

$$\begin{aligned} R_s &= R_b = R_{b1} + R_{b2} \\ L_s &= L_{b1} + L_{b2} + 2M_{b1b2} \\ M &= M_{b1a} + M_{b2a} \end{aligned} \quad [\text{II.20}]$$

$$M = M_{b1c} + M_{b2c}$$

$$e_b = e_{b1} + e_{b2} = e_{b1} + e_f$$

En remplaçant les relations ci-dessus [II.20] dans les équations électriques [II.17], [II.18] et [II.19], nous obtenons les équations suivantes :

$$v_{as} = R_s i_{as} + L_s \frac{d}{dt} i_{as} + e_{as} + M \frac{d}{dt} i_{bs} + M \frac{d}{dt} i_{cs} - M_{b2a} \frac{d}{dt} i_f \quad [\text{II.21}]$$

$$v_{bs} = v_{bs1} + v_{bs2} =$$

$$R_s i_{bs} + L_s \frac{d}{dt} i_{bs} + M \frac{d}{dt} i_{as} + M \frac{d}{dt} i_{cs} + e_{bs} - R_{b2} i_f - (L_{b2} + M_{b1b2}) \frac{d}{dt} i_f \quad [\text{II.22}]$$

$$v_{cs} = R_s i_{cs} + L_s \frac{d}{dt} i_{cs} + e_{cs} + M \frac{d}{dt} i_{bs} + M \frac{d}{dt} i_{as} - M_{b2c} \frac{d}{dt} i_f \quad [\text{II.23}]$$

La lecture matricielle:

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ R_{b2} \\ 0 \end{bmatrix} i_f - \begin{bmatrix} M_{b2a} \\ L_{b2} + M_{b1b2} \\ M_{b2c} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} i_f \quad [\text{II.24}]$$

Selon l'équation établie précédemment, nous constatons que l'équation régissant la machine en présence d'un défaut entre spires contient les mêmes termes que l'équation électrique d'une machine saine [II.6] auxquels s'ajoutent des termes supplémentaires correspondant à la boucle créée par le défaut. Pour résoudre l'équation [II.24], il est nécessaire de connaître le courant  $i_f$  ou d'ajouter une équation supplémentaire décrivant la boucle du court-circuit. Nous avons alors:

$$v_{bs2} = r_f i_f$$

$$\begin{aligned} 0 &= -R_{b2} i_{bs} - (L_{b2} + M_{b1b2}) \frac{d}{dt} i_{bs} - M_{b2a} \frac{d}{dt} i_{as} - M_{b2c} \frac{d}{dt} i_{cs} - e_{b2} + (R_{b2} + r_f) i_f + \\ &\quad L_{b2} \frac{d}{dt} i_f \end{aligned} \quad [\text{II.25}]$$

Après l'apparition d'un défaut de court-circuit entre les spires, l'ordre du système augmente car une boucle supplémentaire est créée. Par conséquent, il est intéressant de présenter une matrice d'inductance de dimension 4 pour modéliser la MSAP en défaut. En regroupant les équations (II-24) et (II-25), nous obtenons l'équation globale de dimension 4 qui régit le comportement de la machine en présence d'un défaut de court-circuit. Cette équation est mise sous forme matricielle:

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & -R_{b2} \\ 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & -R_{b2} & 0 & (R_{a2} + r_f) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 & -M_{b2a} \\ 0 & L_s & 0 & -L_{b2} - M_{a2b} \\ 0 & 0 & L_s & -M_{b2c} \\ M_{b2a} & -(L_{b2} + M_{b1b2}) & -M_{b2c} & L_{b2} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \\ -e_{b2} \end{bmatrix} \quad [\text{II.26}]$$

où :

$$e_{b2} = e_f$$

**Remarque.** Pour les machines à plus d'une encoche par pôle et par phase, les axes des sous-bobines  $bs1$  et  $bs2$  ne sont généralement pas alignés et sont décalés par rapport à celui de la bobine  $bs$  ; de ce fait nous avons:  $M_{b1a} \neq M_{b1c}$  et  $M_{b2a} \neq M_{b2c}$ . Par contre pour une machine ayant une encoche par pôle et par phase, les axes des sous-bobines  $bs1$  et  $bs2$  sont alignés et sont non décalés par rapport à celui de la bobine  $bs$ ; dans ce cas on peut admettre que  $M_{b2a} = M_{b2c}$  et alors on peut simplifier les équations (II-25) et (II-24) comme :

$$0 = -R_{b2}i_{bs} - (L_{b2} + M_{b1b2} - M_{b2a}) \frac{d}{dt} i_{bs} - e_{b2} + (R_{b2} + r_f)i_f + L_{b2} \frac{d}{dt} i_f \quad [\text{II.27}]$$

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & -R_{b2} \\ 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & -R_{b2} & 0 & (R_{a2} + r_f) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 & -L_{a2} - M_{a1a2} \\ 0 & L_s & 0 & -M_{a2b} \\ 0 & 0 & L_s & -M_{a2b} \\ 0 & -(L_{b2} + M_{b1b2} - M_{b2a}) & 0 & L_{b2} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \\ -e_{a2} \end{bmatrix} \quad [\text{II.28}]$$

Dans notre étude, il n'est pas nécessaire d'utiliser cette hypothèse, mais pour une MSAP ayant une encoche par pôle et par phase, le modèle de la machine avec un défaut entre spires peut être simplifié.

Nous avons ainsi établi les équations électriques qui décrivent le comportement de la machine en régime dynamique en présence d'un défaut de court-circuit entre spires dans une phase.

### II.4.3. Méthodes d'identification des paramètres du modèle circuit électrique

Dans le modèle de circuit électrique, les inductances de la machine jouent un rôle important car elles reflètent les différents phénomènes qui peuvent survenir dans la machine. Une identification précise de ces inductances fournira des informations supplémentaires sur les signaux, comme les courants statoriques. Cette approche offre un bon compromis entre la précision du modèle et le temps de calcul. De plus, ce type de modélisation permet de prendre en compte le défaut de court-circuit entre spires, même pour les MSAP à rotor lisse ayant plusieurs encoches par pôle et par phase. Cependant, nous nous limitons aux machines ayant une encoche par pôle et par phase, pour lesquelles les f.é.m. des sous-bobines  $bs1$  et  $bs2$  (figures II.2 et II.3) ont la même forme que celle de la bobine  $as$  et leurs amplitudes sont proportionnelles au nombre de spires [05].

Nous présentons une méthode pour estimer les paramètres du modèle de circuit électrique en prenant en compte le nombre de pôles du bobinage statorique et le nombre de spires en défaut. Cette méthode permet une déduction simple et rapide des paramètres du modèle de MSAP en défaut entre-spires pour chaque situation de défaut, à partir des paramètres de la MSAP saine. L'approche analytique proposée fonctionne bien pour les MSAP à rotor lisse étudiées. Cette méthode reste bien plus précise que les méthodes similaires qui n'utilisent pas le nombre de pôles et le nombre de spires en défaut dans leurs expressions analytiques [05].

#### a. Identification par des expressions analytiques

Pour identifier les paramètres du modèle circuit électrique il y'a plusieurs hypothèses [05]:

- La première hypothèse supplémentaire sur le bobinage de MSAP saines est qu'à la suite d'un défaut entre-spires d'une phase, les axes des sous-bobines qui en résultent restent confondus. Cette hypothèse est justifiée au moins dans les machines à une encoche par pôle et par phase.

Dans le cas des machines à une encoche par pôle et par phase, le nombre de bobines élémentaires par phase est égal au nombre de paires de pôle ( $p$ ). Nous considérons uniquement la connexion en série de ces bobines dans la suite de l'étude.

- La seconde hypothèse supplémentaire sur le bobinage de *MSAP* saines est que les mutuelles inductances des bobines élémentaires des phases sont égales ( $M_{bob}$ ). Cette hypothèse se justifie dans les *MSAP* à rotor lisse non saturées

Pour une machine à  $p$  paires de pôles, la bobine de chaque phase comporte généralement  $p$  bobines élémentaires (une par paires de pôles). Pour les *MSAP* à rotor lisse non saturées, les inductances de ces bobines élémentaires sont évidemment identiques ( $L_{bob} > 0$ ) et les mutuelles inductances entre elles sont supposées identiques ( $M_{bob} < 0$ ) et nous les appelons respectivement  $L_{bob}$  et  $M_{bob}$  figures II.6.

### a.1. Expressions analytiques des inductances de *MSAP* saines à rotor lisse non saturées

La matrice d'inductance du bobinage triphasé des *MSAP* à rotor lisse est donnée par :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \quad [\text{II.29}]$$

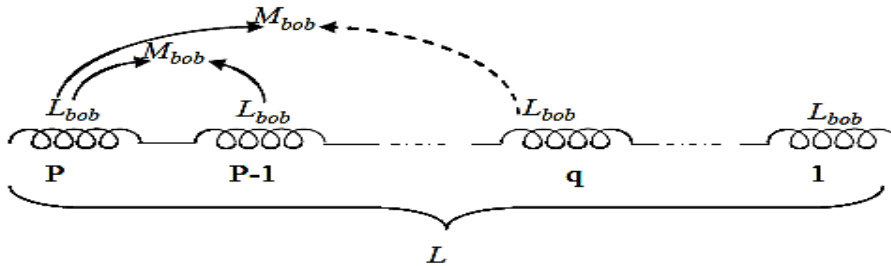
où :

$L$  : L'inductance propre de chaque phase.

$M$  : La mutuelle inductance entre les phases que nous considérons égales entre toutes les bobines de la même phase.

Dans le cas d'une machine avec  $P$  paires de pôles, à une encoche par pôle et par phase, chaque phase contient  $p$  bobines élémentaires (Figure II-4) connectées en série. L'expression de l'inductance propre  $L$  en termes des inductances  $L_{bob}$  et  $M_{bob}$  des bobines élémentaires (Figure II-4) et du nombre de paires de pôles ( $p$ ) peut être formulée comme suit:

$$L = p[L_{bob} + (p - 1)M_{bob}] \quad [\text{II.30}]$$



**Figure.II. 4.** Schéma d'une bobine de phase d'une *MSAP* à rotor lisse, à une encoche par pôle et par phase et à  $p$  paires de pôles. Elle comporte  $p$  bobines élémentaires.

### a.2 Expressions analytiques pour des inductances des *MSAP* en défaut entre spires

#### • Premier cas d'étude

Dans le premier cas, nous nous concentrons ici sur l'étude d'un défaut de court-circuit entre spires dans une partie spécifique d'une bobine élémentaire d'une phase (par exemple, la première bobine élémentaire de la phase b) d'une *MSAP* à  $p$  paires de pôles (Figure II-5). Après la création du défaut, la bobine élémentaire est divisée en deux parties, ayant des inductances propres  $L_{bob1}$  et  $L_{bob2}$ , qui sont supposées parfaitement couplées par une inductance mutuelle  $M_{bob12}$ . Nous avons dans ces conditions:

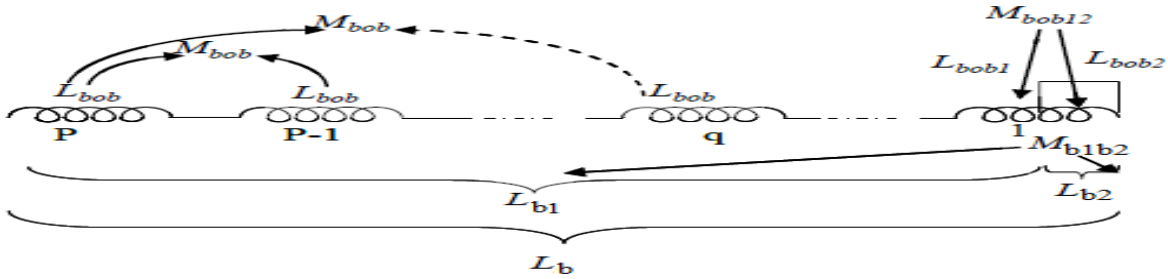
$$\begin{aligned}
L_{bob1} &= (1 - \sigma_{bob})^2 L_{bob} \\
L_{bob2} &= \sigma_{bob}^2 L_{bob} \\
M_{bob12} &= \sigma_{bob}(1 - \sigma_{bob})L_{bob}
\end{aligned} \tag{II.31}$$

où

$\sigma_{bob}$  est le rapport du nombre de spires court-circuitées de la partie soumise au défaut sur le nombre de spires de chaque bobine élémentaire. On écrit donc:

$$\sigma_{bob} = \frac{N_f}{N_{bob}} = \frac{N_f}{N_s/p} = p\mu \tag{II.32}$$

Ces équations sont valides car on suppose que les spires de chaque bobine élémentaire sont entièrement magnétiquement couplées.



**Figure. II. 5.** Schéma d'un défaut de court-circuit entre-spires d'une bobine élémentaire (la 1<sup>ère</sup> par exemple).

Dans ces conditions, les inductances propres sont nommées  $L_{b1}$  et  $L_{b2}$  des sous bobines  $b1$  (partie saine) et  $b2$  (partie défectueuse) de la phase  $b$  (Figure.II.5). Par contre, l'inductance mutuelle entre-elles est notée ( $M_{b1b2}$ ). Ainsi on peut écrire la forme générale suivante, en s'appuyant sur les relations (II-30) et (II-31):

$$\begin{aligned}
L_{b1} &= (p - 1)[L_{bob} + (p - 2)M_{bob}] + (1 - \sigma_{bob})^2 L_{bob} + 2(1 - \sigma_{bob})(p - 1)M_{bob} \\
L_{b2} &= L_{bob2} = \sigma_{bob}^2 L_{bob} \\
M_{b1b2} &= \sigma_{bob}(1 - \sigma_{bob})L_{bob} + \sigma_{bob}(p - 1)M_{bob}
\end{aligned} \tag{II.33}$$

De même, les inductances mutuelles entre les sous bobines ( $b1$  et  $b2$ ) et les autres phases ( $a$  et  $c$ ) sont estimées par :

$$\begin{aligned}
M_{b1a} &= M_{b1c} = [(p - 1) + (1 - \sigma_{bob})] \frac{M_{ba}}{p} \\
M_{b2a} &= M_{b2c} = \sigma_{bob} \frac{M_{ba}}{p}
\end{aligned} \tag{II.34}$$

Afin de confirmer la validité des équations analytiques (II.33), nous pouvons vérifier si elles sont cohérentes avec la relation qui décrit l'inductance équivalente des deux bobines en série, couplées magnétiquement

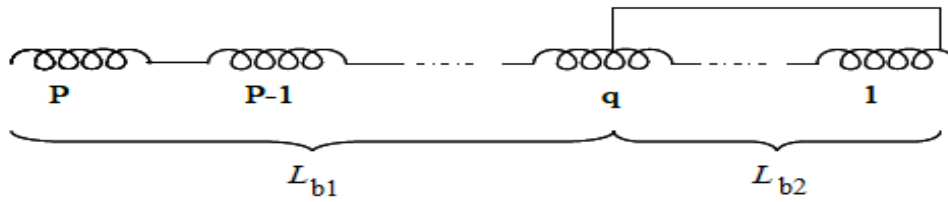
( $L_b = L_{b1} + L_{b2} + 2M_{b1b2}$ ). Nous pouvons retrouver l'inductance propre  $L_a$  de la bobine  $b$  (relation II.30) à partir des inductances propres des deux sous-bobines  $b1$  et  $b2$  ( $L_{b1}$  et  $L_{b2}$ ) et de l'inductance mutuelle entre elles ( $M_{b1b2}$ ):

$$\begin{aligned}
L_{b1} &= L_{b1} + L_{b2} + 2M_{b1b2} = (p - 1)[L_{bob} + (p - 2)M_{bob}] + (1 - \sigma_{bob})^2 L_{bob} + 2\sigma_{bob}(p - 1)M_{bob} \\
&+ \sigma_{bob}^2 L_{bob} + 2(p - 1)M_{bob} + 2\sigma_{bob}(1 - \sigma_{bob})L_{bob} - 2\sigma_{bob}(p - 1)M_{bob} = (p - 1)L_{bob} + \\
&(p - 1)(p - 2)M_{bob} + L_{bob} + 2(p - 1)M_{bob} = p[L_{bob} + (p - 1)M_{bob}]
\end{aligned} \tag{II.35}$$

Ainsi, dans le cas d'une *MSAP* saine à rotor lisse ayant  $p$  paires de pôles, si on dispose de l'inductance propre d'une bobine élémentaire ( $L_{bob}$ ) et de la mutuelle inductance entre deux bobines élémentaires d'une phase ( $M_{bob}$ ), on peut déduire les expressions pour les inductances propres des sous-bobines  $b_1$  et  $b_2$  (résultant d'un défaut de court-circuit dans une bobine élémentaire) ainsi que pour l'inductance mutuelle entre elles, en utilisant les relations [II.33].

- **Deuxième cas d'étude**

Nous allons aborder le cas où le défaut de court-circuit entre-spires se produit entre plusieurs bobines élémentaires (par exemple,  $q-1$  bobines élémentaires entières de la phase (b) et une fraction d'une bobine élémentaire de la même phase ( $\sigma_{bob}\%$  de la  $q^{ème}$  bobine élémentaire). La Figure II.6 illustre ce type de défaut, qui peut être considéré comme le cas général, car en prenant  $q=1$ , on retrouve la même configuration du défaut que celle étudiée dans le premier cas (Figure II.5).



**Figure.II. 6.** Schéma d'un défaut de court-circuit entre-spires comprenant  $q-1$  bobines élémentaires complètes et une fraction d'une bobine élémentaire (de  $\sigma_{bob}\%$  la  $q^{ème}$  bobine élémentaire par exemple).

En utilisant la méthode précédente, il est possible d'établir les équations analytiques pour les inductances propres et mutuelles des sous-bobines  $a_1$  et  $a_2$ , résultant d'un court-circuit entre spires de la phase  $b$ .

$$\begin{aligned}
 L_{b1} &= (p-1)[L_{bob} + (p-q-1)M_{bob}] + (1-\sigma_{bob})^2 L_{bob} + 2(1-\sigma_{bob})(p-q)M_{bob} \\
 L_{b1} &= (q-1)[L_{bob} + (q-2)M_{bob}] + \mu_{bob}^2 L_{bob} + 2\sigma(q-1)M_{bob} \\
 M_{b1b2} &= (q-1)(p-q)M_{bob} + \sigma_{bob}(p-q)M_{bob} + (1-\mu_{bob})(q-1)M_{bob} + \sigma_{bob}(1-\sigma_{bob})L_{bob}
 \end{aligned}
 \tag{II.36}$$

Les inductances mutuelles entre les sous-bobines  $b_1$  et  $b_2$ , et, les autres phases ( $a$  et  $c$ ) peuvent être simplement déterminées par:

$$\begin{aligned}
 M_{b1a} &= M_{b1c} = [(p-q) + (1-\sigma_{bob})] \frac{M_{ba}}{p} \\
 M_{b2a} &= M_{b2c} = [(q-1) + \sigma_{bob}] \frac{M_{ba}}{p}
 \end{aligned}
 \tag{II.37}$$

### II.5.1. Résultats de simulation d'un fonctionnement sain

A titre illustratif, des résultats de la modélisation en fonctionnement moteur en triphasé sont présentés ci-dessous, sans avoir recours à la transformation de *Park*. Les paramètres utilisés pour la programmation sont présentés en annexe A. Les figures ci-dessous présentent les courants de phases, la vitesse et le couple pour un fonctionnement à vide et en charge à  $t=5\text{sec}$

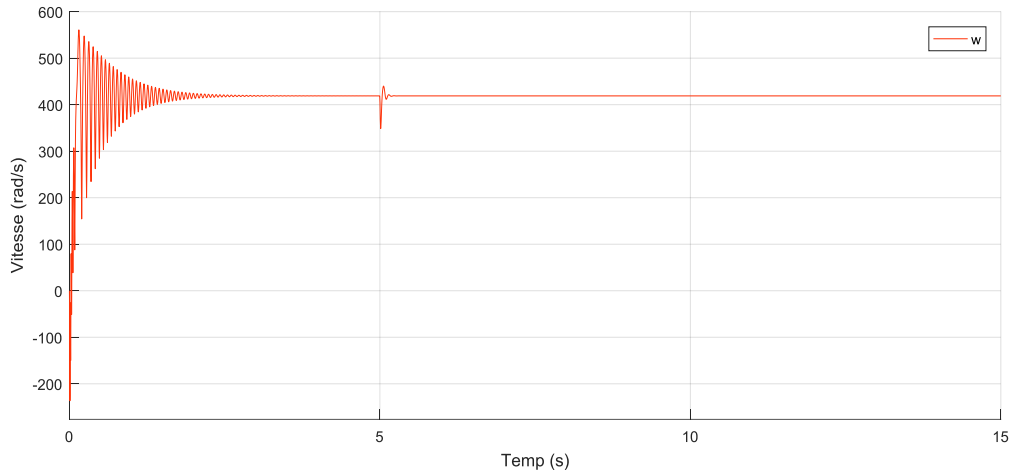


Figure.II. 7. Evolution de la vitesse de rotation.

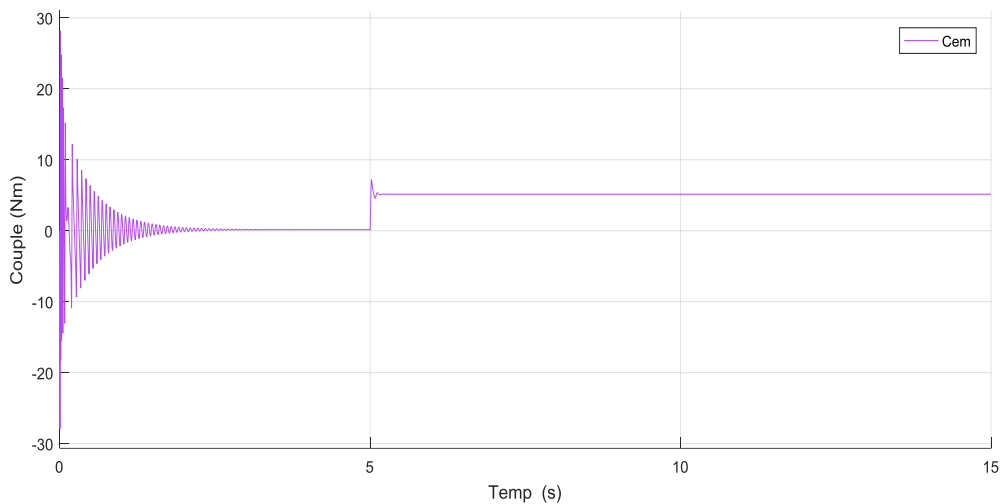


Figure.II. 8. Evolution du couple électromagnétique.

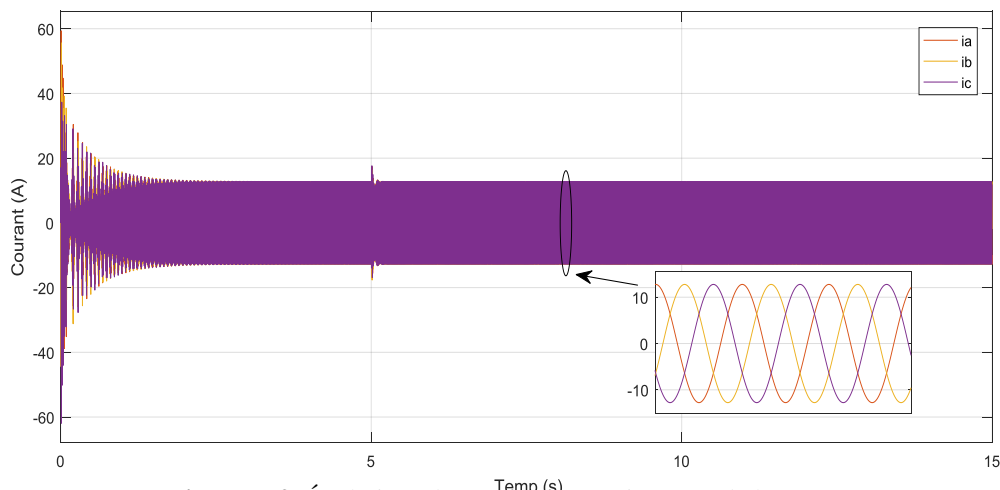


Figure.II.9. Évolutions des courants statoriques  $i_{abc}$  de la MSAP.

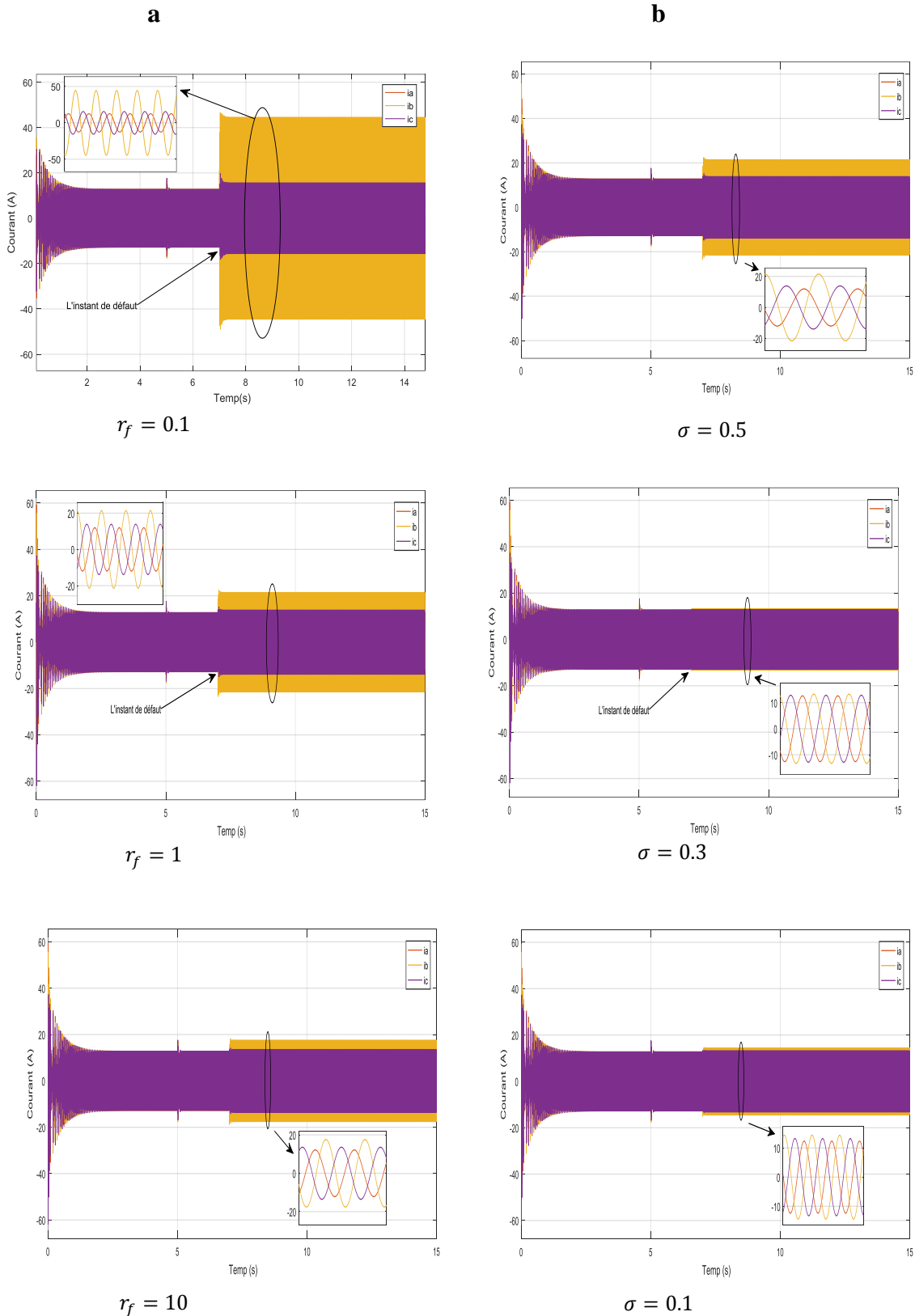
### II.5.2. Résultats de simulation en présence de défaut

Les résultats de simulation qu'on trouve ci-après concernent:

**a-La variation de la résistance du défaut avec gravité de défaut constant  $\{\sigma = 0.5\}$**

**b-La variation gravité du défaut avec résistance constante du défaut  $\{r_f = 1\}$**

➤ **Courants statoriques**

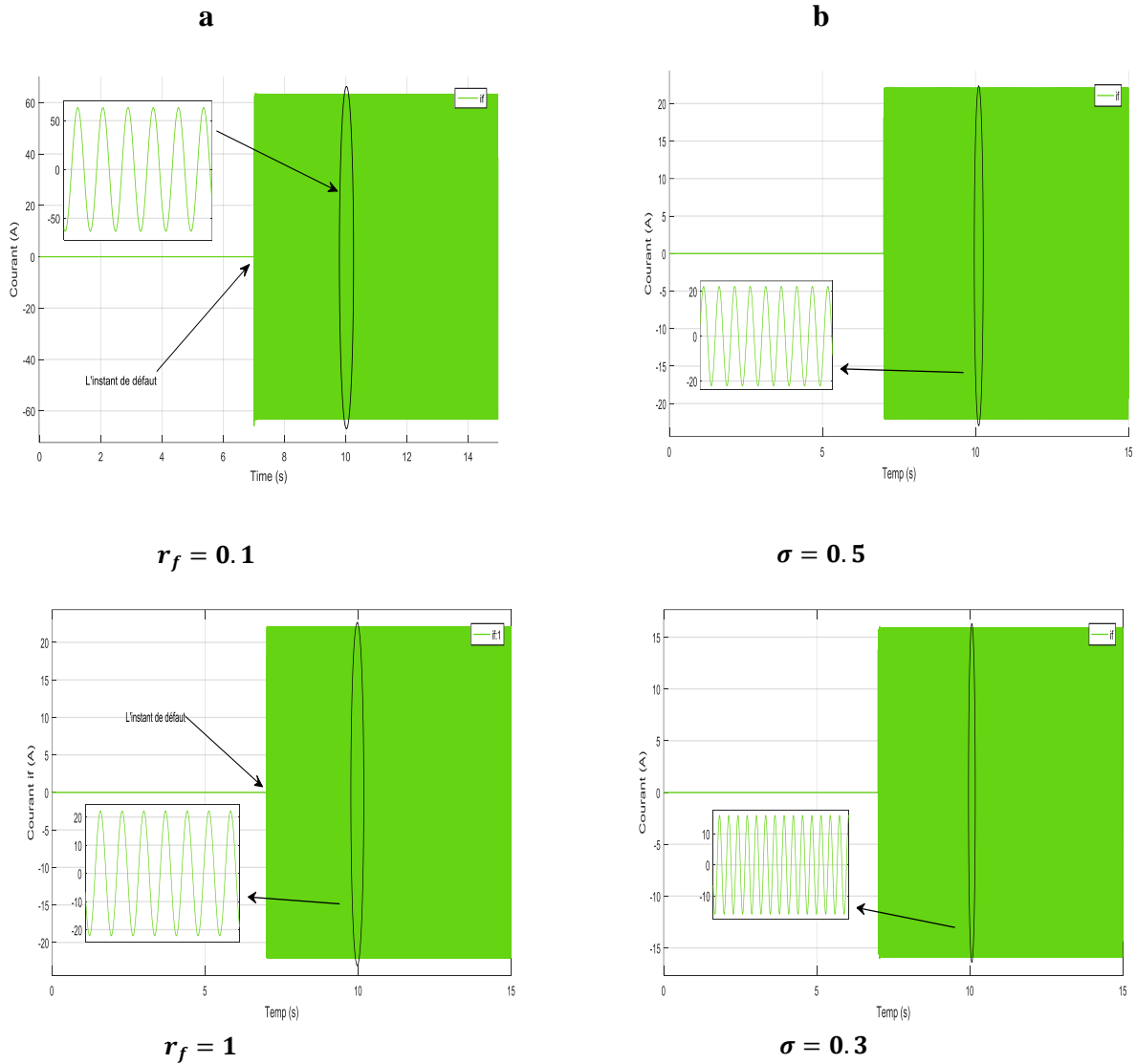


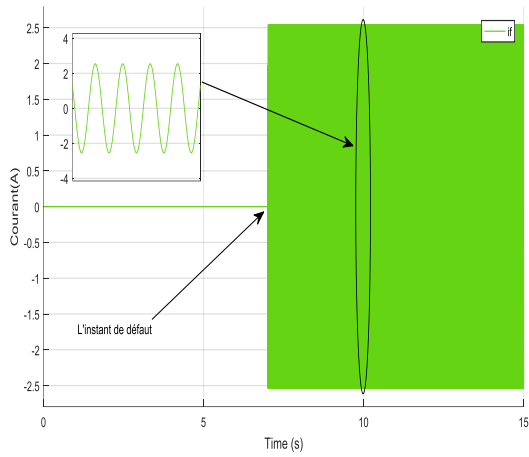
**Figure.II.10.** Evolutions des courants statoriques  $i_{abc}$  à l'instant  $t=0.7\text{sec}$ .



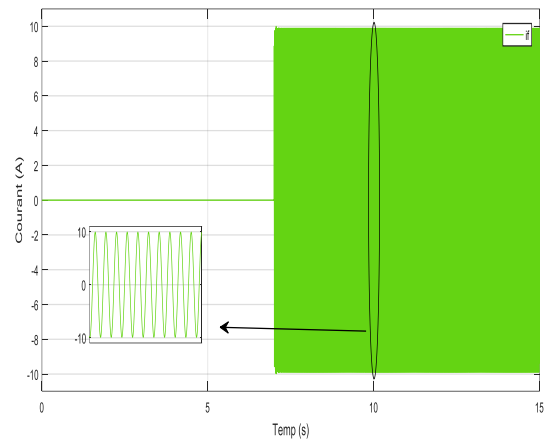
D'après les résultats montrant les courants électriques lors de l'apparition d'un court-circuit entre les spires, on remarque une augmentation du courant. Cette augmentation est fortement liée à la gravité de défaut et la valeur de la résistance de défaut  $r_f$ , car plus la gravité de celui-ci est assez grande et la valeur de la résistance  $r_f$  est faible, plus l'augmentation du courant statorique est importante. Il y a également un effet constant lié à la variation de l'intensité du courant. Lorsque le défaut survient en phase  $b$ , on constate une augmentation du courant  $i_b$  suivie d'une augmentation du courant de la phase successive, (dans ce cas le courant il s'agit du courant  $i_c$ ), associée à une diminution du courant précédent ( $i_a$ )

▪ Courant du défaut





$r_f = 10$

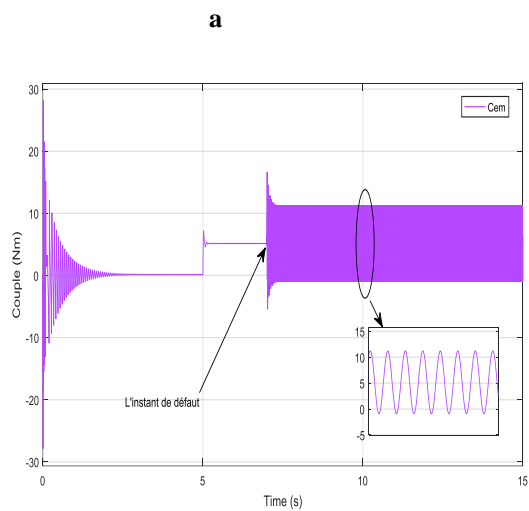


$\sigma = 0.1$

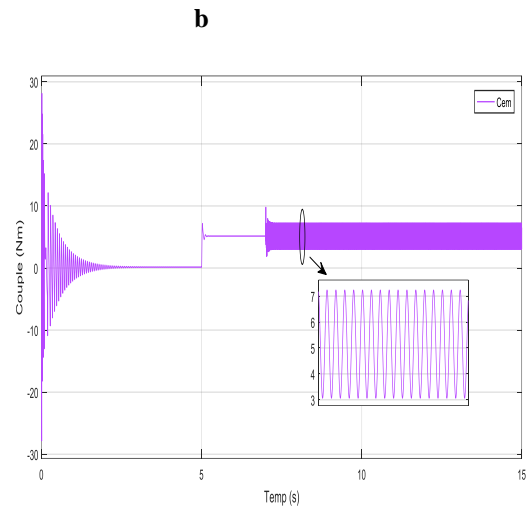
Figure.II.7.Evolution du courant du défaut à l'instant t=0.7sec.

On remarque que la valeur du courant  $i_f$  est nulle dans un état sain du moteur. Par ailleurs, après apparition d'une erreur, cette valeur augmente en fonction de la gravité du défaut et de la valeur de la résistance du défaut  $r_f$ .

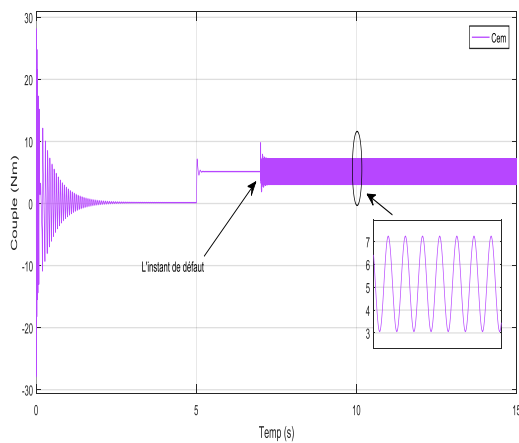
▪ Couple électromagnétique



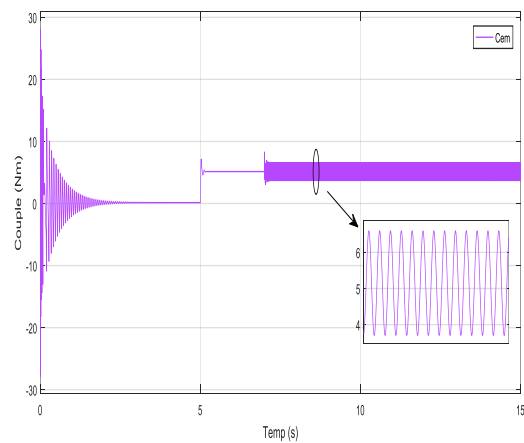
$r_f = 0.1$



$\sigma = 0.5$



$r_f = 1$



$\sigma = 0.3$

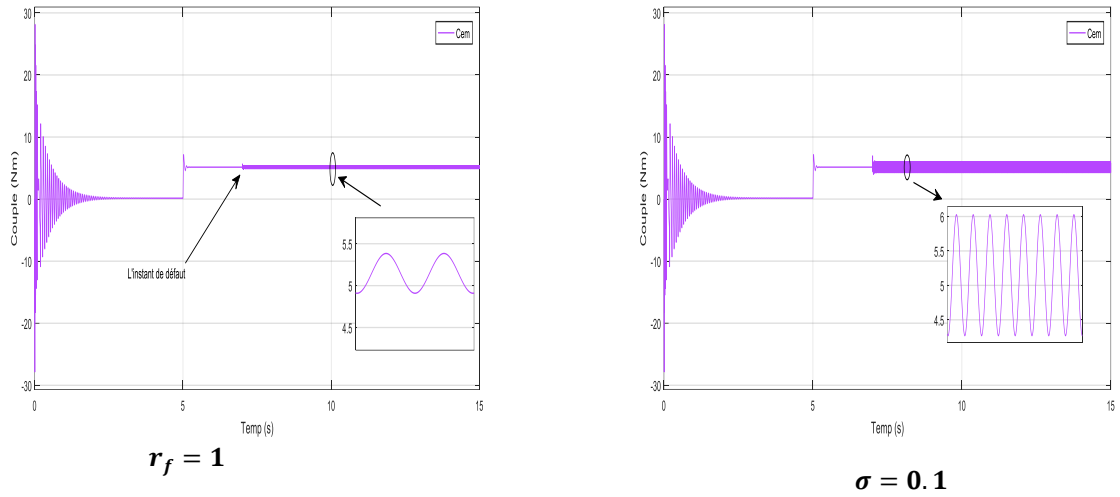
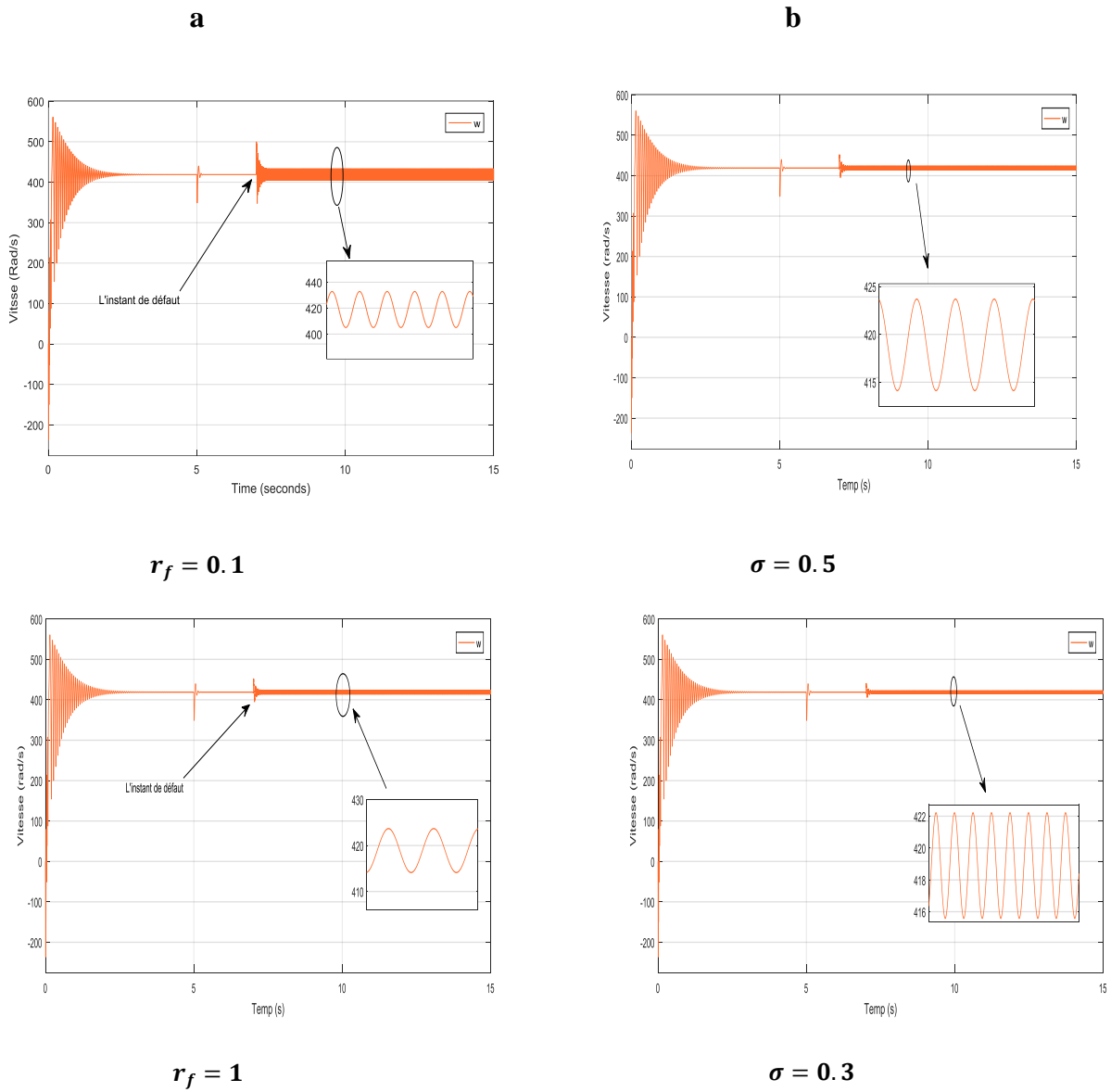
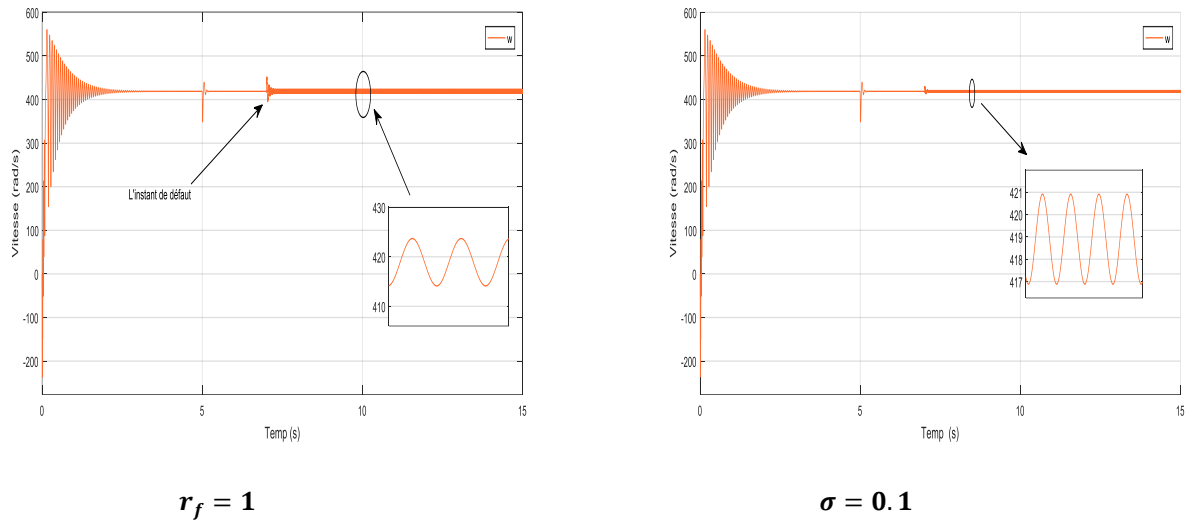


Figure.II.8. Evolution du couple électromagnétique.

▪ Vitesse de la rotation du moteur





**Figure.II. 9.** Evolution de vitesse de rotation.

L'état sain du moteur, conduit à enregistrer des valeurs constantes du couple et de la vitesse mais après apparition du défaut, on observe des distorsions dans la courbe du couple et de la vitesse. Ces distorsions sont liées à la gravité du défaut et à la valeur de la résistance du défaut  $r_f$ , ceci nous permet de dire que plus défaut est important, plus les distorsions sont grandes.

### Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation de la *MSAP*. Tout d'abord, nous avons examiné le cas où le moteur est en bon état de fonctionnement et nous avons effectué des simulations pour obtenir certaines caractéristiques significatives du moteur, à savoir, le courant et la vitesse. Ensuite, nous avons développé une méthode permettant de calculer les paramètres du moteur en cas d'erreur de contact électrique entre les enroulements. Cette méthode repose sur l'utilisation d'équations mathématiques qui décrivent le comportement du moteur dans un état sain. En mémorisant les résultats obtenus à partir des moteurs sains, nous avons pu évaluer l'effet de l'erreur de contact sur le courant statorique, ainsi que sur la vitesse et le couple du moteur.

Grâce à ces études et analyses, nous avons pu mieux comprendre comment le moteur réagit en présence d'erreurs de contact électrique. Cette modélisation *MSAP* fournit des informations précieuses pour diagnostiquer et évaluer l'état de santé du moteur, ce qui peut contribuer à améliorer sa fiabilité et sa durée de vie.

## **Chapitre III**

# **Diagnostic de la Machine en présence de défaut de court-circuit entre-spires**

### III.1.Introduction

Le diagnostic de défauts de moteurs électriques est une étape cruciale pour maintenir la performance, la fiabilité et la sécurité des systèmes électromécaniques. Un moteur électrique est un dispositif complexe avec de nombreuses pièces mobiles et des composants électriques qui peuvent tomber en panne pour diverses raisons telles que l'usure, la surchauffe, les problèmes de connectivité et les vibrations excessives. Le diagnostic classique de défauts de moteurs électriques est une approche basée sur la mesure de certaines grandeurs physiques telles que la tension, le courant, la température et la vibration pour détecter et localiser les défauts. Ces méthodes peuvent être sujettes à des erreurs humaines et peuvent ne pas être assez précises pour détecter les défauts les plus subtils.

C'est pourquoi, ces dernières années, des techniques d'intelligence artificielle (*IA*) ont été développées pour le diagnostic de défauts. L'*IA* utilise des algorithmes pour analyser des données de capteurs, détecter des anomalies et prédire les défauts avant qu'ils ne se produisent.

L'*IA* offre de nombreux avantages par rapport aux méthodes de diagnostic classique. Elle permet une détection plus rapide et plus précise des défauts, en évitant les erreurs humaines. L'*IA* peut également fournir des informations plus détaillées sur la nature et la gravité des défauts, ce qui peut aider à améliorer la maintenance préventive et à réduire les temps d'arrêt imprévus.

### III.1. Méthodes de diagnostic classique

Il existe plusieurs méthodes de diagnostic classique qui permettent la détection de défaut, parmi les méthodes que nous avons utilisées dans ce travail sont :

#### III.1.1. Analyse des composantes symétriques des courants

Tout d'abord, une brève introduction du principe des composantes symétriques est présentée. Selon cette méthode bien connue, tout ensemble de courants (ou de tensions) déséquilibrés peut être transformé en trois ensembles de phases symétriques équilibrées connues sous le nom de composantes positive, négative et nulle. Les courants de séquence positive, négative et nulle dans leur forme complexe, obtenues à partir de trois ensembles déséquilibrés de courant du MSAP ( $I_{as}$ ,  $I_{bs}$ ,  $I_{cs}$ ), peuvent être calculées en utilisant la transformation complexe de Fortescue telle qu'elle est exprimée par [16].

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_n \\ I_o \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} \quad \text{[III.1]}$$

$$a = e^{\frac{2\pi}{3}j}$$

Où

$I_p$  : Composantes positive (directe)

$I_n$  : Composantes négative (inverse)

$I_o$  : Composantes homopolaire (nulle)

Dans cette étude, un algorithme spécifique pour calculer l'amplitude et l'angle de phase des composantes de tension symétriques [16]. Nous appliquons cette méthode de diagnostic dans ce travail

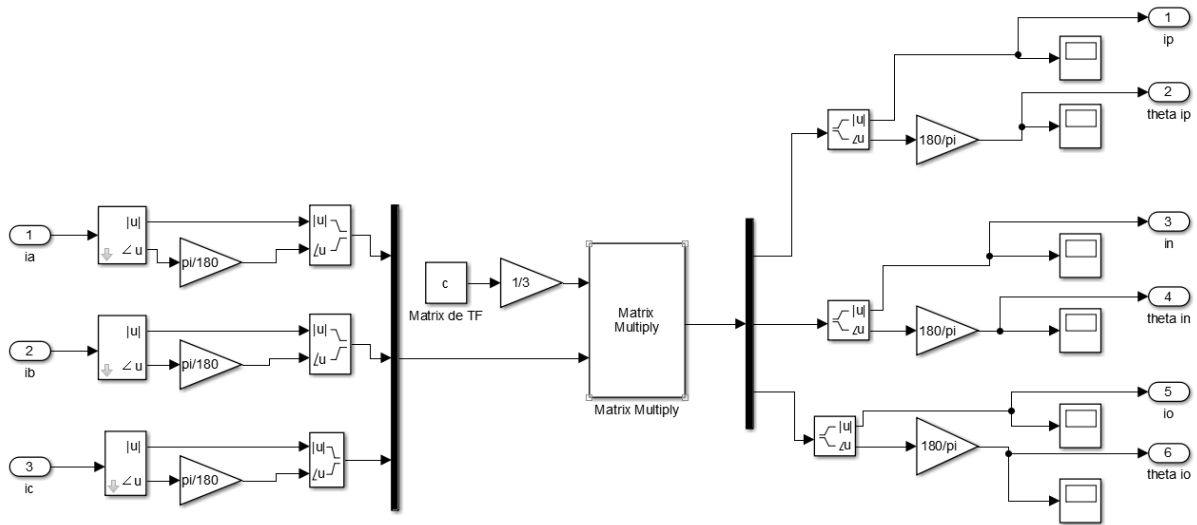


Figure.III 1. Bloc de composantes symétriques des courants.

**a. Résultat de simulation**

La composante positive et négative peut être retenue comme indicateur de la présence de ce défaut. [16]. Les résultats suivants présentent l'évolution de ces composantes par rapport à la valeur de la résistance de défaut. Il est noté que la valeur de la composante négative est nulle avant l'apparition du défaut, puis augmente après son apparition. Cela indique que la composante négative peut être considérée comme un bon indicateur de la présence du défaut.

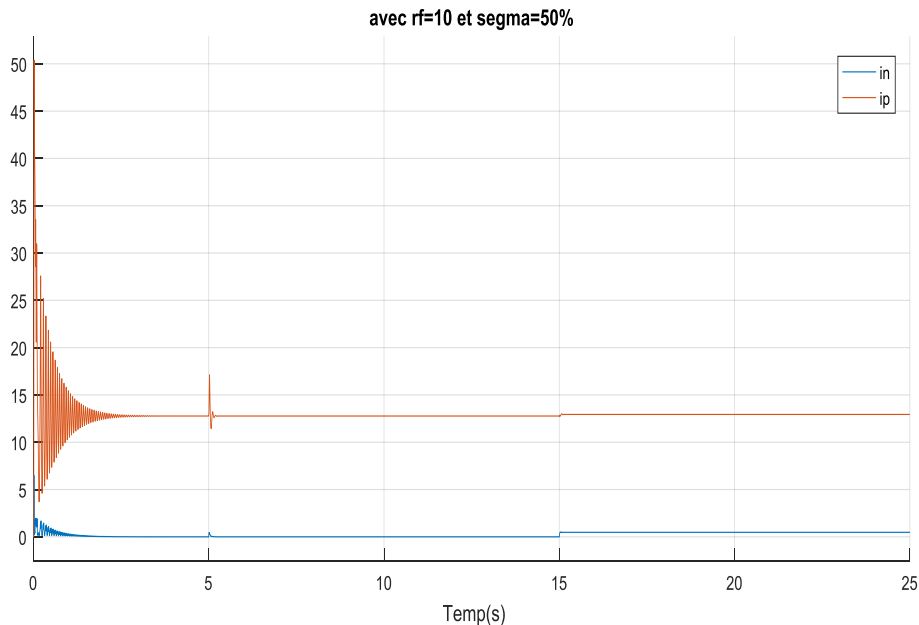


Figure. III 2. Evolutions des composantes positive et négative pour  $r_f = 10$  et  $\sigma = 0.5$

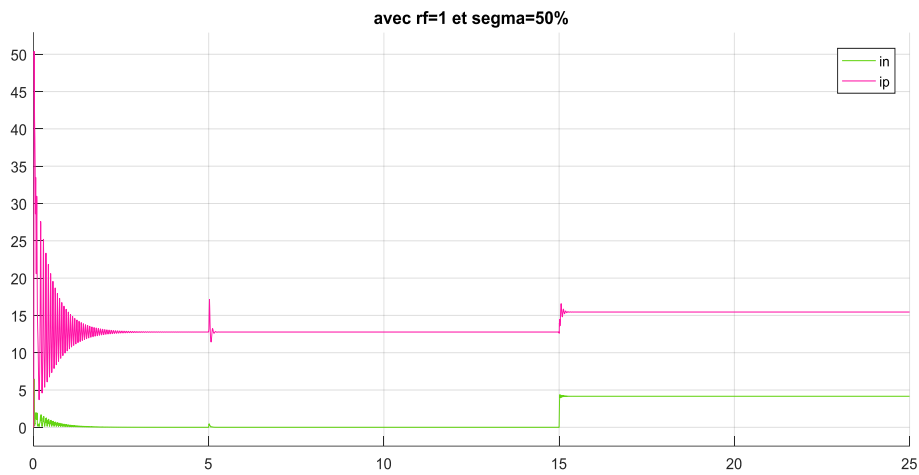


Figure. III 3. Evolutions des composantes positive et négative pour  $r_f = 1$  et  $\sigma = 0.5$ .

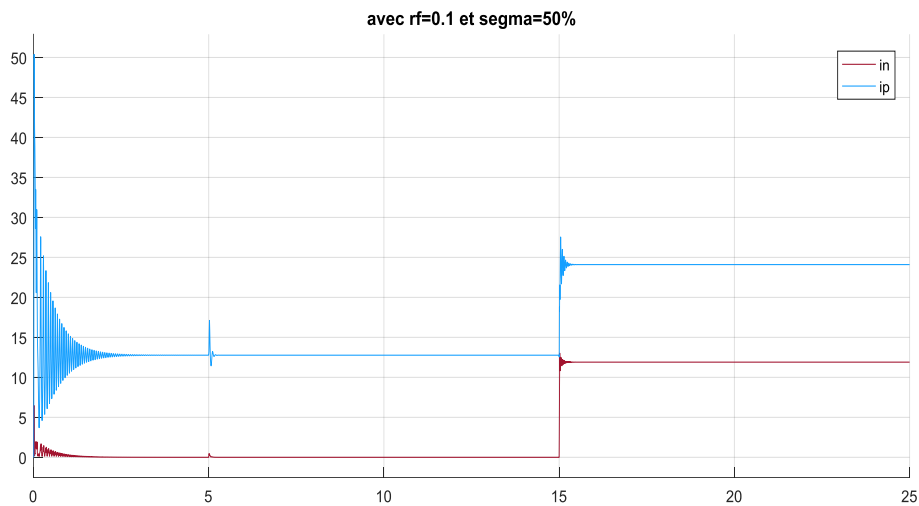


Figure.III 4. Evolutions des composantes positive et négative pour  $r_f = 0.1$  et  $\sigma = 0.5$ .

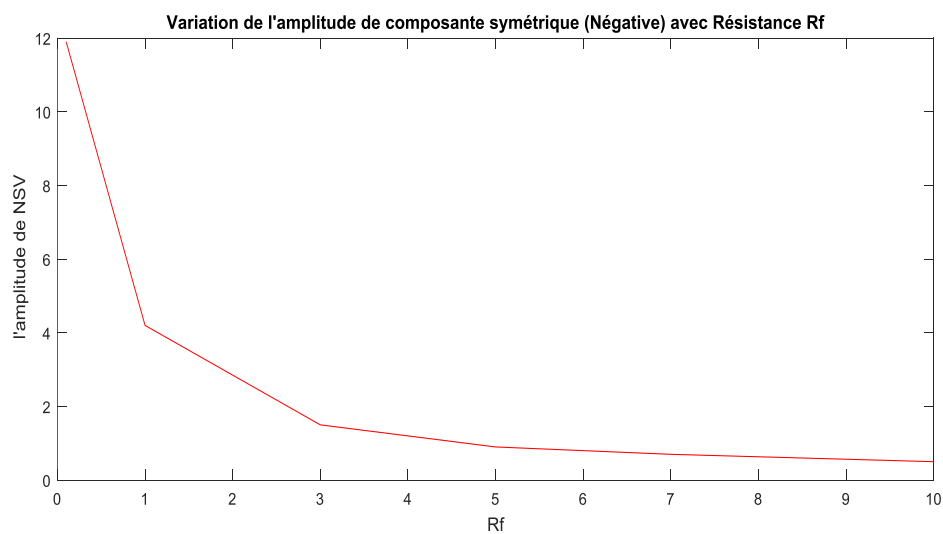


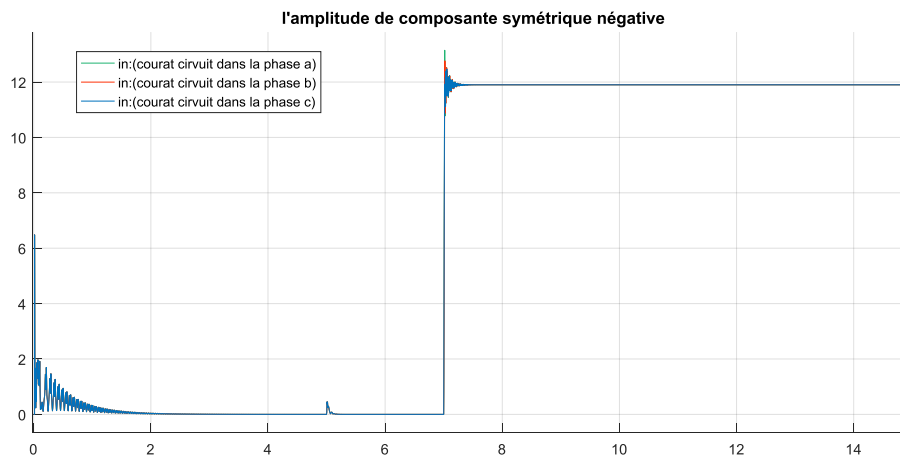
Figure. III 5. Variation de l'amplitude de composants symétrique (Négative).



## Interprétation

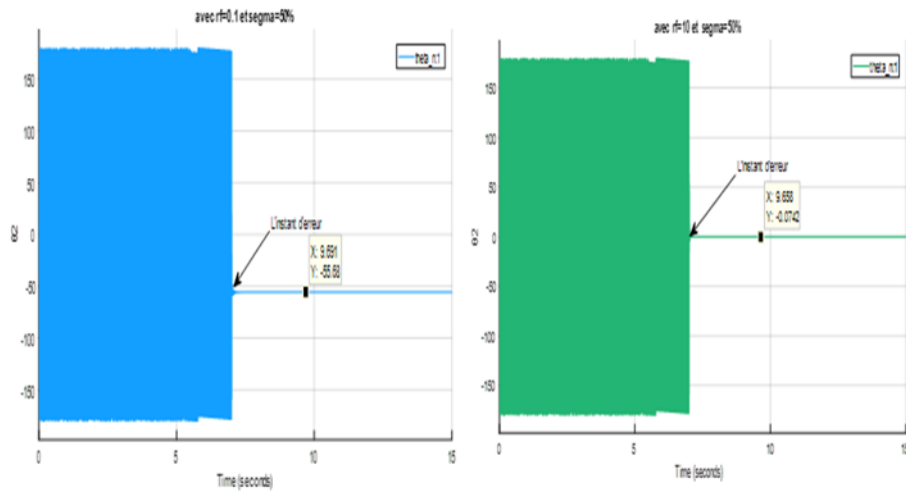
L'évolution des composantes positive et négative des courants de phase en fonction de la résistance du défaut montre que la composante négative est nulle en l'absence de défaut. Lorsqu'un défaut se produit, sa valeur augmente en fonction de la résistance du défaut ( $r_f$ ) et de sa gravité. En outre, plus la valeur de la résistance du défaut est faible, plus l'amplitude de la composante négative est grande. Par conséquent, l'amplitude de la composante négative peut être utilisée comme un bon indicateur de la présence ou de l'absence du défaut.

Cependant, nous avons également observé que l'amplitude de la composante négative ne permet pas de déterminer la phase dans laquelle le défaut s'est produit, comme le montre la figure III.5. Nous avons intentionnellement créé un défaut dans les trois phases séparément, en utilisant une valeur de résistance ( $r_f$ ) de 0,1. Nous avons constaté une similitude dans l'amplitude de la composante négative dans les trois cas.

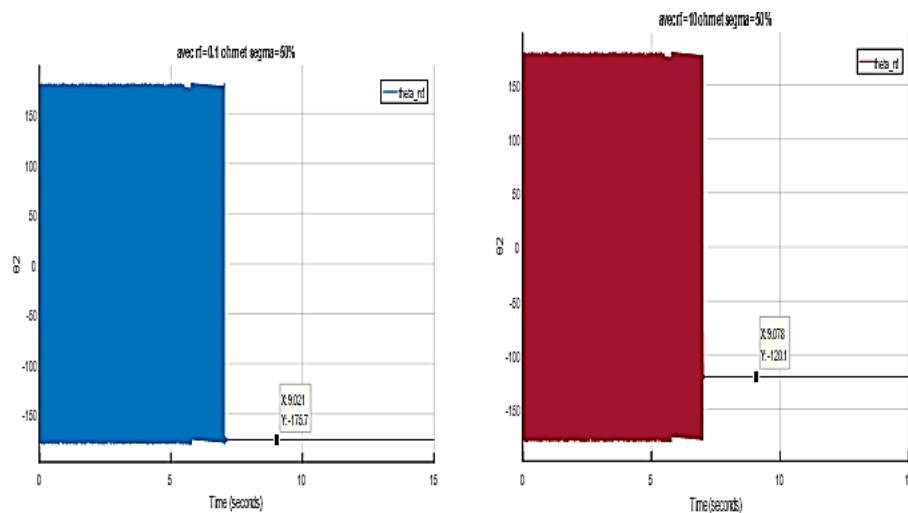


**Figure. III 6.** L'amplitude de composante symétrique négative.

Cependant, il est possible de déterminer la phase à laquelle le défaut s'est produit en analysant l'angle de la composante négative. L'angle de la composante négative ( $\theta_2$ ) varie dans un intervalle spécifique en fonction de l'emplacement du défaut, comme le montrent les courbes suivantes. En examinant les variations de l'angle de la composante négative, nous pouvons identifier l'emplacement du défaut sur les différentes phases. Cela offre une solution pour localiser précisément le défaut.



**Figure.III 7.** L'angle de composante symétrique négative en présence de défaut à la phase a.



**Figure III 8.** L'angle de composante symétrique négative en présence de défaut à la phase c.

En conséquence, nous avons observé que la valeur de  $\theta_2$  varie dans une plage de 60 degrés sans aucun chevauchement entre les différents cas de défaut, comme indiqué ci-dessous :

- $-60^\circ < \theta_2 < 0^\circ$  pour le défaut de phase “a”
- $60^\circ < \theta_2 < 120^\circ$  pour le défaut de phase “b”
- $-180^\circ < \theta_2 < -120^\circ$  pour les défauts de phase “c”

Cette variation distincte de l'angle  $\theta_2$  pour chaque cas de défaut permet de déterminer précisément la phase dans laquelle le défaut s'est produit.

### III.1.2. Analyse du courant statorique par FFT

Nous avons l'intention d'examiner les spectres harmoniques des courants statoriques pour détecter l'impact de la défaillance sur les différentes harmoniques. Cette méthode est similaire à celle utilisée pour l'analyse des spectres harmoniques dans le cas de la machine à aimants [05]. Nous présentons sur la figure III-8 les spectres harmoniques de courants de phases  $i_b$  pour un point de fonctionnement en défaut pour valeur des résistances de défaut  $r_f = 0.1, 1, 10 \Omega$

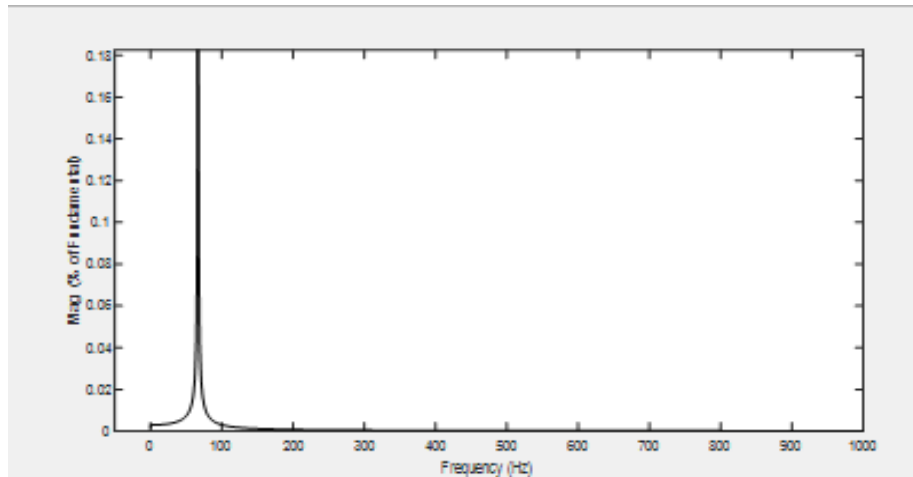


Figure III 9. Analyse spectrale de courant de phase  $i_b$  à l'état sain.

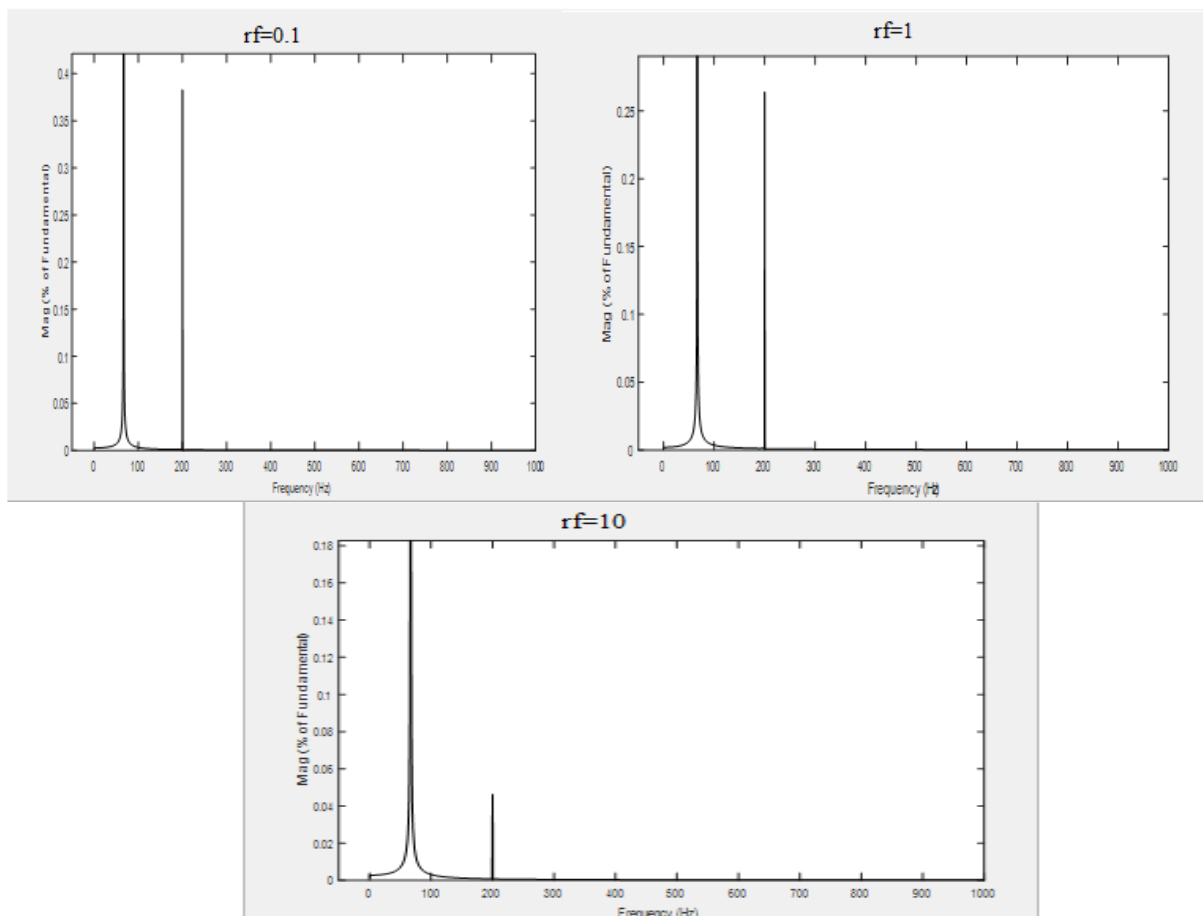


Figure. III 10. Analyse spectrale de courant de phase  $i_b$  présence de défaut entre spires avec variation de résistances  $r_f$ .

Lorsqu'un court-circuit entre spire se produit dans les bobines du stator, on remarque l'apparition d'harmoniques de rang 3 ( $66,67 \times 3 = 200$ ), dans lequel plus la résistance de défaut  $r_f$  est faible, plus ces harmoniques sont importants. Et inversement, plus la résistance de défaut est grande, plus les harmoniques sont faibles, car on peut théoriquement considérer que le modèle de la machine défaillante avec une résistance de défaut grande est équivalent au modèle de la machine saine. La détection d'harmoniques de rangs multiples de trois dans les formes d'ondes des courants de phases peut être utilisée comme une signature d'un défaut électrique, notamment celui de court-circuit entre spires.

La détection d'harmoniques de rang 3 dans la forme d'onde du courant d'une phase peut être interprétée comme un signe de la présence d'un défaut électrique, en particulier d'un court-circuit entre les spires. L'importance de l'amplitude de ces harmoniques peut également permettre d'évaluer la gravité du défaut.

Dans ce travail, nous avons extrait les harmoniques de rang 3 à partir d'un signal de courant défaillant en utilisant un filtre passe-bande. Nous utilisons l'amplitude du signal extrait comme une signature du défaut de court-circuit entre les spires.

## III.2. Méthodes de diagnostic intelligentes

Les méthodes de diagnostic intelligentes utilisent des techniques de l'intelligence artificielle pour analyser et interpréter des données afin de détecter les anomalies ou les défauts dans les systèmes. Ces méthodes peuvent inclure l'apprentissage automatique, les réseaux de neurones, les algorithmes génétiques, les systèmes experts, les réseaux bayésiens, etc. L'objectif est de créer des modèles prédictifs et des algorithmes capables de diagnostiquer les problèmes à partir de données collectées en temps réel ou stockées dans des bases de données. Les avantages de ces méthodes sont leur capacité à traiter des données complexes, à identifier des anomalies précoces et à améliorer la précision du diagnostic [17].

### III.2.1. Réseaux de neurones (ANN)

Le concept des réseaux neuronaux est inspiré des neurones biologiques. Le modèle d'un neurone formel fonctionne comme un opérateur qui effectue une somme pondérée de ses entrées, suivie d'une non-linéarité appelée fonction d'activation, qui détermine le comportement du neurone. Un réseau neuronal est composé de plusieurs couches de neurones interconnectés : les couches d'entrée, les couches cachées et les couches de sortie (Figure.III.8) [17]. La couche d'entrée reçoit des informations de sources externes, telles que les valeurs d'attribut de l'entrée de données correspondante, la couche de sortie produit la sortie du réseau et les couches cachées connectent l'entrée et la couche de sortie l'une à l'autre. La valeur d'entrée de chaque nœud dans chaque couche est calculée par la somme de tous les nœuds entrants multipliée par le poids respectif de l'interconnexion entre les nœuds (Figure.III.9) [18]. Une règle d'apprentissage permet d'ajuster les poids des connexions pour atteindre les performances souhaitées. L'initialisation du réseau neuronal est un processus itératif d'ajustement des poids et des biais afin de minimiser un critère d'erreur. L'initialisation représente également la phase d'apprentissage du

réseau et d'une fonction d'activation qui définit la valeur de sortie de chaque nœud en fonction de ses valeurs d'entrée [17].

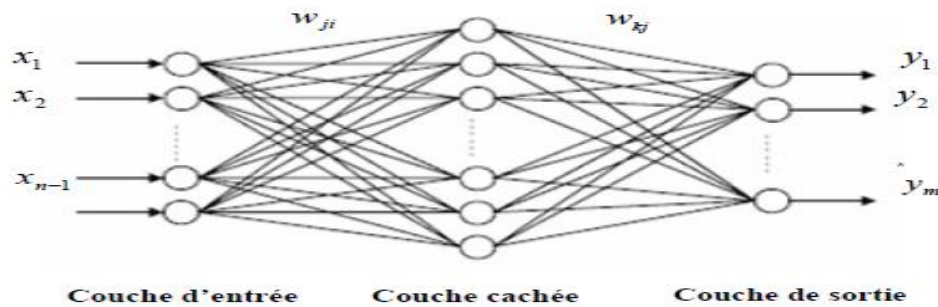


Figure. III. 11 Structure de réseau de neurones à 3 couches.

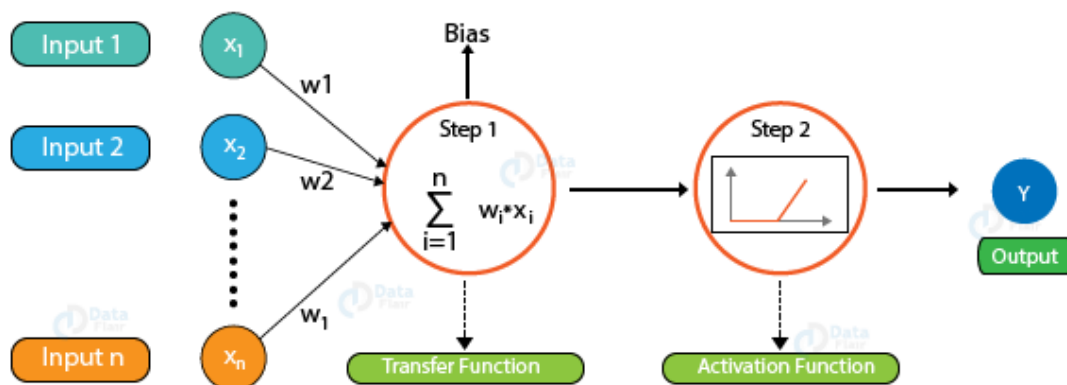


Figure. III. 12. Principe de calcul de réseaux de neurones.

### III.2.1.1. La fonction d'activation

La fonction d'activation est un élément clé des réseaux neuronaux. Elle est appliquée à la sortie d'un neurone et joue un rôle essentiel dans la modélisation du comportement et de la non-linéarité du réseau. La fonction d'activation détermine si un neurone est activé ou non en fonction de sa somme pondérée d'entrées. Elle introduit la capacité du réseau à effectuer des transformations non linéaires sur les données d'entrée, ce qui lui permet de capturer des relations complexes et d'effectuer des tâches de classification, de régression ou d'autres types de traitements de données.

### III.2.1.2. Apprentissage des réseaux de neurones

Le processus d'apprentissage implique l'ajustement des poids du réseau jusqu'à ce qu'il atteigne la stabilité, c'est-à-dire lorsque les poids ne varient que de manière insignifiante. L'apprentissage mathématique est fondé sur ce principe, en réduisant la fonction de coût qui est définie en fonction de l'erreur de sortie. Les neurones de la couche de sortie sont alors contraints d'adopter la valeur correcte, ce qui conduit à des ajustements légers des poids des neurones des couches précédentes. Il existe deux types d'apprentissage [17].

### a. Apprentissage supervisé

Apprentissage supervisé consiste à établir des règles de comportement à partir d'une base de données contenant des exemples de cas déjà étiquetés. Plus précisément, cette base de données est un ensemble de couples entre et sorties  $\{X_i, Y_i\}$  aléatoires. L'objectif est alors de calculer les poids sont ajustés de façon à réduire l'écart entre elles (d'apprendre à prédire), pour toute nouvelle entrée  $X$ , la sortie  $Y$ . On parle de régression dans le cas où les sorties sont à valeurs continues et de classification dans le cas où elles sont à valeurs discrètes [19].

### b. Apprentissage non supervisé

La théorie de l'apprentissage non supervisé traite le cas où l'on dispose seulement des entrées  $\{X_i\}$ , sans les sorties  $\{Y_i\}$ . Le problème le plus important consiste alors à effectuer un partitionnement des données, également appelé clustering. Il s'agit de regrouper les observations en divergents groupes homogènes (les clusters), en faisant en sorte que les données de chaque sous-ensemble partagent des caractéristiques communes [19].

#### *Remarque:*

Dans un scénario d'apprentissage supervisé, les réseaux de neurones artificiels peuvent être entraînés à l'aide de l'algorithme de rétropropagation (Backpropagation), qui réajuste les poids des interconnexions dans le réseau de neurones en fonction des taux d'erreur locaux.

### III.2.1.3. Types des réseaux de neurones

Les réseaux de neurones peuvent être divisés en deux types principaux:

#### a. Réseaux statiques ou réseaux à couches (*Feedforward*)

Les réseaux *Feedforward* sont définis comme tous les réseaux qui ne reçoivent pas de retour du réseau lui-même. Cela signifie que les données d'entrée circulent dans une direction, des nœuds d'entrée via 0 à  $n$  nœuds cachés vers les nœuds de sortie. Il n'y a pas d'information donnée à rebours pour réadapter le système [18].

### b. Rétropropagation (Backpropagation)

La rétropropagation dans les réseaux neuronaux décrit le processus d'utilisation d'une erreur locale du réseau pour réajuster les poids des interconnexions vers l'arrière à travers le réseau neuronal. Explicitement, cela signifie qu'après qu'une prédiction pour un ensemble de valeurs d'entrée a été faite, la valeur de sortie réelle est comparée à la valeur de prédiction et une erreur est calculée. Cette erreur est ensuite utilisée pour réajuster les poids des connexions en commençant par les bords qui sont directement connectés aux nœuds de sortie du réseau, puis en continuant plus loin dans celui-ci. Afin d'entraîner un réseau de neurones [18].

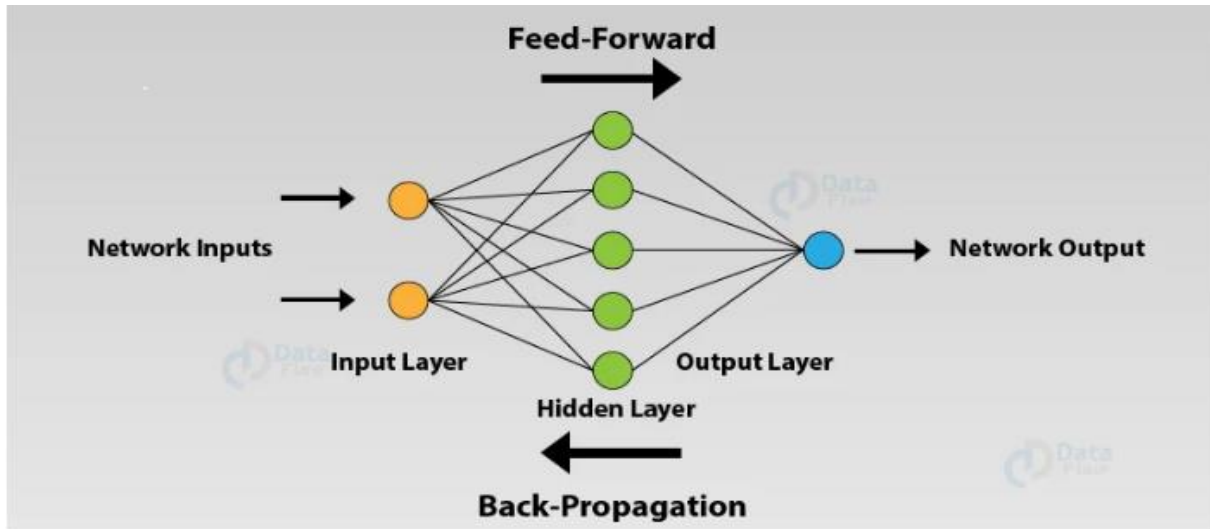


Figure. III. 13. Principe de Feedforward et Backpropagation.

#### III.2.2.1. Régression logistique (RLG)

La régression logistique est une méthode d'analyse statistique permettant de prédire un résultat binaire, ou plus, sur la base d'observations précédentes d'un ensemble de données. Un modèle de régression logistique prédit une variable de données dépendante en analysant la relation entre une ou plusieurs variables indépendantes présentes. C'est un outil important dans le domaine de l'apprentissage automatique. Il permet aux algorithmes utilisés dans les applications d'apprentissage automatique de classer les données entrantes en fonction des données historiques. Au fur et à mesure que des données pertinentes supplémentaires deviennent disponibles, les algorithmes s'améliorent pour prédire les classifications au sein des ensembles de données [20].

##### III.2.2.1. Types des régressions logistiques

La régression logistique multinomiale peut être divisés en deux types principaux :

###### a. La régression logistique binaire

La régression logistique binaire est utilisée pour prédire une variable binaire, telle que "oui" ou "non", "vrai" ou "faux". La régression logistique multinomiale étend cette approche en permettant la

prédiction de variables avec plus de deux catégories. Par exemple, elle peut être utilisée pour prédire la catégorie d'une fleur (rose, tulipe, marguerite) en fonction de ses caractéristiques telles que la couleur des pétales, la longueur des sépales, etc...[21].

### b. La régression logistique multinomiale (multi-classe classification):

Le modèle de régression logistique multinomiale est basé sur le principe de la régression logistique binaire. Cependant, au lieu d'estimer un seul ensemble de coefficients pour prédire une catégorie par rapport à une catégorie de référence, la régression logistique multinomiale estime plusieurs ensembles de coefficients pour chaque catégorie par rapport à une catégorie de référence.

L'estimation des coefficients dans la régression logistique multinomiale se fait généralement à l'aide de techniques d'optimisation numérique telles que la méthode du maximum de vraisemblance ou la descente de gradient. Une fois que le modèle est ajusté, il peut être utilisé pour prédire la catégorie d'une nouvelle observation en fonction de ses caractéristiques [21].

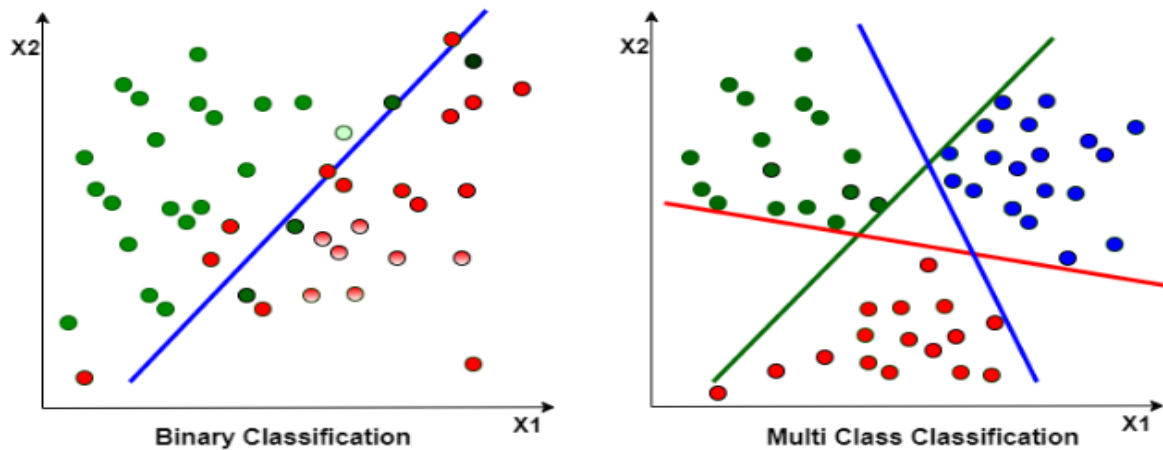


Figure. III. 14. Types des régressions logistiques.

## III.3. Application au diagnostic de la machine synchrone a aimant permanent

### III.3.1. Les étapes d'apprentissage

#### a. Choix des inducteurs

Les indicateurs, liés au défaut de court-circuit entre les spires, utilisés pour entraîner un modèle intelligent sont :

- Composantes négatives (amplitude et phase)
- Harmoniques de rang 3 (nous avons utilisé un filtre passe-bande pour les extraire)
- Amplitude de courant statorique



### b. Extraction de données

A cette étape, nous avons extrait les données sur les indicateurs de défaut du modèle de simulation, où nous avons collecté les données de défaut pour les entrées à chaque étape en modifiant la valeur gravité de défaut et les valeurs de résistance de défaut, et les données du modèle qui prédit le l'emplacement du défaut est représenté par une matrice de taille [8600 \* 3] , Le modèle qui prédit la gravité de défaut est représenté par une matrice de taille [1800 \* 3] et de Le modèle qui prédit la résistance de défaut est représenté par une matrice de taille [7040 \* 5].

En ce qui concerne les données de sortie, nous les avons divisées en plusieurs classe pour chaque modèle.

- Pour le premier modèle (modèle de détection l'emplacement de défaut) les données de sortie sont :
  1. Classe moteur sain
  2. Classe de court-circuit entre spire de phase a
  3. Classe de court-circuit entre spire de phase b
  4. Classe de court-circuit entre spire de phase c
- Pour le deuxième modèle (modèle de gravité de défaut) les données de sortie sont :
  1. Classe moteur sain
  2. Classe de gravite de défaut ( $\sigma=10\%$ )
  3. Classe de gravite de défaut ( $\sigma=20\%$ )
  4. Classe de gravite de défaut ( $\sigma=30\%$ )
  5. Classe de gravite de défaut ( $\sigma=40\%$ )
  6. Classe de gravite de défaut ( $\sigma=50\%$ )
- Pour le troisième modèle (Modèle de calcul de la résistance de défaut) les données de sortie sont:
 

Classe= [0.1 0.5 1 1.5 2 2.5 3 3.5 4 4.5 5 5.5 6 6.5 7 7.5 8 8.8 9 9.5 10 sain]

### c. Entraînement

Nous avons saisi les données, où nous nous sommes appuyés sur deux algorithmes pour apprendre à ce modèle à prédire l'emplacement, la gravité et la résistance de défaut.

III.3.2. Test des Modèles

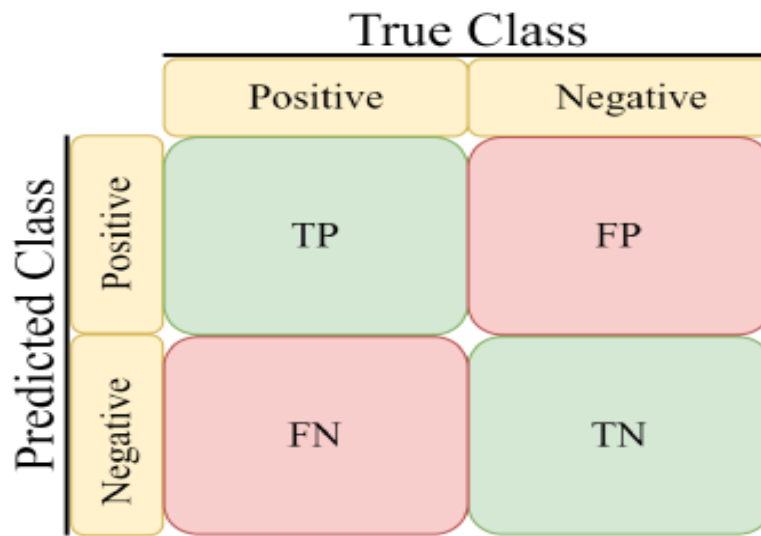


Figure. III. 15. Confusion Matrix.

Après avoir obtenu les modèles lors de l'étape d'entraînement, afin de tester ces modèles, nous avons utilisé des données qui n'avaient pas été utilisées lors de l'apprentissage. Nous avons extrait ces données en ajustant les valeurs de la résistance de défaut, la gravité de défaut ainsi que les valeurs de vitesse. Les résultats obtenus peuvent être résumés dans une matrice de confusion comme indiqué ci-dessous :

où:

TP = True positives (vrais positifs).

TN = True Negatives (Vrais négatifs).

FP = False Positives (Faux positifs).

FN = False negatives. (Faux négatifs).

a. Test du Modèle de réseaux de neurones (Modèle de détection de la phase de défaut)

<b>Classe a</b>	8	3	1	1
<b>Classe b</b>	0	12	0	1
<b>Classe c</b>	0	1	11	1
<b>Classe s</b>	0	0	0	13
	<b>Classe a</b>	<b>Classe b</b>	<b>Classe c</b>	<b>Classe s</b>

61.53%	38.47%
92.30%	7.7%
84.61%	15.39%
100%	0%

100%	80%	91.66%	81.25%
0	20%	8.33%	18.75%

Tableau. III. 1. Matrice de confusion de modèle ANN (modèle de détection l'emplacement de défaut).

**b. Test Le Modèle de régressions logistiques (Modèle de détection l'emplacement de défaut)**

Classe a	10	0	1	2	76.92%	23.92%
Classe b	0	12	0	1	92.30%	7.7%
Classe c	0	1	11	1	84.61%	15.39%
Classe s	0	0	0	13	100%	0%
	Classe a	Classe b	Classe c	Classe s		

100%	92.30%	91.66%	76.47%
0	7.7%	8.33%	23.52%

**Tableau. III. 2.**Matrice de confusion de modèle RGL (modèle de détection l'emplacement de défaut)

Une fois le modèle testé, ses performances ont été évaluées en analysant la matrice de confusion, présentée à Figure.III.15. Les résultats révèlent que le premier modèle prédit de manière exacte à 100 % les entrées saines, mais il commet une erreur en classifiant 7 % des entrées de défaut comme étant saines. En ce qui concerne le deuxième modèle, il prédit correctement à 100 % les entrées saines, mais il fait une prédiction erronée en considérant 15 % des entrées de défaut comme étant saines.

**Test Le Modèle de réseaux de neurones (Modèle de prédit de la gravité de défaut)**

Classe $\sigma=10\%$	103	0	0	0	0	0	100%	0%
Classe $\sigma=20\%$	20	83	0	0	0	0	80.59%	19.41%
Classe $\sigma=30\%$	0	0	103	0	0	0	100%	0%
Classe $\sigma=40\%$	0	0	0	103	0	0	100%	0%
Classe $\sigma=50\%$	0	0	0	0	103	0	100%	0%
Classe sain	0	0	0	0	0	103	100%	0%
	Classe ( $\sigma=10\%$ )	Classe ( $\sigma=20\%$ )	Classe ( $\sigma=30\%$ )	Classe ( $\sigma=40\%$ )	Classe ( $\sigma=50\%$ )	Classe sain		

83.74%	100%	100%	100%	100%	100%
16.26%	0%	0%	0%	0%	0%

**Tableau. III. 3.**Matrice de confusion de modèle ANN (modèle de prédit la gravité de défaut).

**d. Test Le Modèle de régressions logistiques (modèle de prédit la gravité de défaut)**

Classe $\sigma=10\%$	103	0	0	0	0	0	100%	0%
Classe $\sigma=20\%$	41	62	0	0	0	0	60.19%	39.80%
Classe $\sigma=30\%$	0	0	103	0	0	0	100%	0%
Classe $\sigma=40\%$	0	0	0	103	0	0	100%	0%
Classe $\sigma=50\%$	0	0	0	0	103	0	100%	0%
Classe sain	0	0	0	0	0	103	100%	0%
	<b>Classe (<math>\sigma=10\%</math>)</b>	<b>Classe (<math>\sigma=20\%</math>)</b>	<b>Classe (<math>\sigma=30\%</math>)</b>	<b>Classe (<math>\sigma=40\%</math>)</b>	<b>Classe (<math>\sigma=50\%</math>)</b>	<b>Classe sain</b>		

71.30%	100%	100%	100%	100%	100%
28.7%	0%	0%	0%	0%	0%

**Tableau. III. 4.**Matrice de confusion de Modèle RGL (modèle de prédit la gravité de défaut).**Interprétation**

À partir de la matrice de confusion du modèle de prédiction de gravité de défaut, nous avons remarqué la supériorité du modèle basé sur ANN sur le deuxième modèle RGL en termes de précision de prédiction, où dans la classe 3 ( $\sigma=20\%$ ), la précision était de 80,5 % dans le modèle ANN, tandis que dans le modèle RGL, elle était 60,19 %, et même par rapport au reste des sections, le pourcentage de prédiction était de 100 % dans les deux modèles.

## e. Test du Modèle de réseaux de neurones (modèle de prédit de la résistance de défaut)

rf	0.1	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	sain		
0.1	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0.5	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.5	0	0	16	64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	20	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.5	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	20	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.5	0	0	0	0	0	0	13	67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	65	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.5	0	0	0	0	0	0	0	0	20	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	60	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	60	0	0	0	0	0	0	0
8.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	20	40	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40	0	40	0	0	0
9.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	60	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0
sain	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0

Tableau. III. 5. Matrice de confusion de modèle ANN (modèle de prédit de la résistance de défaut).

## f. Test Le Modèle de régressions logistiques (Modèle de prédit de la résistance de défaut)

$r_f$	0.1	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	sain	
0.1	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	0	60	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	20	40	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.5	0	0	20	40	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	20	40	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.5	0	0	0	0	20	40	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	20	20	20	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.5	0	0	0	0	0	20	0	40	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	20	20	0	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.5	0	0	0	0	0	0	0	20	20	0	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	20	20	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	9	40	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	40	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	60	0	0	0	0	0	0	0	0
7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40	20	0	0	0	0	20	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	20	0	0	20	20	0	0
8.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	20	0	0	0	0	40	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	60	0	0
9.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	60	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	60	0	0
sain	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80

Tableau. III. 6. Matrice de confusion de modèle RGL (modèle de prédit de la résistance de défaut).

### III.3.3. Comparaison des résultats

Lorsque les modèles d'apprentissage automatique sont optimisés par rapport aux fonctions de cout, les performances du modèle devraient s'améliorer. En règle générale, les modèles ML sont mesurés par la précision est devenue telle que la partie des prédictions du modèle a bien fonctionné [13]. Peut être calculé par:

$$\text{Accuracy} = \frac{\sum TP + \sum TN}{\sum TP + \sum TN + \sum FP + \sum FN} \quad [\text{III.1}]$$

où:

TP = True positives (vrais positifs).

TN = True Negatives (Vrais négatifs).

FP = False Positives (Faux positifs).

FN = False negatives. (Faux négatifs).

Cependant, la précision seule ne devrait pas être la mesure de la qualité du modèle ML. Les autres mesures applicables incluent la précision et le recall. La précision est utilisée pour répondre à la question: quelle proportion d'identification positive était réellement correcte? [13]. Il est calculé par :

$$\text{Precision} = \frac{\sum TP}{\sum TP + \sum FP} \quad [\text{III.2}]$$

Le Recall est utilisé pour répondre à la question : quelle proportion de points positifs réels a été correctement identifié ? [13]. Il est calculé par:

$$\text{Recall} = \frac{\sum TP}{\sum TP + \sum FN} \quad [\text{III.3}]$$

On applique les relations [III.1], [III.2], et [III.3] dans les modèles développés et obtenons les résultats suivants :

#### a. Modèle de détection de la phase de défaut

Model	Accuracy	Précision	Recale
ANN	93.26%	84.6%	86.27%
RGL	94.23%	88.46	88.46%

Tableau. III. 7. Performances du modèle de détection la phase de défaut.

#### b. Modèle de prédiction de la gravité de défaut :

Model	Accuracy	Précision	Recale
ANN	98.92%	96.76%	96.76%
RGL	97.78%	93.36	93.36%

Tableau. III. 8. Performances du modèle de prédit la gravité de défaut.

#### c. Modèle de prédiction de la résistance de défaut

Model	Accuracy	Précision	Recale
ANN	98.01%	77%	77%
RGL	49.14%	40.90%	40.90%

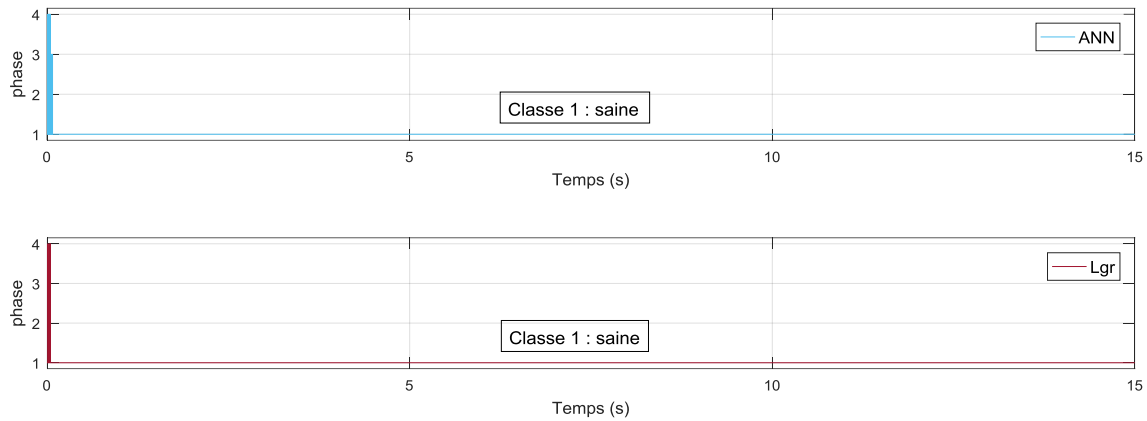
Tableau. III. 9. Performances du modèle de prédit de la résistance de défauts.

**Interprétation**

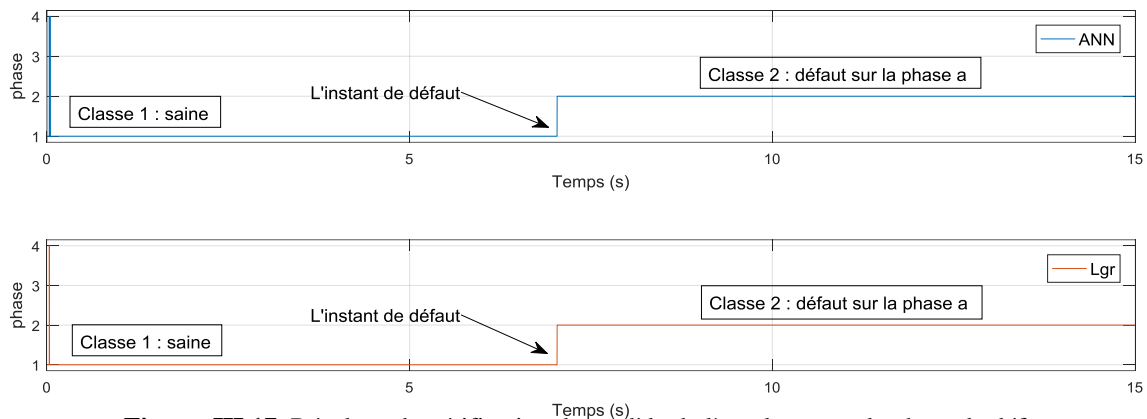
A partir du deuxième tableau d'un modèle qui prédit la sévérité de l'erreur, et du troisième tableau d'une prédiction de la résistance à l'erreur, on note une nette supériorité de la méthode ANN sur la méthode Lgr en termes de classification des données de défaut ainsi que de données saine.

**III.3.4. Vérification des Modèles**

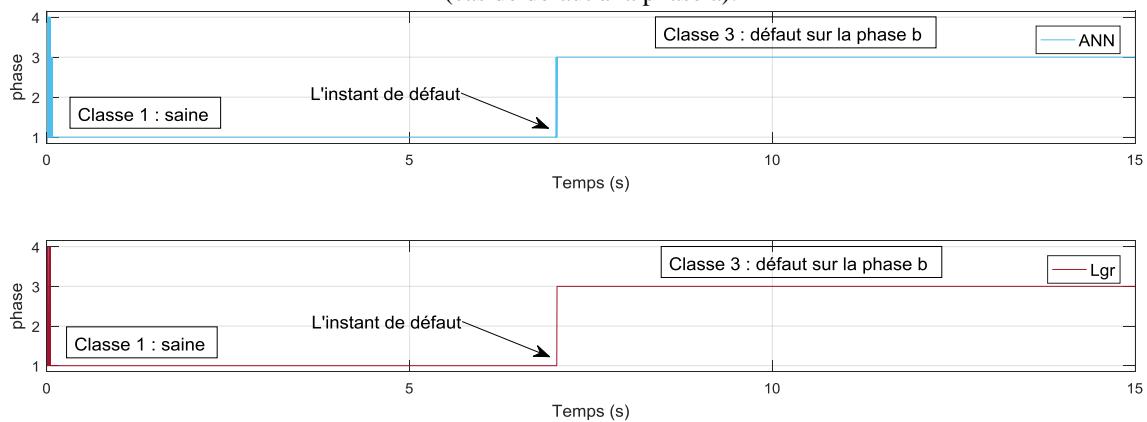
**a. Modèle de détection de l'emplacement de défaut**



**Figure III 16.** Résultats de vérification de modèle de l'emplacement la phase de défaut (cas sain).

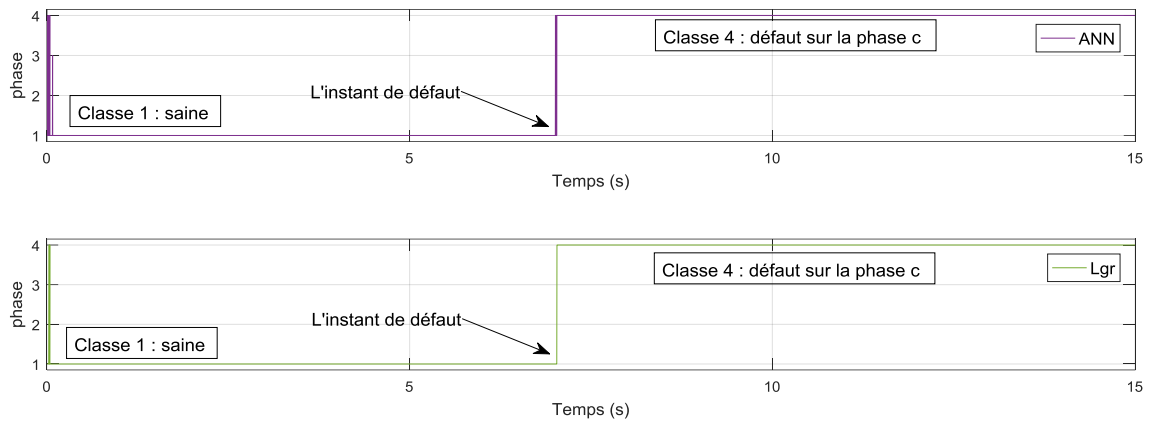


**Figure. III 17.** Résultats de vérification de modèle de l'emplacement la phase de défaut (cas de défaut à la phase a).

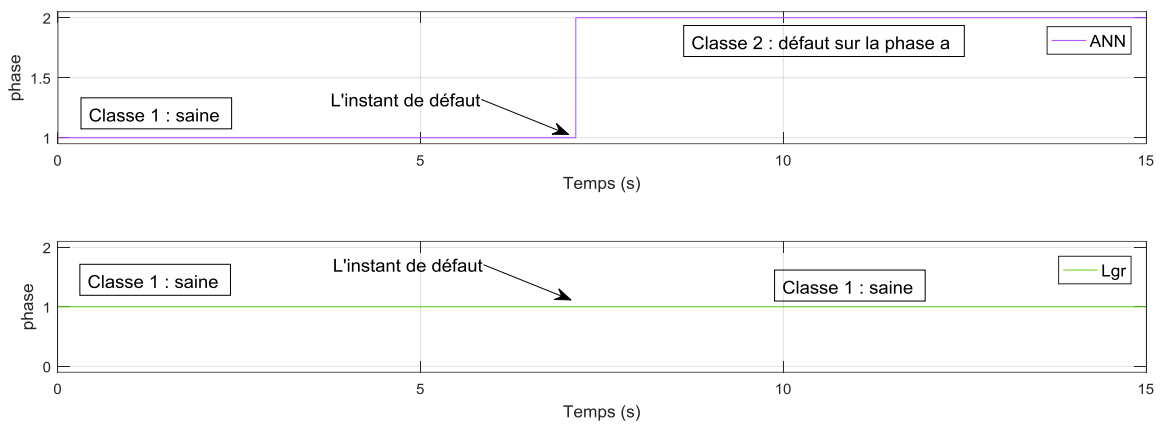


**Figure. III.18.** Résultats de vérification de modèle de détection l'emplacement de défaut (Cas de défaut à la phase b).



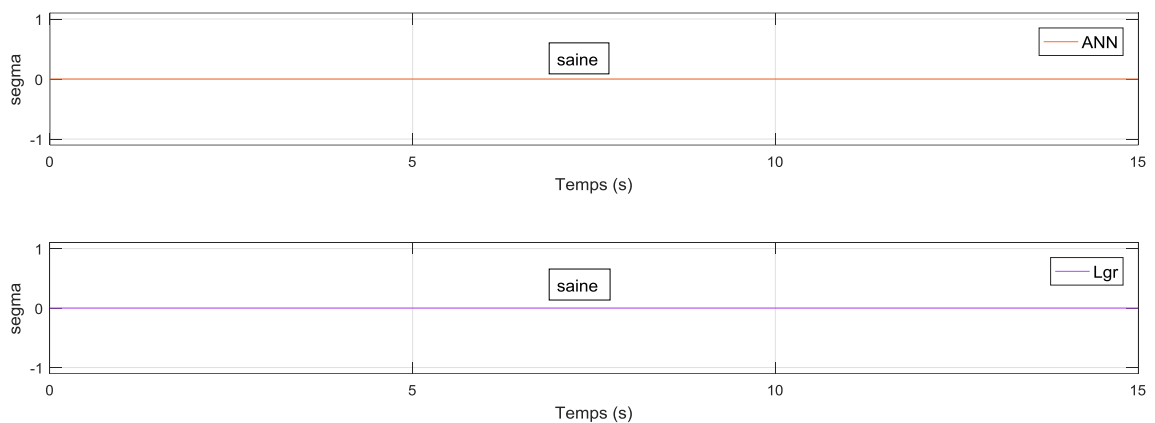


**Figure. III.19.** Résultats de vérification de Modèle de détection l'emplacement de défaut (cas de défaut à la phase c).



**Figure. III.20.** Résultats de vérification de Modèle de détection l'emplacement de défaut (Cas de défaut à la phase a «  $f=20$   $r_f=5$   $\sigma=0.2$  »).

**b. Modèle de prédiction de la gravité de défaut**



**Figure. III.21.** Résultats de vérification de Modèle de prédit la gravité de défaut ( $\sigma=0$ ,  $f=66.67$ ).

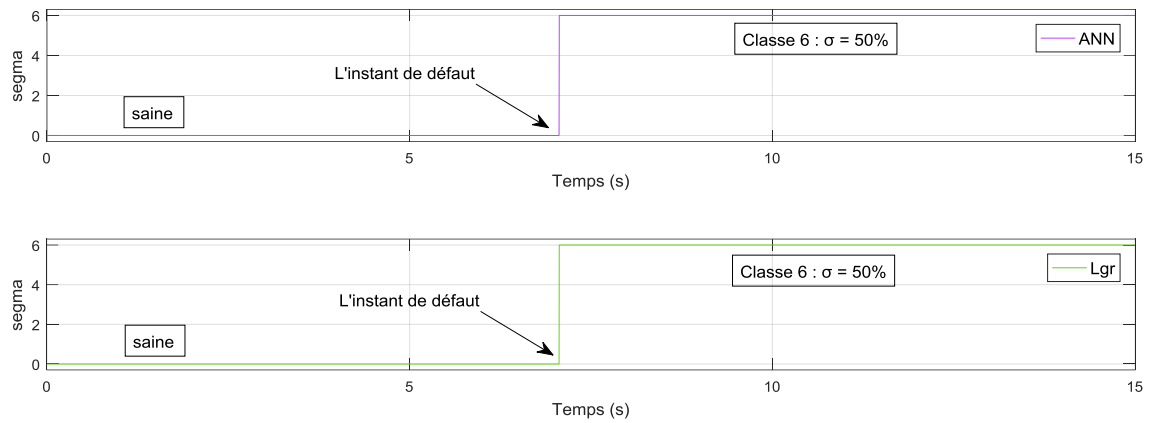


Figure. III .22. Résultats de vérification de Modèle de prédit la gravité de défaut ( $\sigma=50\%$ ,  $f=66.67$ ).

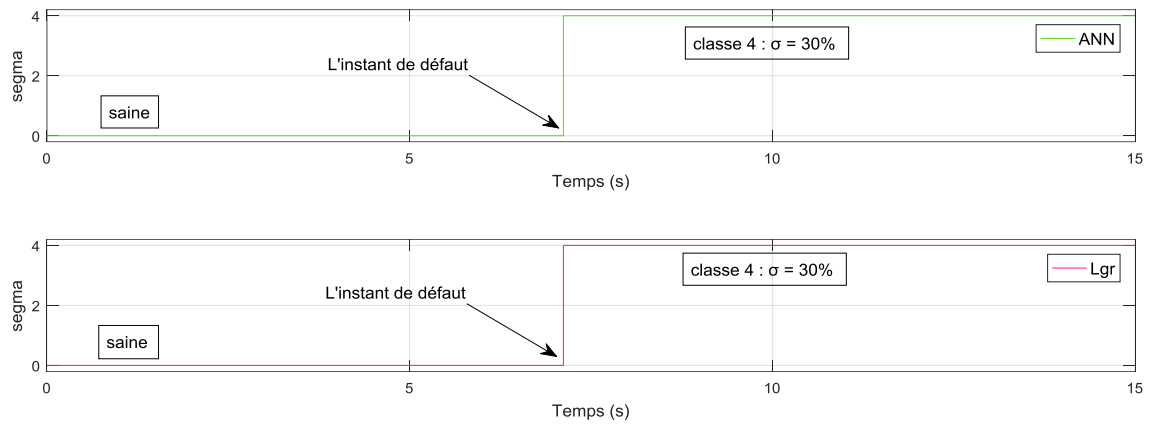


Figure. III 23. Résultats de vérification de Modèle de prédit la gravité de défaut ( $\sigma=30\%$ ,  $f=66.67$ ).

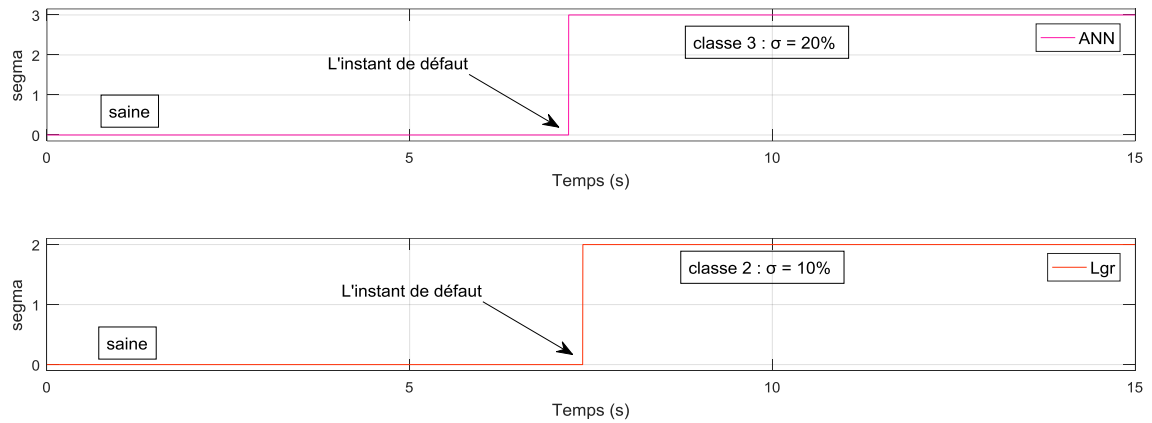
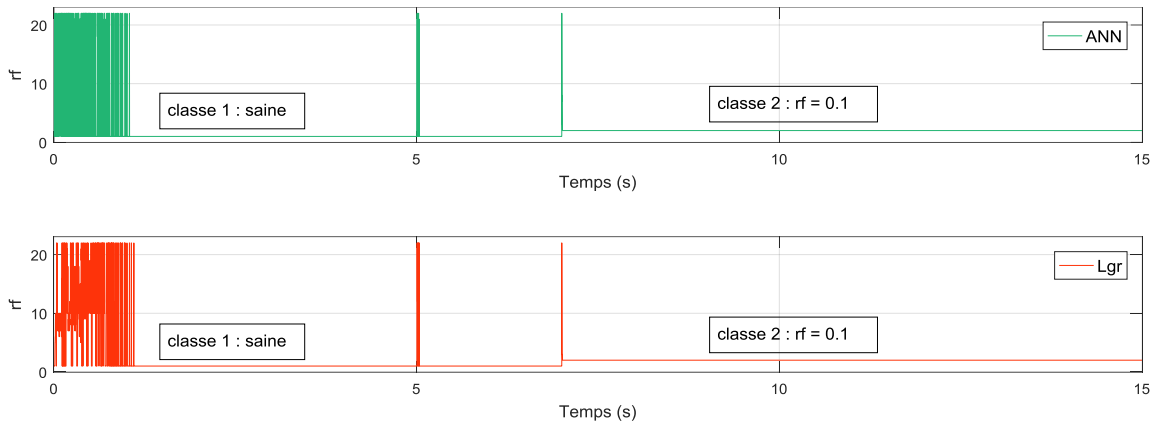
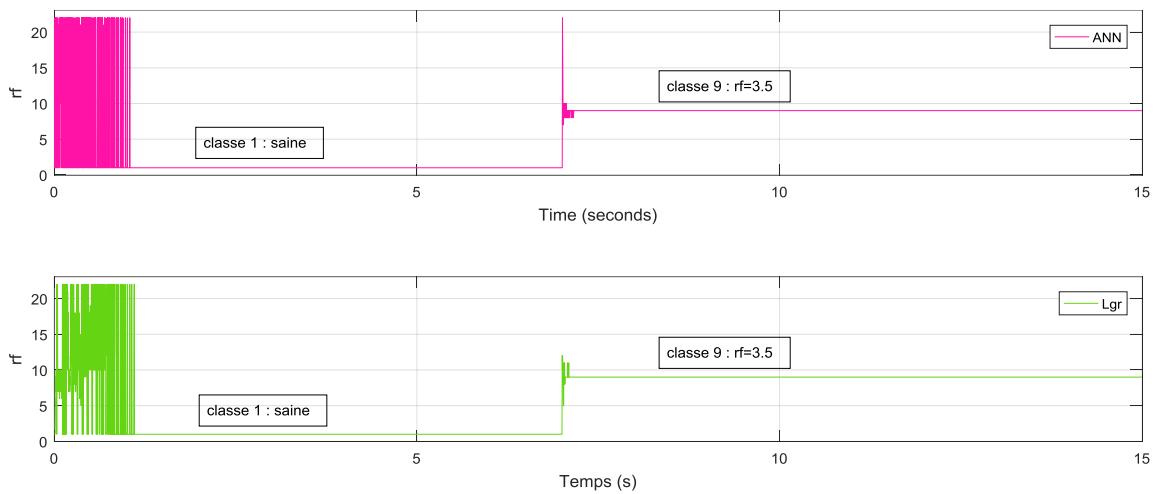


Figure. III 24. Résultats de vérification de Modèle de prédit la gravité de défaut ( $\sigma=20\%$ ,  $f=66.67$ ).

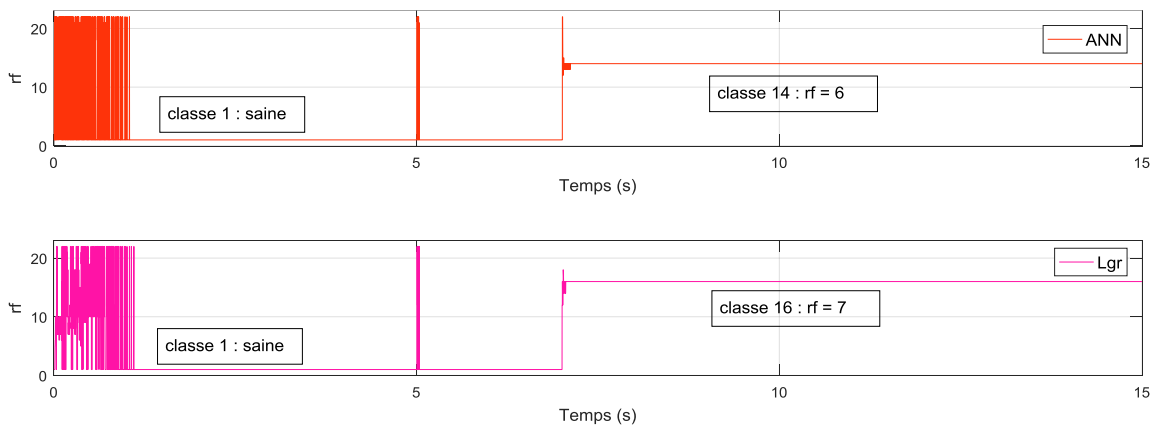
**d. Modèle de prédiction de la résistance de défaut**



**Figure. III 25.** Résultats de vérification de modèle de prédit la résistance de défaut ( $r_f=0.1$ ).



**Figure. III 26.** Résultats de vérification de modèle de prédit la résistance de défaut ( $r_f=3.5$ ).



**Figure. III 27.** Résultats de vérification de modèle de prédit la résistance de défaut ( $r_f=6$ ).

### Interprétation des résultats

Après une analyse complète des résultats précédents, concernant le modèle de prédiction de l'emplacement de défauts, nous avons remarqué des similitudes dans les prédictions entre les deux modèles à l'exception d'un cas représenté sur la Figure.(III-9). Et dans lequel le modèle ANN nous a donné une prédiction correcte, comme pour le modèle qui prédit la gravité de défaut et le modèle qui prédit la valeur de la résistance de défaut, nous avons constaté que la méthode du réseau neuronal nous a donné une prédiction correcte la plupart des fois, contrairement à la deuxième méthode dont la prédiction était incorrecte lorsque le moteur est proche de l'état sain comme indiquée à la Figure.(III 24) et (III 27).

#### III.3.5. L'état de l'isolateur de moteur

Pour classer l'état d'isolant d'un moteur électrique en 5 grades, vous pouvez utiliser les catégories suivantes :

- **Excellent** : L'isolant est en parfait état, sans aucun signe de détérioration ou de défaut.
- **Bon** : L'isolant présente de légères imperfections ou des signes minimes de détérioration, mais reste globalement fonctionnel.
- **Moyen** : L'isolant montre des signes visibles de détérioration, avec des défauts plus importants qui pourraient affecter les performances du moteur à long terme.
- **Médiocre** : L'isolant est considérablement endommagé, avec des défauts importants qui affectent déjà les performances et la durabilité du moteur.
- **Mauvais** : L'isolant est en très mauvais état, avec de graves défauts, des fissures ou des zones manquantes, rendant le moteur électrique inutilisable ou nécessitant une réparation majeure.

L'état pour l'isolation est défini dans l'intervalle [0-10] divisé en 5 sections comme peut être vu dans Tableau.III.10

L'état de l'isolateur de moteur	l'intervalle
Excellent	$r_f > 10$
Bon	$7.5 < r_f \leq 10$
Moyen	$5 < r_f \leq 7.5$
Médiocre	$2.5 < r_f \leq 5$
Mauvais	$0 < r_f \leq 2.5$

**Tableau.III. 10.** L'état de l'isolateur de moteur.

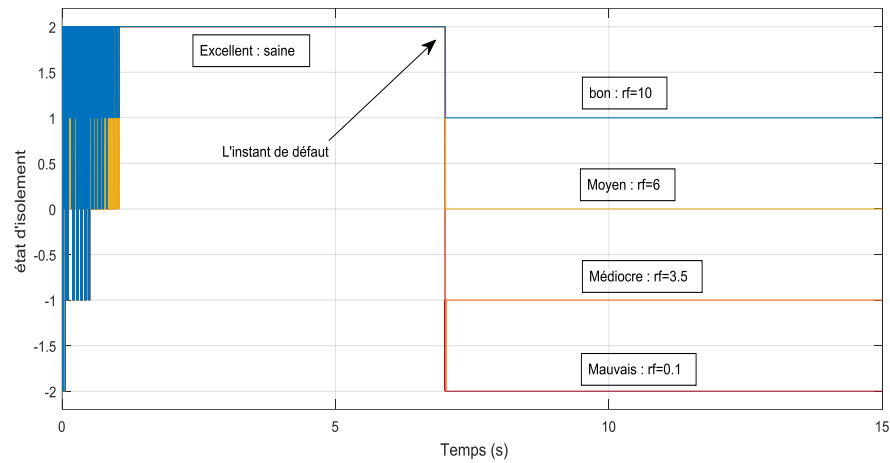


Figure.III 28. L'état de l'isolation à l'aide de variation de la résistance de défaut.

### III.4. Validation expérimentale

À cette étape, nous avons utilisé des données collectées à partir d'un générateur synchrone connecté à une charge  $RL$ , (Source des données : collaboration avec laboratoire de *LIAS* de Poitiers). Ces données sont enregistrées pendant 6 secondes avec une fréquence d'échantillonnage de 100 kHz. Les présents résultats sont pour un court-circuit 8% entre les spires de la phase a. Dans la suite, nous présentons les courbes de tension et de courant obtenues.

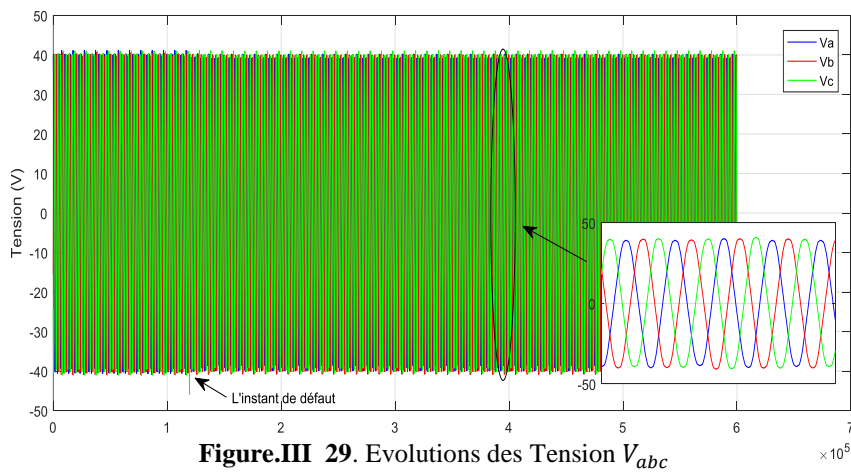


Figure.III 29. Evolutions des Tension  $V_{abc}$

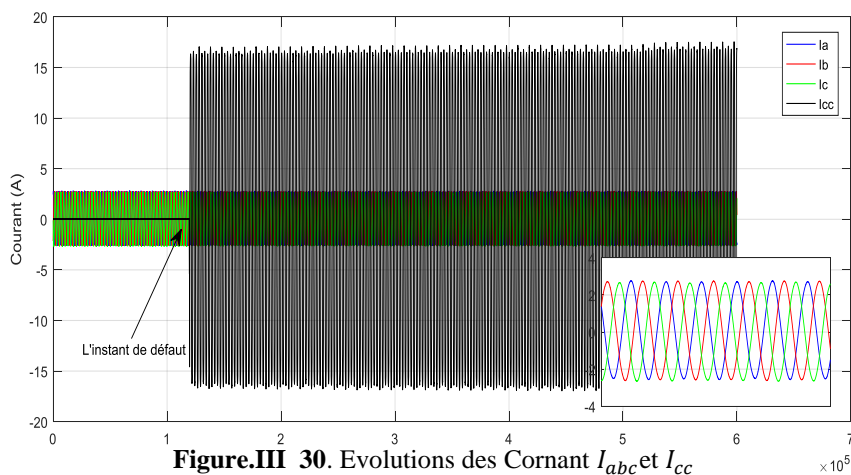
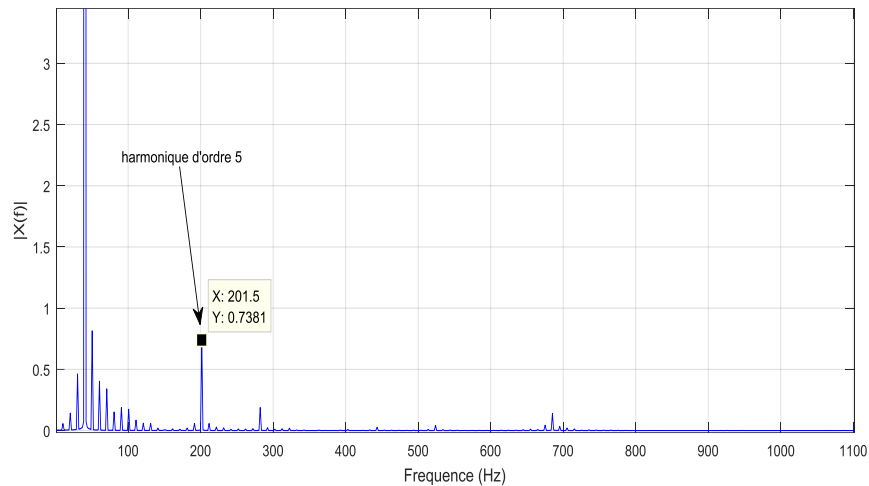


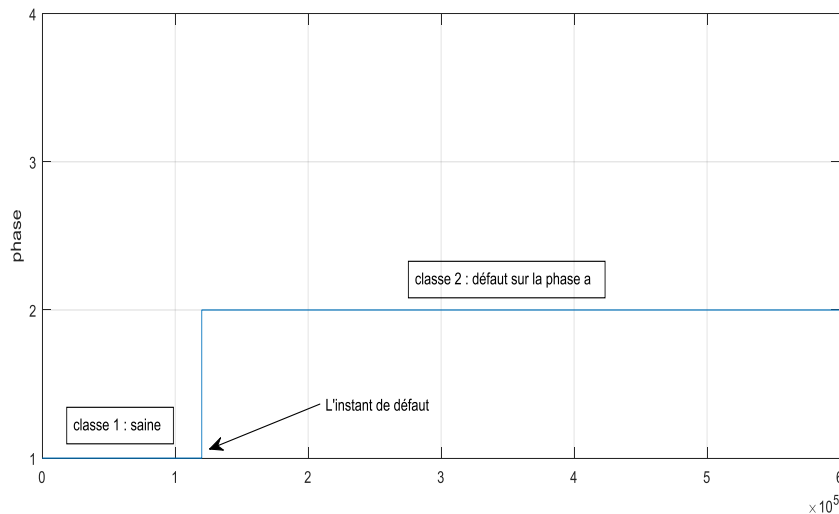
Figure.III 30. Evolutions des Cornant  $I_{abc}$  et  $I_{cc}$



**Figure.III 31.** Harmonique orge 5 de tension.

Il est clair que la présence d'un court-circuit peut être confirmée à partir du courant de court-circuit  $I_{cc}$ , tel qu'illustré dans la Figure III.30. De plus, nous avons remarqué la présence d'une harmonique d'ordre 5 dans la tension (Figure III.31) conformément avec la référence [22]. En utilisant les données précédentes comme entrée pour un modèle de prédiction de l'emplacement du défaut, nous avons obtenu des résultats cohérents avec les données antérieures.

### ➤ Résultat de modèle de détection l'emplacement



**Figure.III 32.** Résultat de validation de module.

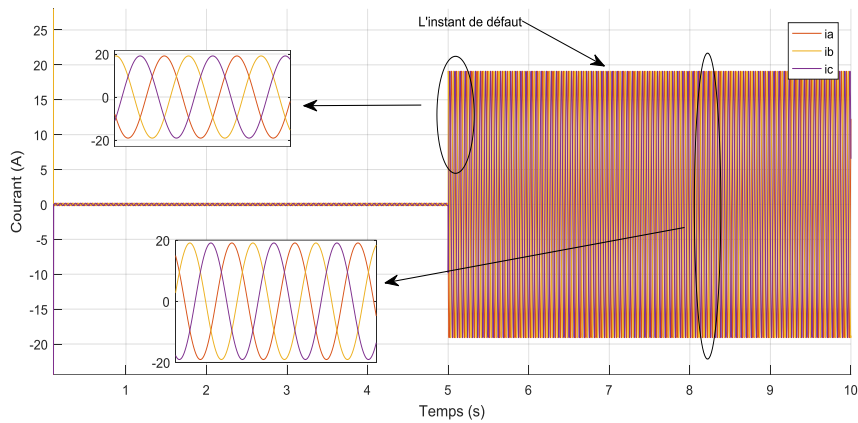
Après avoir entré les valeurs des indicateurs de défaut de **GSAP** dans un modèle de prédiction de l'emplacement de défaut qui s'appuie sur la méthode ANN, il nous a donné des résultats corrects en utilisant les composantes négatives de la tension au lieu du courant et la cinquième harmonique au lieu de la troisième.

### III.5. Analyse de défaut de Court-circuit avec effet du contrôleur

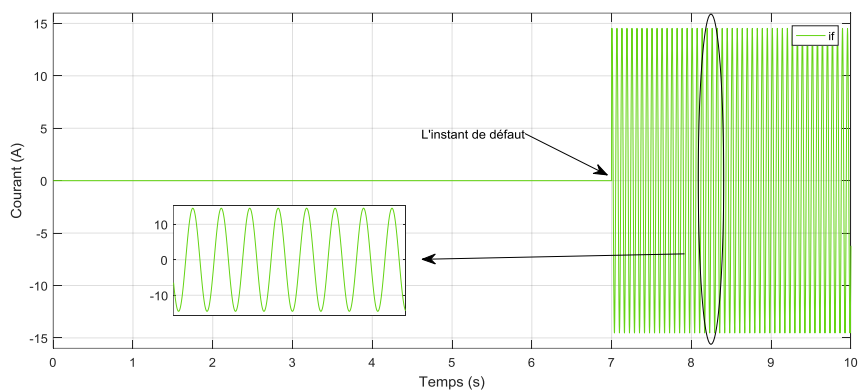
Les résultats en boucle ouverte démontrent le comportement de base du système. Cependant, le contrôleur agira pour ajuster les courants, ce qui à son tour affectera le comportement de défaut de la machine. Dans cette section, le comportement en court-circuit de la machine avec un défaut de CC entre spire est étudié lorsque les courants de phase sont régulés. Ainsi, nous avons étudié le courant statorique, le courant court-circuit et également les tensions de référence.

#### III.5.1. Résultats de simulation

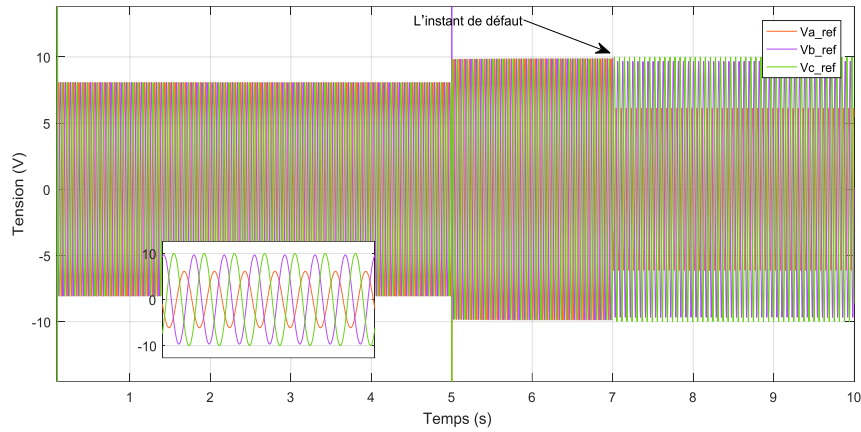
Le modèle de la machine avec un court-circuit développé précédemment est utilisé pour l'analyse en boucle fermée. Une commande simplifiée est alors mise en place pour réguler les courants triphasés, en utilisant des correcteurs  $PI$ . La résistance de défaut utilisé est  $r_f = 0.1\Omega$  et la gravité de défaut était  $\sigma=0.5$ , un couple de charge  $C_r=5Nm$  est également appliqué à  $t=5sec$ .



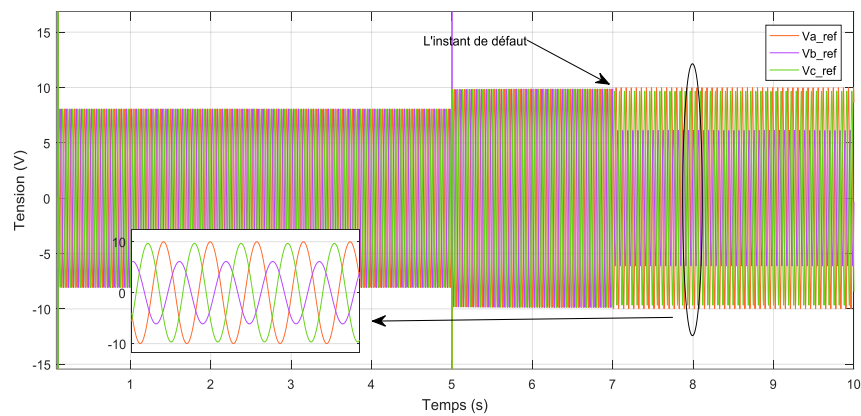
**Figure.III 33.** Evolutions des courants  $I_{abc}$  (Cas de défaut à la phase a ,b et c ).



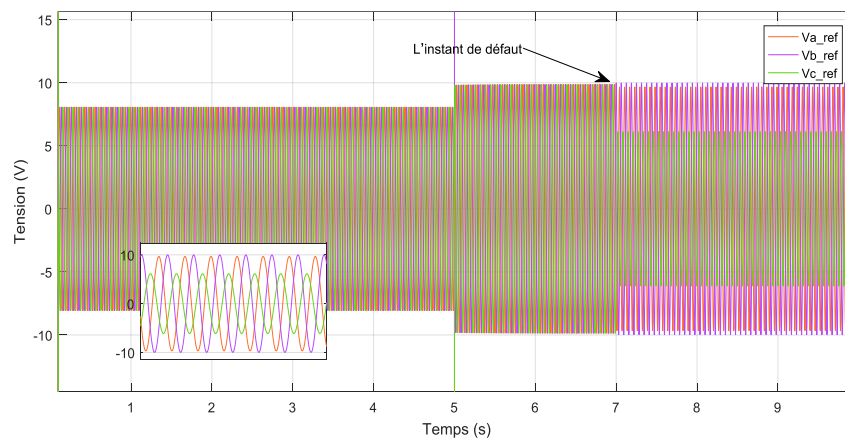
**Figure.III 34.** Evolutions des courants  $I_c$  (Cas de défaut à la phase a ,b et c ).



**Figure.III 35.** Evolutions des tensions  $V_{abc}$  (cas de défaut à la phase a).



**Figure.III 36.** Evolutions des tensions  $V_{abc}$  (cas de défaut à la phase b).



**Figure.III 37.** Evolutions des tensions  $V_{abc}$  (cas de défaut à la phase a).

Lors de l'observation des courbes de courant statorique, nous avons remarqué que les courants restaient équilibrés même après l'apparition d'un court-circuit entre spires dans la phase A, Cependant, nous avons remarqué un déséquilibre dans les tensions de référence après l'apparition du défaut. En effet, la tension a diminué pour la phase dans laquelle le court-circuit s'est produit, et cette variation est



liée à la gravité du défaut et à sa résistance. Plus le défaut est important, plus le changement dans la tension est significatif. Ce comportement est dû au contrôleur, qui maintient des courants équilibrés en compensant les déséquilibres causés par le défaut à l'aide des tensions de référence. Le contrôleur agit en ajustant les tensions dans les différentes phases pour maintenir les courants équilibrés malgré le court-circuit.

Sur la base de cette analyse des résultats, il est possible d'utiliser les tensions de référence comme données d'apprentissage. Étant donné que les courants triphasés sont maintenus équilibrés grâce à l'effet du contrôleur, les variations observées dans les tensions de référence peuvent fournir des informations précieuses pour la détection et la localisation des défauts dans le système.

### **III.5.2 Démarche de diagnostic en utilisant les modèles intelligents développés**

Les modèles intelligents que nous avons développés au début du chapitre peuvent être utilisés pour prédire l'emplacement, la gravité et la résistance d'un défaut. Cependant, au lieu d'utiliser les courants du stator, nous utilisons les tensions de référence comme données d'entrée. Ensuite, nous appliquons ces nouvelles données aux modèles afin de prédire les caractéristiques du défaut.

En raison des contraintes de temps allouées à ce mémoire, nous ne pouvons pas présenter de résultats dans cette partie. Cependant, nous recommandons au lecteur de suivre les mêmes étapes décrites au début du chapitre, notamment l'extraction des indicateurs pertinents et la préparation des données pour les modèles de diagnostic. En suivant ces étapes, il est possible d'obtenir des résultats de diagnostic en utilisant les modèles intelligents développés.

### **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons proposé un diagnostic des défauts du moteur MSAP, en particulier le court-circuit entre spire. Nous avons examiné les méthodes de diagnostic classiques qui se basent sur l'analyse des harmoniques et des composantes symétriques, car elles sont considérées comme des indicateurs révélateurs de ce dysfonctionnement. Par la suite, nous avons exploré les méthodes de diagnostic intelligent qui tirent parti de l'apprentissage automatique. Nous avons utilisé la méthode des réseaux de neurones ainsi que la méthode de classification logistique multiple, en utilisant les indicateurs issus des méthodes classiques comme données d'entrée pour l'apprentissage. À la suite des résultats obtenus, nous avons conclu que la méthode des réseaux de neurones est plus précise que la seconde méthode en termes de détection de l'emplacement, la gravité, et résistance des défauts. Ensuite, nous avons validé ces modèles avec les données d'un générateur synchrone GSAP dans lequel un court-circuit s'est produit en phase a, où nous avons obtenu des résultats positifs cohérents avec les données. Enfin, nous avons étudié l'effet de la commande dans un moteur après l'apparition de défauts, où nous avons conclu que la commande corrige le courant statorique en ajustant les tensions de référence.

# **Conclusion générale**

# Conclusion générale

L'étude présentée dans ce mémoire s'est concentrée sur les machines synchrones à aimants permanents (*MSAP*). L'étude de l'état de l'art de la surveillance des machines électriques a révélé que le court-circuit entre les spires statoriques est le défaut le plus préjudiciable pour les *MSAP*. De plus, il a été observé que les méthodes de surveillance actuellement utilisées pour les *MSAP* nécessitent une modélisation précise et efficace des défauts. C'est pourquoi ce mémoire s'est principalement intéressé à cette étape cruciale du processus de surveillance et de la commande des *MSAP*. En ce qui concerne le court-circuit entre les spires dans les *MSAP*, un modèle dynamique a été développé. Une caractéristique importante de ce modèle est la décomposition de l'équation de la machine en deux parties : les équations de la machine en bon état et celles qui apparaissent en présence du défaut. Cette décomposition facilite la compréhension des effets induits sur les grandeurs électromagnétiques et mécaniques (courant, tension, couple, vitesse, etc.) lorsque le défaut est présent. Les résultats de simulations montrent que le court-circuit entre les spires produit, ainsi qu'une harmonique d'ordre 3 dans les courants statoriques. Ainsi que des oscillations à double fréquence au niveau du couple et de la vitesse.

Après avoir identifié les caractéristiques des défauts entre les spires lors de l'étape de modélisation, nous avons abordé le diagnostic de ces défauts dans le troisième chapitre. Nous avons utilisé à la fois des méthodes classiques et des méthodes intelligentes. Les méthodes classiques se basent sur l'analyse des composantes négatives et des harmoniques, tandis que les méthodes intelligentes font appel à des techniques telles que les réseaux de neurones artificiels (*ANN*) et la régression logistique (*RLG*). Ces deux approches sont complémentaires et permettent d'améliorer la fiabilité et la durée de vie des machines électriques. L'intelligence artificielle offre des avantages significatifs en termes de rapidité et de précision. Toutefois, il est essentiel de comprendre comment ces deux approches peuvent être utilisées de manière complémentaire afin d'améliorer la maintenance des machines électriques.

Nous avons également conclu que lorsqu'un court-circuit est détecté, le contrôle vectoriel peut ajuster la tension de référence pour réduire le courant dans le circuit affecté. L'objectif est de limiter le courant traversant un court-circuit pour éviter d'autres dommages

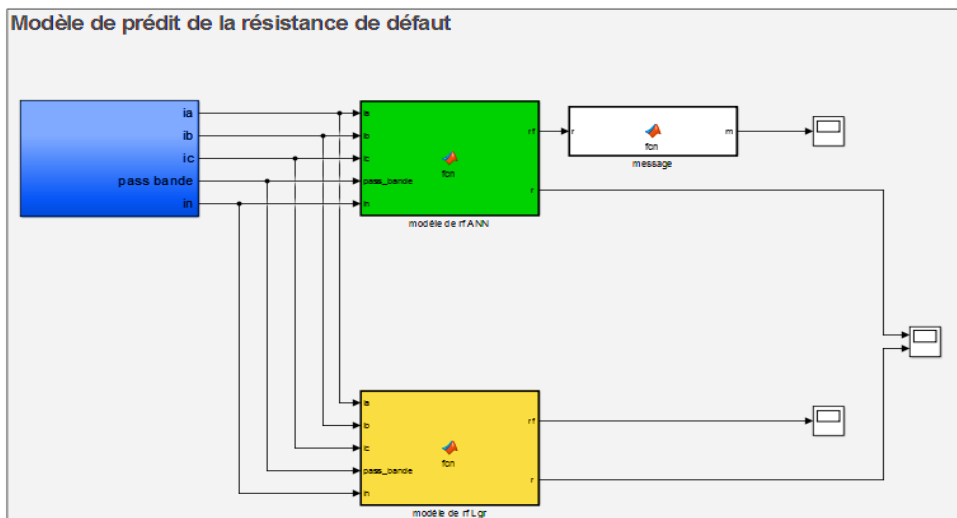
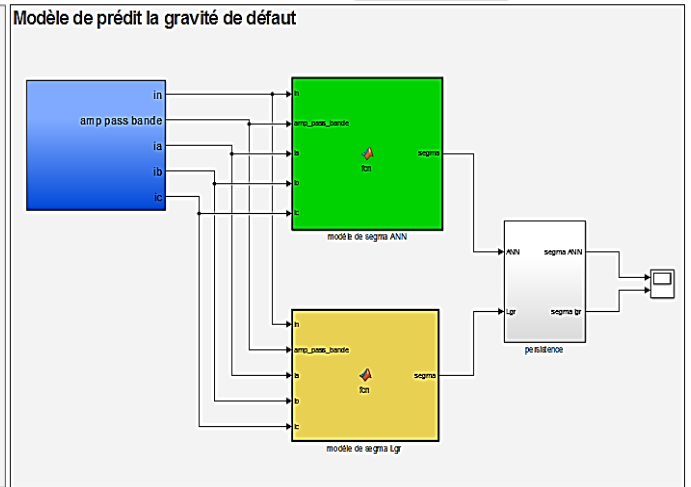
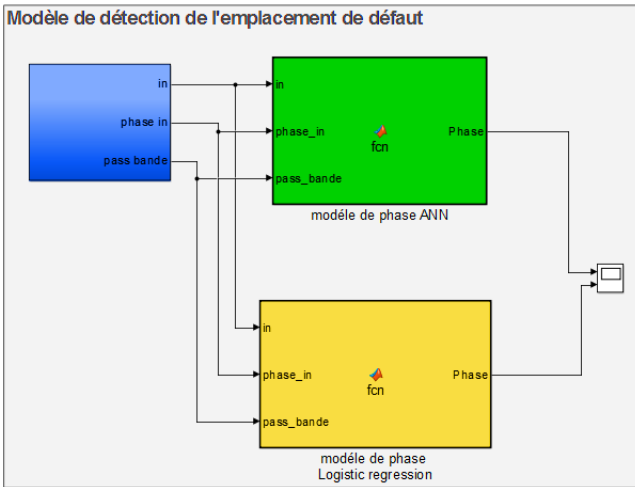
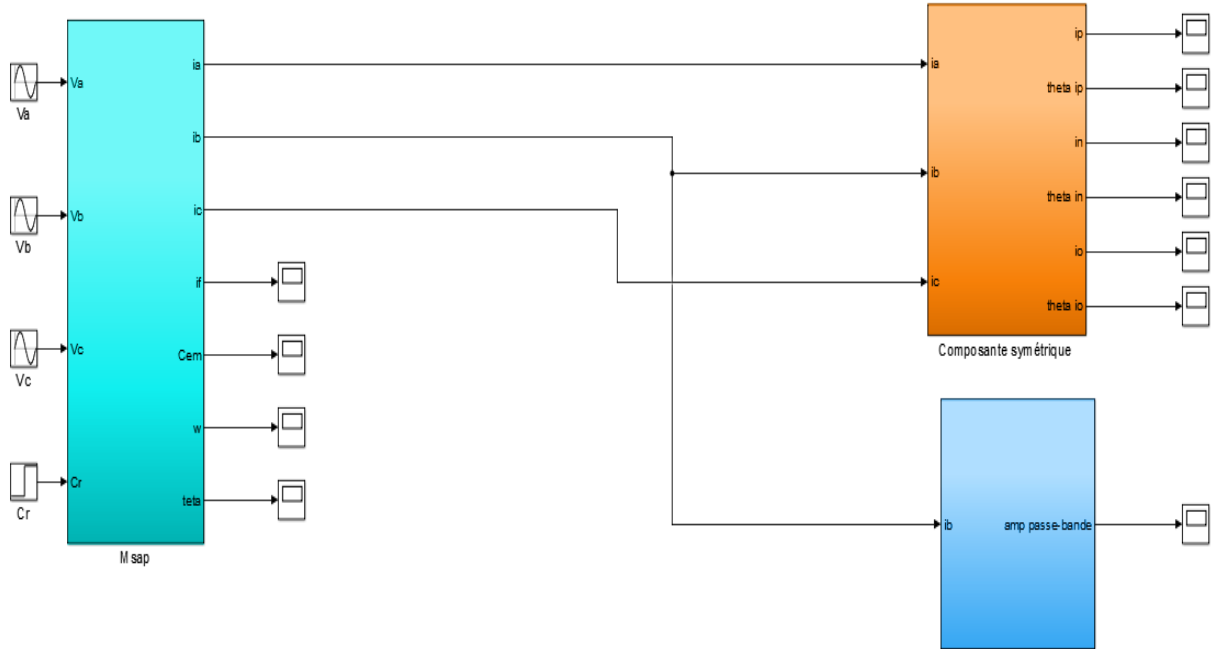
# Annexe A

## Caractéristiques du moteur synchrone à aimant étudié

Paramètres	Valeurs
Fréquence	66.67 Hz
Tension	50V
Nombre de pair de pole	4
Résistance	0.44 $\Omega$
Inductance Mutuelle	-0.28mH
Couple nominal	5 Nm
Inductance propre	2.82mh
Frottement visqueux	0.0014
Moment d'inertie	0.0032
Flux magnétique	0.12
Vitesse nominal	1000tr/min
$M_{bob}$	-0.05 mH
$L_{bob}$	0.85

# Annexe B

## Bloc de Simulation



## Bibliographie

- [01] **KHOV, Makara.** Surveillance et diagnostic des machines synchrones à aimants permanents: Détection des courts-circuits par suivi paramétrique. 2009. Thèse de doctorat.
- [02] <http://www.etasc.fr/index.php?page/cours/typesRotor/machineSynchrone> (01/03/2023,19:59)
- [03] **FAROOQ, Jawad Ahmed.** Etude du problème inverse en électromagnétisme en vue de la localisation des défauts de désaimantation dans les actionneurs à aimants permanents. 2008. Thèse de doctorat. Éditeur inconnu
- [04] **KOBBI, Abdellatif et DEKKICHE, Mounir.** Etude comparative entre la commande vectorielle et la commande non linéaire. Thèse de doctorat.
- [05] **VASEGHI, Babak.** CONTRIBUTION A L'ETUDE DES MACHINES ELECTRIQUES EN PRESENCE DE DEFAUT ENTRE-SPIRES Modélisation–Réduction du courant de défaut. 2009. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine-INPL.
- [06] **AMAR, BECHKAOUI.** Diagnostic des défauts dans les machines synchrones à vitesse variable. 2016. Thèse de doctorat.
- [07] **ANDRIAMALALA, Rijaniaina Njakasoa, RAZIK, Hubert, BAGHLI, Lotfi, et al.** Eccentricity fault diagnosis of a dual-stator winding induction machine drive considering the slotting effects. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, vol. 55, no 12, p. 4238-4251.
- [08] **BONNETT, Austin H. et SOUKUP, George C.** Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors. IEEE Transactions on Industry applications, 1992, vol. 28, no 4, p. 921-937.
- [09] **ALAMEH, Kawthar.** Contribution au diagnostic et à l'analyse de défauts d'une machine synchrone à aimants permanents. 2017. Thèse de doctorat. Normandie.
- [10] **M'HAMED, Lamari.** Modélisation et détection de défauts de courts-circuits statotriques dans une machine synchrone à aimants permanents. 2018. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri.
- [11] **Souad LARIBI SAADI**'' Diagnostic des Défaillances des Systèmes de Commande'' Cours master commande électrique.
- [12] **TRIGEASSOU, Jean-Claude.** Diagnostic des machines électriques. Lavoisier, 2011.
- [13] **LENNARTSSON, Alexander et BLOMBERG, Martina.** Fault Detection in Permanent Magnet Synchronous Motors using Machine Learning. 2021.
- [14] **PILLAY, Pragasen et KRISHNAN, Ramu.** Modeling, simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives. I. The permanent-magnet synchronous motor drive. IEEE Transactions on industry applications, 1989, vol. 25, no 2, p. 265-273.
- [15] **AHMED TAHRI.** ''Contribution à l'identification et à la commande robuste des génératrices synchrones à aimants permanents associées aux générateurs éoliens''. 2018. Thèse de doctorat. Université Ibn Khaldoun-Tiaret-.

- [16] **BOUZID, Monia Ben Khader et CHAMPENOIS, Gérard.** An efficient simplified physical faulty model of a permanent magnet synchronous generator dedicated to stator fault diagnosis part II: Automatic stator fault diagnosis. *IEEE transactions on industry applications*, 2017, vol. 53, no 3, p. 2762-2771.
- [17] **AMMAR, Medoued.** Surveillance et diagnostic des défauts des machines électriques: applications aux moteurs asynchrones. 2012. Thèse de doctorat. thèse de doctorat, Université du 20 Août 1955-Skikda.
- [18] **LUCKERT, Michael et SCHAEFER-KEHNERT, Moritz.** Using machine learning methods for evaluating the quality of technical documents. 2016.
- [19] **LALOË, Thomas.** Sur quelques problèmes d'apprentissage supervisé et non supervisé. 2009. Thèse de doctorat. Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc.
- [20] **MENARD, Scott.** *Applied Logistic Regression Analysis Sage Publications. Thousand Oaks, California, 2002*
- [21] **HOSMER, David W., LEMESHOW, Stanley, et LEMESHOW, Stanley.** *Applied Logistic Regression: Wiley Series in Probability and Statistics: Texts and References Section. 2000.*
- [22] **ZAFARANI, Mohsen, BOSTANCI, Emine, QI, Yuan, et al.** ‘‘ Interturn short-circuit faults in permanent magnet synchronous machines: An extended review and comprehensive analysis’’. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2018, vol. 6, no 4, p. 2173-2191.
- [23] **Hassaine, Said.** Application des nouvelles techniques de commande de la machine synchrone à aimants permanents. Thèse préparée au Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de l'ESIP. France, 08 Mars, 2008.
- [24] **CHOUROUK, BOUHAREB.** Modélisation, Commande & Diagnostic des Machines Synchrones à Aimants. Doctorat thesis (2019), Université de Batna 2. 2019.