

*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 GENIE ELECTRIQUE*



# *MEMOIRE DE FIN D'ETUDES*

*Pour l'obtention du diplôme de Master*

*Domaine : Sciences et Technologie*

*Filière : Automatique*

*Spécialité : Automatique et Informatique Industrielle*

## *Discernement entre les défauts de moteur synchrone a aimant permanent*

***Préparé par :***

- *MAAMAR NESRINE*
- *DJELIL FERAL*

***Devant le Jury :***

<b><i>Nom et prénom</i></b>	<b><i>Grade</i></b>	<b><i>Qualité</i></b>
<i>Othmani Radouane</i>	<i>MAA</i>	<i>Président</i>
<i>Belabbas Belkacem</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>
<i>Becheikh Mustafa</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>
<i>Koura Mohamed Boudiaf</i>	<i>MA</i>	<i>Encadrant</i>

**PROMOTION 2024/2025**

# *Remerciements*

*Avant tout, nous rendons grâce à Allah Tout-Puissant, Le Clément, Le Miséricordieux, pour nous avoir accordé la santé, la patience, la persévérance et la force nécessaires pour mener à bien ce travail. C'est grâce à Sa volonté et à Sa guidance que nous avons pu franchir chaque étape de ce parcours.*

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadrant Mr. KOURA MOHAMED BOUDIAF, pour sa disponibilité, ses conseils précieux, sa rigueur scientifique et son accompagnement tout au long de ce projet. Son encadrement a été d'un grand soutien, tant sur le plan académique que personnel.*

*Nos remerciements les plus sincères vont également à nos familles, en particulier à nos parents, pour leur amour inconditionnel, leurs encouragements constants et leurs prières, qui ont toujours été une source de motivation et de réconfort pour nous.*

*Nous remercions également l'ensemble de l'équipe pédagogique et administrative de IBN KHALDOUN, ainsi que tous les enseignants et membres du laboratoire/de l'équipe de recherche, pour la qualité de la formation qu'ils nous ont dispensée et pour leur soutien durant ces années universitaires.*

*Enfin, nous n'oublions pas nos collègues et amis, pour les moments de partage, d'entraide et d'amitié qui ont enrichi cette belle aventure académique.*

# *dedicade*

*À mes chers parents,  
Source de vie, d'amour et d'affection*

*À mes frères, mes sœurs  
Vous êtes ma force, mon appui et mon inspiration au quotidien. Merci pour votre  
soutien indéfectible.*

*À ma binôme Djelil Ferial,  
Merci pour ta collaboration, ta bonne humeur, ta compréhension et ton sérieux  
tout au long de ce travail. Ta présence a rendu cette expérience plus riche et  
inoubliable.*

*À tous mes amis,  
Pour leur présence, leur encouragement et les moments de partage qui ont enrichi  
ce parcours.*

*MAAMAR NESRINE*

## *dedicade*

*À mes chers parents,  
Source de vie, d'amour et d'affection*

*À mes frères et mes tantes maternelles,  
Vous êtes ma force, mon appui et mon inspiration au quotidien. Merci pour votre  
soutien indéfectible.*

*À ma binôme, MAAMAR NESRINE,  
Merci pour ta collaboration, ta bonne humeur, ta compréhension et ton sérieux  
tout au long de ce travail. Ta présence a rendu cette expérience plus riche et  
inoubliable.*

*À tous mes amis,  
Pour leur présence, leur encouragement et les moments de partage qui ont enrichi  
ce parcours.*

*DJEIL FERIAL*

# *Résumé*

Les entraînements électriques jouent un rôle important dans l'industrie en raison de leurs nombreux avantages. Cependant, ces systèmes et plus particulièrement les moteurs synchrones à aimants permanents MSAP sont soumis pendant leurs fonctionnements à plusieurs contraintes provoquant différents types de défauts dans différentes parties de ces moteurs. Pour cela, un diagnostic précoce des défauts est indispensable afin d'éviter des pertes financières énormes.

Ce projet s'inscrit dans le cadre de diagnostic et séparation entre les défauts produisant les mêmes signatures fréquentielles dans le spectre du courant statorique du MSAP. A cet effet, La première partie de cette mémoire s'intéresse au diagnostic des différents défauts qui peuvent affecter les MSAP. La deuxième partie de cette mémoire consiste à élaborer une approche pour discerner entre les signatures de défaut de désaimantation et le défaut d'excentricité. Enfin, la dernière partie de cette mémoire est consacrée à la validation expérimentale des différents résultats obtenus par simulation, en utilisant le courant de ligne en tant que grandeurs d'analyse.

**Mots clés** - MSAP ; Diagnostic ; Courant Statorique ; Analyse Spectrale ; Séparation ; Composante Réelle ; Composante Imaginaire ; Défauts.

# *Abstract*

Electric drives play an important role in industry due to their numerous advantages. However, these systems, and more specifically permanent magnet synchronous motors (PMSMs), are subject to several stresses during operation, causing various types of faults in different parts of these motors. Therefore, early fault diagnosis is essential to avoid enormous financial losses.

This project is part of the diagnostic and separation framework for faults producing the same frequency signatures in the PMSM stator current spectrum. To this end, the first part of this thesis focuses on the diagnosis of the various faults that can affect PMSMs. The second part of this thesis involves developing an approach to distinguish between demagnetization fault signatures and eccentricity faults. Finally, the last part of this thesis is devoted to the experimental validation of the various results obtained by simulation, using the line current as the analysis parameter.

**Keywords** - PMSM; Diagnostics; Stator Current; Spectral Analysis; Separation; Real Component; Imaginary Component; Defects.

## المخلص

تلعب المحركات الكهربائية دورًا مهمًا في الصناعة نظرًا لمزاياها العديدة. ومع ذلك، فإن هذه الأنظمة، وبشكل أكثر تحديدًا المحركات المتزامنة ذات المغناطيس الدائم (PMSMs)، تخضع لضغوط متعددة أثناء التشغيل، مما يتسبب في أنواع مختلفة من الأعطال في أجزاء مختلفة من هذه المحركات. لذلك، فإن التشخيص المبكر للأعطال ضروري لتجنب الخسائر المالية الهائلة. يُعد هذا المشروع جزءًا من إطار التشخيص والفصل بين الأعطال التي تنتج نفس التوقعات الترددية في طيف تيار الجزء الثابت لمحركات PMSM. ولتحقيق هذه الغاية، يركز الجزء الأول من هذه الرسالة على تشخيص الأعطال المختلفة التي يمكن أن تؤثر على محركات PMSM. ويتضمن الجزء الثاني من هذه الرسالة تطوير نهج للتمييز بين توقعات خطأ إزالة المغناطيسية وأعطال الانحراف. وأخيرًا، يُخصص الجزء الأخير من هذه الرسالة للتحقق التجريبي من صحة النتائج المختلفة التي تم الحصول عليها من خلال المحاكاة، باستخدام تيار الخط كعامل تحليل.

**الكلمات المفتاحية** – المحركات المتزامنة ذات المغناطيس الدائم، التيار الكهربائي، التحليل الطيفي، الأعطاب، الفصل بين الأعطاب والظواهر، الجزء الحقيقي، الجزء التخيلي

# Sommaire

<i>Introduction générale</i> .....	1
<i>Chapitre I : Diagnostic Des Moteurs Electriques</i> .....	4
<b>I.1 Introduction</b> .....	3
<b>I.2 Terminologie du diagnostic et de la maintenance</b> .....	3
<b>I.2.1 Terminologie dédiée au diagnostic</b> .....	3
<b>I.2.2 Maintenance</b> .....	5
<b>A. Maintenance preventive systématique</b> .....	7
<b>B. Maintenance préventive conditionnelle</b> .....	8
<b>I.3 Moteur Synchrone A Aimant Permanents</b> .....	10
<b>I.4 Contraintes affectant les machines électriques</b> .....	19
<b>I.4.1 Contraintes mécaniques</b> .....	19
<b>I.4.2 Contraintes électriques</b> .....	19
<b>I.4.3 Contraintes thermiques</b> .....	20
<b>I.4.4 Contraintes environnementales</b> .....	20
<b>I.4.5 Contraintes magnétiques</b> .....	20
<b>I.4.6 Contraintes résiduelles dues aux problèmes de construction</b> .....	20
<b>I.5 Etude statistique sur les défauts des machines électriques</b> .....	21
<b>I.6 Défauts affectant les moteurs synchrones à aimants permanents</b> .....	22
<b>I.6.1 Défauts du stator</b> .....	22
<b>I.6.2 Défauts du rotor</b> .....	24
<b>I.7 Techniques de diagnostic des MSAP</b> .....	26
<b>I.7.1 Courant statorique</b> .....	27
<b>I.7.4 Flux magnétique</b> .....	29
<b>I.7.5 Couple électromagnétique / Vitesse de rotation</b> .....	30
<b>I.8 Conclusion</b> .....	30
<i>Chapitre II : Les Méthodes De Diagnostic Des MSAP</i> .....	31
<b>II.1 Introduction</b> .....	31
<b>II.2.1 Approches à base de modèle</b> .....	31
<b>II.2.2 Approche sans modèle</b> .....	34
<b>II.3 Identification des défauts par la DSP</b> .....	36
<b>II.3.1 Principe d'estimation de la DSP</b> .....	36

<b>II.4.1 Séparation entre le défaut d'excentricité et le défaut de désaimantation .....</b>	<b>38</b>
<b>II.5 Conclusion .....</b>	<b>41</b>
<b>Chapitre III : Résultats de Simulation et Validation Expérimentale.....</b>	<b>42</b>
<b>III.1 Introduction .....</b>	<b>43</b>
<b>III.2 Description de bancs d'essai .....</b>	<b>43</b>
<b>III.2.1 Création et signatures des défauts étudiés .....</b>	<b>44</b>
<b>III.3 Validation de l'approche proposée à travers des signaux de simulation .....</b>	<b>46</b>
a. <b>Analyse des courants statoriques par la DSP classique .....</b>	<b>46</b>
b. <b>Séparation entre les défauts de désaimantation et d'excentricité par l'utilisation de l'approche proposée .....</b>	<b>48</b>
<b>III.4 Validation de l'approche proposée à travers des signaux expérimentaux .....</b>	<b>50</b>
a) <b>Analyse des courants statoriques par la DSP classique .....</b>	<b>50</b>
b) <b>Séparation entre les défauts de désaimantation et d'excentricité par l'utilisation de l'approche propose.....</b>	<b>51</b>
<b>III.5 Conclusion .....</b>	<b>54</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>55</b>

---

## Liste des figures

---

### Chapitre I

Figure I-1 Classification des divers types de maintenances .....	6
Figure I-2 Courbe B(H) d'un matériau magnétique typique - Cycle d'hystérésis.....	11
Figure I-3 Courbe de désaimantation des principaux types d'aimants .....	13
Figure I- 4 Représentation de la MSAP.....	14
Figure I-5 Familles de bobinage : Distibué (a) et Concentré.....	15
Figure I-6 Les différents rotors à aimant permanents .....	17
Figure I-7 Répartition statistique des défauts dans les moteurs électriques .....	21
Figure I-8 Différents types de défauts statoriques .....	23
Figure I-9 Positions du rotor et du stator dans une machine idéale .....	25
Figure I-10 Différents types d'excentricité dans la machine .....	26
Figure I-11 La technique du courant statorique : (a) capture d courant / (b) spectre de signal statorique pour le cas sain et le cas d'un défaut .....	27
Figure I-12 La technique de vibration .....	28
Figure I- 13 La technique du flux magnétique : (a) Bobines de mesure de flux magnétique /(b) spectre de flux magnétique pour le cas sain et le court-circuit .....	29
Figure I-14 La technique du couple électromagnétique : (a) Couplemètre / (b) Spectre de couple électromagnétique pour le cas sain et le cas d'un défaut.....	30

### Chapitre II

Figure II-1 Schéma de principe de l'approch à base d'observateur .....	32
Figure II-2 principe du diagnostic par projection dans l'espace de parité .....	33
Figure II-3 Principe du diagnostic avec estimation paramétrique.....	33
Figure II-4 Spectre du courant statorique de la MSAP .....	37
Figure II-5 Spectres du courant statorique de la phase "a", obtenu par la DSP classique associé à l'algorithme ALM sur la bande fréquentielle .....	37
Figure II -6 Organigramme de l'approche proposée.....	38
Figure II-7 Courant statorique de la phase "a" , pour les différent modes de fonctionnement , (a) avant (b) après du prétraitement.....	39

### Chapitre III

<i>Figure III-1 Schéma synoptique du banc d'essai réalisé - MSAP.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure III-2 Procédure de création du défaut d'excentricité .....</i>	<i>44</i>
<i>Figure III-3 Procédure de création du défaut de désaimantation .....</i>	<i>45</i>
<i>Figure III-4 Fonctionnement du moteur sain : spectres du courant de la phase "a" .....</i>	<i>46</i>
<i>Figure III -5 Spectres du courant statorique de la phase "a" : (a) pour une désaimantation de 10 % / (b) pour une excentricité de 10%.....</i>	<i>47</i>
<i>Figure III-6 Spectres des composantes réelles de la TF du courant statorique : pour une désaimantation de 10% (a) et de 20% (b).....</i>	<i>48</i>
<i>Figure III-7 Spectres des composantes imaginaires de la TF du courant statorique : pour une désaimantation de 10% (a) et de 20 % (b).....</i>	<i>48</i>
<i>Figure III-8 Spectres des composantes réelles de la TF du courant statorique pour excentricité de 10 % (a) et de 20 % (b) .....</i>	<i>49</i>
<i>Figure III-9 Spectres des composantes imaginaires de la TF du courant statorique pour une excentricité de 10 % (a) et de 20% (b).....</i>	<i>49</i>
<i>Figure III-10 Fonctionnement du moteur sain spectres du courant statorique obtenu par la DSP classique associé à l'algorithme ALM.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure III-11 Spectres du courant statorique obtenu par l'estimation de la DSP classique associé à l'algorithme ALM : (a) pour une désaimantation de 25%/ (b) pour une excentricité de 20% ..</i>	<i>51</i>
<i>Figure III-12 Spectres des composantes réelles de la TF du courant statorique de la phase "a" : pour une désaimantation de 12,5% (a) et de 25%(b) .....</i>	<i>52</i>
<i>Figure III-13 Spectres des composantes imaginaires de la TF du courant statorique de la phase "a" pour une désaimantation de 12,( a) et de 25%(b) .....</i>	<i>52</i>
<i>Figure III-14 Spectres des composantes réelles de la TF du courant statorique de la phase "a" pour une excentricité de 10% (a) et de 20%(b) .....</i>	<i>53</i>
<i>Figure III-15 Spectres des composantes imaginaires de la TF du courant statorique de la phase "a" pour une excentricité de 10%(a) et de 20%(b) .....</i>	<i>53</i>

---

*Liste des tableaux*

---

<i>Table I- 1 avantage et inconvenients de chaque types de maintenance.....</i>	<i>09</i>
<i>Table I- 2 Avantage et inconvenients des structures des rotors utilisées dans les MSAP .....</i>	<i>18</i>
<i>Table III- 1 Signatures fréquentielles des défauts étudiés .....</i>	<i>45</i>
<i>Table III- 2 Signes des tracées réelles et imaginaires dans les différents cas de fonctionnement</i>	<i>50</i>
<i>Table III- 3 signes des tracées réelles et imaginaires dans les différents cas de fonctionnement</i>	<i>53</i>

---

*Liste des Symboles et abréviations*

---

**Abréviation**

Abréviation	Signification
IFAC	International Federation of Automatic Control
AFNOR	Association française de normalization
FDI	Fault Detection and Isolation
MTBF	Moyenne temps de bon fonctionnement
MTTR	Moyenne des temps techniques de réparation
MSAP	Moteur synchrone à aimants permanents
Sm-Co	Samarium-Cobalt
Nd-Fe-B	Néodyme-fer-Bore
AlNiCo	Alliage Aluminium Nickel Cobalt
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
EPRI	Electric Power Research Institute
MCSA	Motor current signature analysis
DSP	Densité Spectrale de Puissance
FFT	Fast Fourier Transform
MUSIC	Multiple Signal Classification
STFT	Transformée de Fourier à Court Terme
EMD	Décomposition en mode empirique
MST	Moyenne Synchrone Temporelle
ALM	Algorithme de la Moyenne Locale

## Symboles

$B$	: Induction Magnétique
$H$	: Champ magnétique
$B_r$	: Induction rémanente
$H_c$	: Champ coercitif
$f_s$	: Fréquence d'alimentation
$f_{exc}$	: Signature du default d'excentricité
$f_{brb}$	: Fréquences générées par un défaut de barres
$f_{cc}$	: Fréquence générée par un défaut de court-circuit
$P$	: Nombre de paires de pôles
$g$	: Glissement
$\Delta_f$	: Résolution fréquentielle
$f_e$	: Fréquence d'échantillonnage
$N_e$	: Nombre d'échantillons
$T_{acq}$	: Temps d'acquisition.
$i(n)$	: Courant statorique numérisé
$i_T(n)$	: Courant statorique numérisé tronqué
$\Pi(n)$	: Fonction rectangulaire
$i_\omega(n)$	: Signal pondéré
$x(t)$	: Signal analogique

# *Introduction générale*

## Introduction générale

Dans nos jours, l'industrie recommande fortement les moteurs synchrones à aimants permanents. Ils sont largement utilisés dans de nombreux secteurs nécessitant des performances élevées comme la robotique, la production d'énergies renouvelables, l'aérospatiale, et divers équipements médicaux, ainsi que les véhicules électriques et hybrides. Ces moteurs sont prisés pour leur efficacité supérieure, leur densité de puissance et leur couple volumique élevé, ainsi que pour leur fiabilité. De plus, ils occupent moins d'espace comparativement aux moteurs à courant continu grâce à l'élimination de la source d'excitation. Leur conception est également simplifiée car ils ne possèdent pas de collecteur mécanique qui pourrait engendrer des problèmes majeurs tels que des limitations de puissance, l'usure des balais et des pertes rotoriques. Ainsi, cela prolonge leur longévité tout en minimisant le besoin d'entretien constant. Son choix devient séduisant et compétitive par rapport aux moteurs asynchrones. Par le biais de l'avancement des aimants permanents.

Dans divers secteurs industriels, garantir la fiabilité opérationnelle est la sûreté fonctionnelle est un enjeu majeur pour maintenir une compétitivité maximale de l'équipement de production. Le diagnostic des défauts dans les systèmes industriels représente un des moyens d'améliorer la productivité. Son rôle principal est de détecter et localiser un dysfonctionnement ou une anomalie des équipements.

Les défauts des moteurs synchrones à aimants permanents peuvent provenir de problèmes mécaniques (comme l'excentricité ou désaimantation du rotor, les défauts de roulements), électriques (tels que le court-circuit du bobinage statorique ou la rupture de barre ou d'anneau) ou magnétiques (par exemple, un défaut d'isolation entre les tôles statoriques).

Si ces défaillances ne sont pas détectées suffisamment tôt, elles risquent d'entraîner des arrêts non programmés, coûteux et à des dommages aux équipements environnants ou même à des dangers aux personnels. C'est la raison pour laquelle, la détection précoce de ces défauts est devenue un enjeu très important dans les thématiques de recherche actuelles afin de préserver la sécurité des biens et des personnes, de garantir la continuité de service des systèmes électriques et ainsi réduire les coûts de maintenances et les pertes économiques associées aux défaillances et à des temps d'arrêt non planifiés.

Pour le diagnostic des défauts dans les moteurs synchrones à aimants permanents plusieurs travaux de recherche ont été développés. Parmi ces techniques, l'analyse spectral du courant statorique ou MCSA (Motor Current Signature Analysis, en anglais) est la technique la plus prometteuse ces dernières années. Sa particularité réside dans la facilité d'installation des capteurs

# Introduction générale

---

et la richesse du spectre du courant en informations sur la quasi-totalité des défauts qui peuvent affecter les MSAP. Malheureusement, cette technique présente un inconvénient majeur qui consiste à la manifestation des différents défauts par la création des harmoniques aux mêmes fréquences, ce qui rend cette technique inefficace dans ces situations. Parmi eux nous citons : le défaut de désaimantation et le défaut d'excentricité.

Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est discriminé entre les défauts de la machine synchrone à aimants permanents et d'analyser son effet sur les performances de cette machine. Afin d'atteindre notre but, on a structuré ce mémoire en trois chapitres :

Dans **le premier chapitre**, nous abordons tout d'abord quelques notions générales relatives à la sûreté de fonctionnement. Une étude préliminaire sur les moteurs synchrone à aimant permanent en vue de leur surveillance et leur diagnostic sera présentée. Nous évoquerons également la constitution physique de ces moteurs pour mieux comprendre les différents défauts qui peuvent les affecter. Ces différents défauts sont ensuite abordés, ainsi que leurs origines et les risques qu'ils entraînent. La suite du chapitre sera consacrée aux différentes techniques pouvant être utilisées dans le diagnostic de ces défauts.

Dans **le deuxième chapitre**, nous décrivons les méthodes de diagnostic choisies. Après un état de l'art sur les différentes méthodes utilisées pour extraire les informations nécessaires au diagnostic des moteurs électriques, à savoir les approches sans modèle et les approches à base de modèle. Dans la première catégorie des méthodes dite sans modèle, nous étudions, la méthode proposée pour la séparation entre le défaut de désaimantation et le défaut d'excentricité. Cette approche est basée sur le suivi simultané des signes des parties réelle et imaginaire des harmoniques caractéristiques de ces défauts, obtenues à partir de la transformé de Fourier du courant statorique.

**Le troisième chapitre** sera consacré à la résolution des problèmes de séparation entre les défauts et les phénomènes présentant les mêmes signatures fréquentielles dans le spectre du courant statorique du MSAP. Pour cela, plusieurs simulations seront effectuées en utilisant des signaux obtenus à partir d'un modèle mathématique de la MSAP (modèle basé sur une extension en 2D de l'approche de la fonction d'enroulement modifiée), ensuite on le valide expérimentalement les résultats obtenus par voie de simulation.

Enfin, nous terminons cette mémoire par une conclusion générale portant sur les travaux effectués et par une présentation des perspectives de recherche pouvant être envisagées.

**Chapitre I :**  
**Diagnostic Des Moteurs**  
**Electriques**

## I.1 Introduction

Les MSAP tiennent une place importante dans les systèmes industriels, place qui tend à s'amplifier avec l'apparition des nouvelles technologies : traction tout électrique, production décentralisée, nouveaux actionneurs, etc. De plus, ces moteurs ont souvent une place critique dans les applications. Cette criticité génère des contraintes croissantes en termes de sûreté de fonctionnement et de taux de disponibilité, nécessitant une surveillance accrue et donc le développement d'outils de diagnostic de plus en plus performants.

Dans ce chapitre, nous commencerons par une présentation succincte de la terminologie propre au diagnostic ainsi que des différents types de maintenance. Nous proposerons ensuite un aperçu général des MSAP les plus couramment utilisées, en mettant en évidence leurs atouts, leurs diverses applications industrielles et leurs conceptions variées. Nous aborderons ensuite les principales contraintes et les défauts susceptibles d'affecter ces moteurs, avant de présenter les différentes techniques disponibles pour leur diagnostic.

## I.2 Terminologie du diagnostic et de la maintenance

### I.2.1 Terminologie dédiée au diagnostic

Vu la diversité et l'abondance des termes rencontrés dans le domaine de diagnostic des défauts, le comité technique SAFE-PROCESS de l'IFAC (International Federation of Automatic Control) et AFNOR (Association française de normalisation) ont standardisé ces terminologies listées ci-dessous [1], [2]:

- **Défaut** : C'est toute déviation ou tout écart d'au moins une caractéristique observée du système surveillé par rapport à sa caractéristique de référence requise, correspondante l'état de fonctionnement normal et standard. Un défaut ne provoque pas généralement un arrêt complet du système mais peut entraîner une probable défaillance. Un défaut peut être d'origine physique due au dysfonctionnement des matériels, aux erreurs de conception, aux erreurs de conduite et d'utilisation opérationnelle des systèmes ou aux erreurs lors des actions de maintenance. Suite à un défaut, le système est incapable d'accomplir la fonction principale pour laquelle a été conçu. Un défaut ne conduit pas nécessairement une défaillance [1], [3].
- **Défaillance** : c'est l'inaptitude d'un système physique à accomplir sa fonction principale ou une de ses fonctions, une défaillance peut conduire à un défaut. Mais un défaut n'entraîne pas nécessairement une défaillance. Cela signifie que le système

peut toujours accomplir sa fonction principale tant que le défaut n'affecte pas cette tâche. La défaillance peut être partielle si le système conserve la capacité d'accomplir une partie de ses fonctions requises ou lorsqu'il les accomplit de façon limitée, comme elle peut être complète lorsque le système est incapable d'accomplir toutes les fonctions requises [1], [3].

- **Panne** : C'est un état qui se produit lorsque le système cesse d'assurer ses missions Principales de façon permanente ou intermittente. Dans ce cas, le système ou le dispositif est signalé en état de panne. Une panne est toujours le résultat d'une défaillance. Par ailleurs, On peut distinguer entre deux types de pannes : une panne permanente, si elle entraîne l'état de non-fonctionnement du composant ou du dispositif, ce qui nécessite une action de réparation ou de remplacement indispensable, c'est une panne intermittente, qui résulte d'une dégradation partielle et progressive d'un composant du système. Le système peut restaurer son état de fonctionnement normal même après réparation de la panne. Mais, sans réparer le composant dégradé, une panne intermittente peut se transformer en une panne permanente du système.
- **Dégradation** : C'est un processus de diminution progressive des performances d'une entité fonctionnelle d'un dispositif.
- **Perturbation** : C'est toute entrée non contrôlée, issue de l'environnement extérieur, influençant de façon négative sur un système physique.
- **Anomalie** : Caractérise un comportement du système physique, non conforme à une référence.
- **Symptôme**: Représente un signe distinctif permettant de détecter un dysfonctionnement du système surveillé.
- **Résidu** : C'est un signal indicateur de défaut, il représente l'écart entre le fonctionnement réel ou observé du système et le fonctionnement normal ou standard donné par un modèle de référence. Cet indicateur a une moyenne statistiquement égale à zéro en l'absence du défaut et une moyenne différente de zéro en sa présence.
- **Diagnostic** : C'est un processus permettant de détecter l'occurrence d'un défaut à un moment précoce avant qu'il ne conduise à une défaillance, en s'appuyant sur les mesures et les observations effectuées sur le système surveillé. Il inclut aussi l'étape

de localisation et d'identification du défaut. Son acronyme anglais est FDI (Fault Detection and Isolation), la procédure de diagnostic comporte trois étapes essentielles, décrites ci-après [1], [2], [3]:

- Détection du défaut : cette étape permet de discerner tout écart du système par rapport à son état de fonctionnement normal. Autrement dit, elle permet de déterminer la présence de défauts dans un système.
  - Localisation de défaut : consiste à déterminer avec précision le composant ou le sous-système fonctionnel, affecté par le défaut détecté.
  - Identification du défaut : est la dernière étape du processus de diagnostic, elle consiste à déterminer l'amplitude, le type et l'instant d'occurrence du défaut constaté, afin de comprendre au mieux le comportement du système en étude.
- **Surveillance** : permet de garder un œil ouvert sur l'état de fonctionnement d'un système, en s'appuyant sur les données collectées en continu et en temps réel sur celui-ci. Ces données sont traitées et exploitées en vue de détecter les changements de comportement du procédé causés par des défauts ou par des défaillances. Dans ce cas, les agents de maintenance vont intervenir pour pouvoir agir et prendre une décision. En outre, les données sont transférées au module de supervision [3].
  - **Supervision** : La supervision est l'ensemble des outils et méthodes qui permettent de conduire des installations industrielles tant en fonctionnement normal qu'en présence de défaillances ou de perturbations.
  - **Aide à la décision** : Consiste à aider l'opérateur à prendre la bonne décision devant toute situation, et cela en proposant une liste d'actions qui pourrait restaurer les grandeurs optimales du système. Dans cette étape, l'opérateur est toujours maître de la situation, car le système d'aide à la décision n'agit jamais, mais informe et conseille seulement [3].

### **I.2.2 Maintenance**

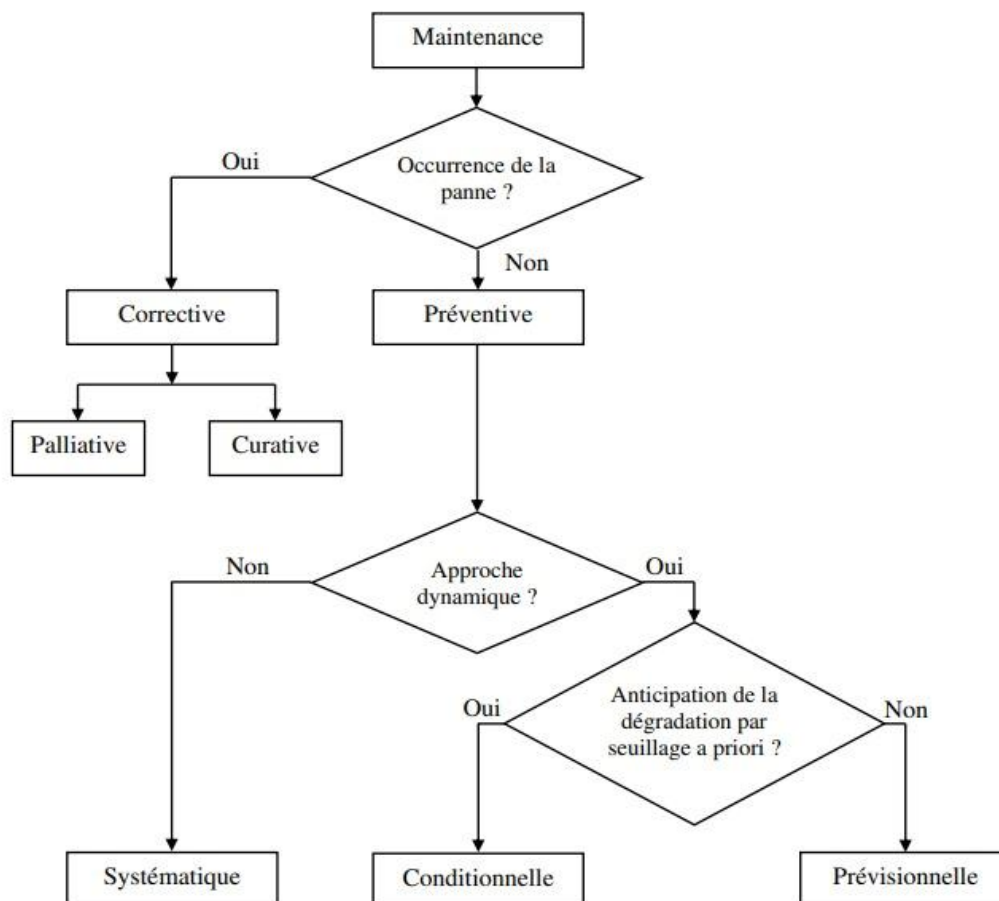
La maintenance est fréquemment une étape distincte après la prise de décision. Cela peut également se référer à l'action de maintenir ou de restaurer les performances des éléments ou du système en totalité pour le remplissage de sa fonction, la surveillance et le diagnostic contribuent à renforcer la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité d'un élément fonctionnel ses diverses notions sont déterminées par [1], [2]:

- **Fiabilité** : l'aptitude d'une entité à accomplir sa tâche nécessaires dans des conditions spécifiques sur une période déterminée.
- **Disponibilité** : l'aptitude d'un système à fonctionner lorsque la sollicite, la disponibilité se calcule par la formule suivante :

$$\text{Disponibilité} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

- **Maintenabilité** : l'aptitude d'un système à être restauré par une maintenance appropriée pour exécuter des fonctions nécessaires dans des conditions spécifiques.

On peut classer les stratégies de maintenance en deux principales catégories : la maintenance corrective et la maintenance préventive.



**Figure I-1** Classification des divers types de maintenances

### **I.2.2.1 Maintenance corrective**

La maintenance corrective ou autrement dit curative, est exécutée après la détection et la localisation d'une défaillance ou d'une panne, La maintenance corrective peut être [3] :

- **Palliative** : des réparations ou des remises en état à caractère provisoire sont effectuées.
- **Curative** : des réparations, des modifications ou des remises en état à caractère permanent sont effectuées.

### **I.2.2.2 Maintenance préventive**

La maintenance préventive réalisée après une surveillance, des caractéristiques du procès de production pour prédire et identifier les défaillances ou les pannes potentielles, la maintenance préventive permet de [3]:

- Prolonger la durée de vie des systèmes.
- Réduire la probabilité de défaillances en service.
- Limiter les temps d'arrêt lors des révisions ou des pannes.
- Anticiper et prévenir les interventions coûteuses de maintenance corrective.
- Éviter les consommations anormales d'énergie, de lubrifiant et de pièces détachées.
- Améliorer les conditions de travail du personnel de production.
- Diminuer le budget alloué à la maintenance.
- Éliminer les causes d'accidents graves.

La maintenance préventive peut être systématique, conditionnelle ou prévisionnelle.

#### **A. Maintenance préventive systématique**

Lorsque la maintenance préventive est effectuée à des intervalles prédéfinis, on parle de maintenance systématique. Cette forme de maintenance s'opère selon un calendrier établi à l'avance, sans qu'aucune intervention ne soit réalisée avant l'échéance prévue. L'optimisation de la maintenance préventive systématique consiste à définir de manière précise la fréquence des opérations d'entretien, en se basant sur divers critères tels que le temps, le nombre de cycles de fonctionnement ou la quantité de pièces produites

La maintenance systématique se traduit par l'exécution sur un équipement, à dates planifiées,

D'interventions dont l'importance peut s'échelonner depuis le simple remplacement de quelques pièces jusqu'à la révision générale [3]:

- Remise à niveau d'une ligne de production par arrêt annuel,
- Révision générale d'un équipement,
- Echange standard d'un sous-ensemble ou d'un composant sensible (filtre, joint, durite, balais d'un moteur CC, etc....),
- Lubrification.

### **B. Maintenance préventive conditionnelle**

Il s'agit d'une maintenance préventive qui repose sur l'observation du fonctionnement du bien et/ou des paramètres pertinents de ce fonctionnement, comprenant les actions qui en résultent. Il est possible d'effectuer la surveillance des opérations et des réglages soit selon un programme établi, soit la demande, ou de manière continue.

Remarque : la maintenance conditionnelle est donc un type de maintenance qui repose sur l'expérience et implique l'utilisation d'informations collectées en temps réel.

Cette opération consiste à surveiller l'évolution de paramètres importants (croissance, érosion, usure, température, pression, vibration, etc.) Pour détecter la dégradation ou la diminution des performances d'une entité. On désigne cela comme une maintenance conditionnelle. Elle n'est planifiée que si la condition (niveau de dégradation) de l'entité atteint un seuil critique donné [4].

### **C. Maintenance préventive prévisionnelle**

C'est la dernière méthode de maintenance préventive utilisée, réalisée en se basant sur les projections extrapolées de l'analyse et de l'évaluation des paramètres significatifs de la dégradation du bien [2]. Plus particulièrement en ce qui concerne la maintenance conditionnelle.

Pour envisager la mise en œuvre d'une telle stratégie de maintenance, il est essentiel de comprendre la technologie et le comportement du dispositif concerné dans ses conditions d'utilisation. Elle se fonde effectivement sur l'examen de la progression des paramètres techniques qui caractérisent l'état du bien et identifient les détériorations possibles dès leur commencement. Elle offre une précision supérieure à la maintenance conditionnelle, permettant de prévoir et d'anticiper de manière optimale le moment où l'intervention devra être effectuée, De plus, il est très important de mettre en évidence les avantages et les

inconvenients de chaque type de maintenance afin de choisir le type de maintenance approprié. Pour cette raison, le Tableau I.1 regroupe les différents avantages et inconvenients de chaque type de maintenance.

<b>Types de maintenance</b>	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<b>Maintenance corrective</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Coût initial faible.</li> <li>-Facilité de mise en œuvre.</li> <li>- Utile pour les équipements non critiques ou peu coûteux.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Coûts élevés en cas d'urgence.</li> <li>- Arrêts imprévus.</li> <li>- Sécurité réduite : Risque accru d'accident si une panne survient brusquement.</li> </ul>
<b>Maintenance préventive systématique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Facile à planifier et à mettre en œuvre</li> <li>- Permet de réduire les pannes soudaines</li> <li>- Adaptée aux équipements simples</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Risque de sur maintenance (remplacement inutile)</li> <li>- Coût élevé à long terme</li> <li>- Ne tient pas compte de l'état réel</li> </ul>
<b>Maintenance préventive conditionnelle</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Basée sur des mesures physiques (température, vibration, courant...)</li> <li>- Meilleur ciblage des interventions</li> <li>- Réduction des pannes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Besoin de capteurs et systèmes de surveillance</li> <li>- Analyse parfois complexe</li> <li>- Coût initial plus élevé</li> </ul>
<b>Maintenance préventive prévisionnelle</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Action Préventive.</li> <li>-Meilleur Sécurité.</li> <li>-Amélioration De La Productivité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-nécessite d'avoir une mesure (vibration, chaleur, particule...)</li> <li>-nécessite de connaître la loi de dégradation</li> </ul>

**Table I.1** Avantage et inconvenients de chaque type de maintenance [5]

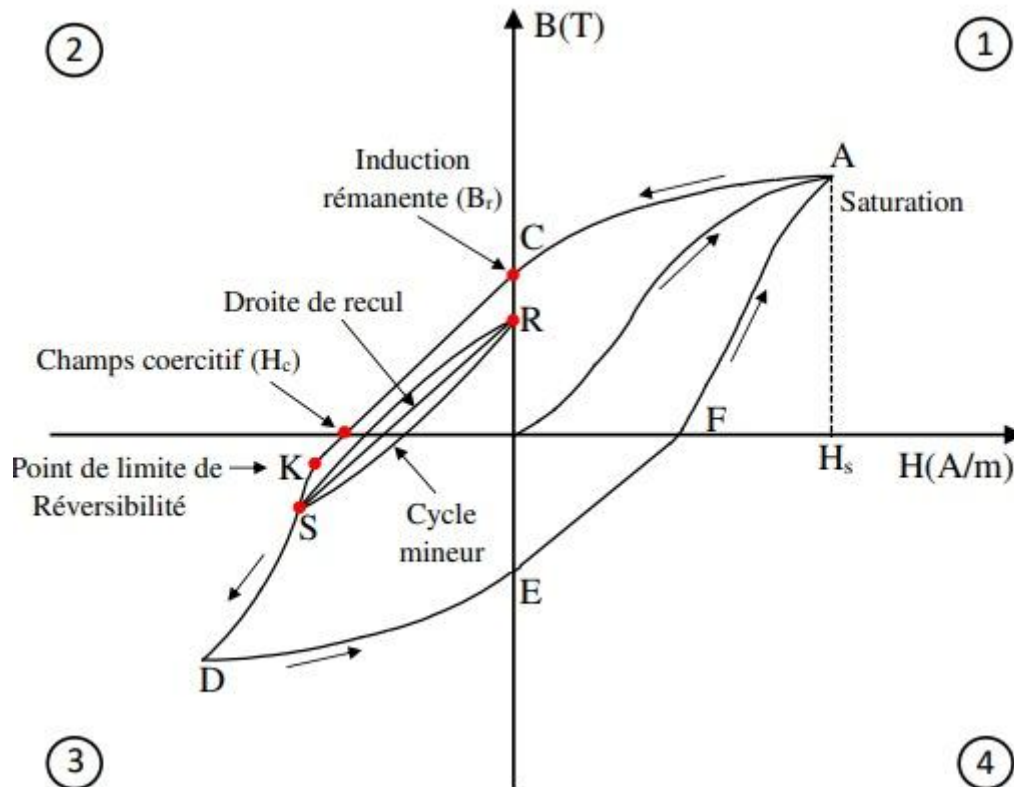
### I.3 Moteur Synchrone A Aimant Permanents

Les moteurs synchrones à aimants permanents (MSAP) constituent une classe avancée de machines électriques tournantes dans laquelle le champ magnétique du rotor est généré par des aimants permanents, au lieu d'un enroulement alimenté. Ce type de moteur fonctionne en synchronisme parfait avec le champ tournant du stator, ce qui permet un contrôle précis de la vitesse et du couple, sans glissement, voici quelques avantages qui sont énumérés ci-dessous [6] :

1. **Rendement élevé** : Pas de pertes de cuivre au rotor (absence d'enroulement rotorique), Faibles pertes globales, ce qui améliore l'efficacité énergétique.
2. **Densité de puissance élevée** : Les aimants permanents offrent un champ magnétique intense dans un faible volume, Meilleure compacité pour une puissance équivalente.
3. **Commande précise de la vitesse et du couple** : Fonctionnement en synchronisme (pas de glissement), Compatibilité avec les commandes vectorielles avancées.
4. **Bon comportement dynamique** : Temps de réponse rapide aux variations de charge, Idéal pour les applications exigeant des accélérations/décélérations rapides.
5. **Moins de maintenance** : Absence de balais ou collecteurs (comparé aux moteurs DC), Durée de vie prolongée grâce à la construction simple du rotor.
6. **Silencieux et vibrations réduites** : Fonctionnement plus fluide, utile dans les applications sensibles au bruit (ascenseurs, climatiseurs, véhicules électriques).
7. **Meilleure utilisation du courant** : Grâce à la commande sinusoïdale, les courants sont mieux répartis dans les phases, ce qui améliore le facteur de puissance.

#### I.3.1 Aimant permanent

La caractéristique magnétique d'un aimant permanent est représentée par la courbe  $B(H)$ , qui décrit la variation de l'induction magnétique  $B$  en fonction du champ magnétique  $H$ . Pour un matériau magnétique typique, cette courbe forme un cycle d'hystérésis, illustrant le comportement non linéaire du matériau lors des phases de magnétisation et de désaimantation comme montre la (Figure I .2)



**Figure I-2** Courbe B(H) d'un matériau magnétique typique - Cycle d'hystérésis

La caractéristique magnétique d'un aimant permanent peut être représentée par la courbe B(H), qui met en relation l'induction magnétique B (en Tesla) avec le champ magnétique appliqué H (en A/m). Cette courbe, typique des matériaux magnétiques durs, forme un cycle d'hystérésis, comme illustré dans la figure ci-dessous [6].

**Point A :** Saturation magnétique

Il correspond à l'état de saturation du matériau, c'est-à-dire à la situation où toutes les régions magnétiques internes (domaines) sont alignées. Une augmentation du champ magnétique H au-delà de ce point n'a presque plus l'effet de faire augmenter l'induction B.

**Point C :** Induction rémanente ( $B_r$ )

Il s'agit de l'induction magnétique résiduelle lorsque le champ appliqué H est ramené à zéro. Elle représente la capacité de l'aimant à conserver son aimantation sans excitation externe.

**Point K :** Champ coercitif ( $H_c$ )

C'est la valeur du champ magnétique négatif nécessaire pour ramener l'induction B à zéro après saturation. Un champ coercitif élevé est un indicateur de bonne résistance à la désaimantation

**Segment CK :** Droite de recul

C'est un segment linéaire fournissant la pente de décroissement de l'induction en cas de

désaimantation partielle. Il montre le comportement magnétique réversible du matériau.

**Point D** : Inversion de l'aimantation

À ce stade, le matériau est complètement démagnétisé et inversé, atteignant une saturation opposée à celle du point A.

**Points S et R** : Cycle mineur

Ces points appartiennent à un cycle d'aimantation partiel, typique d'un fonctionnement normal du moteur sans atteindre les extrêmes. Ce phénomène traduit les fluctuations réversibles de l'aimantation.

**Point de limite de réversibilité :**

Ce point marque la frontière au-delà de laquelle la modification de l'aimantation devient permanente, influençant les performances à long terme de l'aimant.

Selon les propriétés de désaimantation les aimants permanents peuvent être classés en plusieurs catégories, dont les trois principales sont :

- Alinco (Alinco5, Alinco5-7, Alinco9, etc.)
- Ferrites (Ferrite de baryum, Ferrite de strontium, etc.)
- Terres rares (Cobalt de samarium (Sm-Co), Néodyme-Fer-Bore (Nd-Fe-B))

Les courbes de désaimantation de ces matériaux sont illustrées dans la Figure I. 3. Il en ressort que les AlNiCo possèdent la plus forte rémanence, un faible champ coercitif et une courbe non linéaire. Les AlNiCo peuvent être magnétisés et démagnétisés très facilement. Ils ont été largement employés dans les moteurs à courant continu disposant d'aimants permanents jusqu'à l'émergence des aimants en ferrite sur le marché, Les ferrites surpassent les AlNiCo en ce qui concerne le champ coercitif, cependant leur induction rémanente est inférieure. Ces ferrites représentent les aimants permanents les plus économiques disponibles sur le marché. Elles sont souvent utilisées pour les machines à aimants permanents de faible puissance. Les matériaux des terres rares (Sm-Co et Nd-Fe-B) affichent presque une courbe de désaimantation linéaire. Ils présentent une induction rémanente et un champ coercitif élevés. Néanmoins, le prix des Sm-Co est nettement supérieur à celui des autres aimants permanents. Bien que le coût des Nd-Fe-B soit supérieur à celui des ferrites, ils sont plus adaptés pour des machines à aimants permanents haute performance, grâce à leurs propriétés magnétiques exceptionnelles. Le principal inconvénient des Nd-Fe-B se trouve dans leur faible résistance à la corrosion [7].

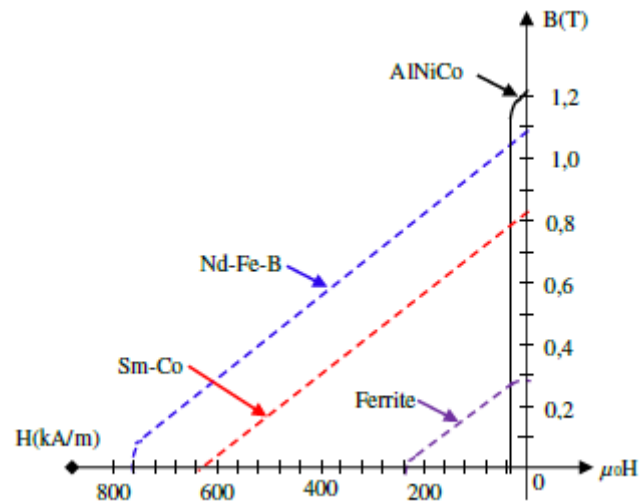


Figure I-3 Courbe de désaimantation des principaux types d'aimants [8].

### I.3.2 Principe de fonctionnement de la MSAP

Le moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) est une machine très utilisée dans les applications modernes en raison de sa haute efficacité, de sa densité de puissance élevée et de son contrôle précis. Cette machine combine les avantages des moteurs synchrones et ceux des aimants permanents modernes. Contrairement aux moteurs asynchrones, dans le moteur synchrone le rotor tourne à la même vitesse que le champ tournant généré par le stator. Il n'y a pas de glissement entre le rotor et le champ tournant.

Cependant, lors de la mise en marche d'un moteur synchrone à aimants permanents (MSAP), le rotor ne peut pas atteindre instantanément la vitesse du champ tournant généré par le stator, généralement de l'ordre de 3000 tr/min pour une fréquence de 50 Hz. En effet, contrairement au moteur asynchrone qui peut démarrer naturellement par glissement, le moteur synchrone nécessite que le rotor et le champ statorique tournent à la même vitesse pour assurer le fonctionnement. Ainsi, un démarrage direct à fréquence nominale entraînerait un échec d'accrochage du rotor. Pour pallier cette difficulté, le système de commande électronique – généralement un onduleur – doit appliquer une fréquence de tension très faible au démarrage, puis l'augmenter progressivement jusqu'à atteindre la fréquence de synchronisme. Ce processus, souvent appelé "rampe de démarrage", vise à reproduire le comportement d'un moteur à courant continu équipé d'un collecteur, en assurant un couplage progressif entre le champ magnétique du stator et les aimants du rotor. Une telle approche permet de minimiser les chocs mécaniques et les appels de courant excessifs, tout en garantissant un démarrage fiable du moteur [9].

### I.3.3 Constitution du MSAP

Le MSAP se compose principalement de deux parties :

- Le stator contient des enroulements triphasés similaires à ceux utilisés dans les moteurs asynchrones.
- Le rotor comporte des aimants permanents (généralement en néodyme-fer-bore) qui créent un champ magnétique constant [10].

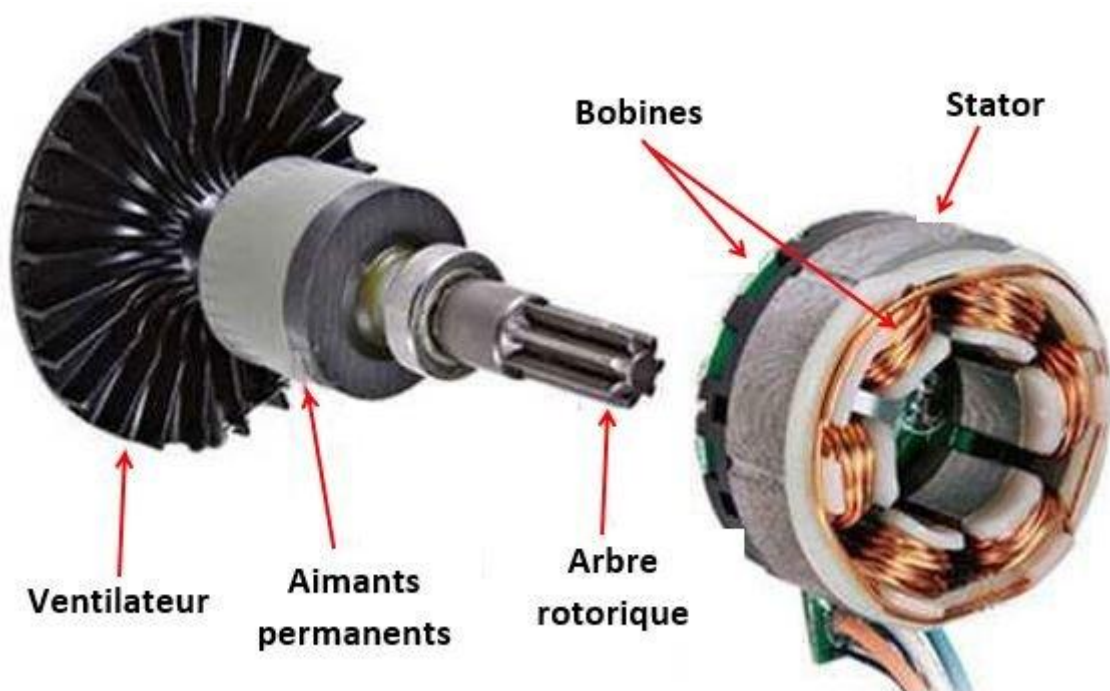


Figure I. 4 Représentation de la MSAP

#### A. Stator

Le stator est composé de plusieurs bobines réparties dans des encoches, formant ainsi trois bobinages distincts. Elles sont conçues pour générer un champ magnétique en mouvement lorsqu'elles sont alimentées par un système de tensions ou de courants triphasés. Il existe de nombreuses topologies qui se rencontrent dans les bobinages des machines tournantes à courants alternatifs. Il existe différents types de bobinages, tels que les

bobinages à pas diamétral, les bobinages à pas raccourcis, les bobinages répartis, ainsi que les bobinages non réguliers, tels que les bobinages à trous ou à nombre fractionnaire d'encoches par pôle et par phase [11], mais deux catégories de bobinage sont couramment utilisées : bobinage distribué et bobinage concentrique [8], [12].



**Figure I. 5** Familles de bobinage : Distribué (a) et Concentré(b)

D'une part la méthode de bobinage dit réparti, également connue sous le nom de bobinage distribué, est celle qui est la plus couramment employée dans le domaine industriel. Son principal atout réside dans sa capacité à favoriser une distribution pratiquement sinusoïdale du champ magnétique à travers l'entrefer. Par conséquent, cela améliore la capacité du bobinage à récupérer le flux rotorique et ainsi minimiser les pertes magnétiques [8].

Par ailleurs, le bobinage distribué est particulièrement approprié pour les applications à haute vitesse, où un nombre restreint de paires de pôles est requis. Le principal désavantage de cette configuration de bobinage est la perte significative de cuivre, surtout au niveau des têtes de bobines, lors de sa mise en place [8].

## **B. 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[11].

Les principes structures des rotors utilisées dans la MSAP sont les suivantes [8], [13]:

**- Aimants montés en surface :**

Dans cette configuration de machine (voir Figure I.6 (a)) les aimants permanents sont fixés directement à la surface externe du rotor. Étant donné que la perméabilité magnétique des aimants est proche de celle de l'air, ils ne contribuent que faiblement à la conduction du flux magnétique à travers le rotor, L'entrefer de ce type de machine peut être considéré comme constant. Cette configuration est largement adoptée en raison de sa simplicité de fabrication et de commande, ainsi que de son rapport poids/puissance favorable, la rendant particulièrement adaptée aux applications embarquées. Toutefois, le fait que les aimants soient positionnés en surface les expose directement aux forces centrifuges, ce qui peut entraîner un risque de décollement à haute vitesse de rotation.

**-Aimants enfouis (inséré) :**

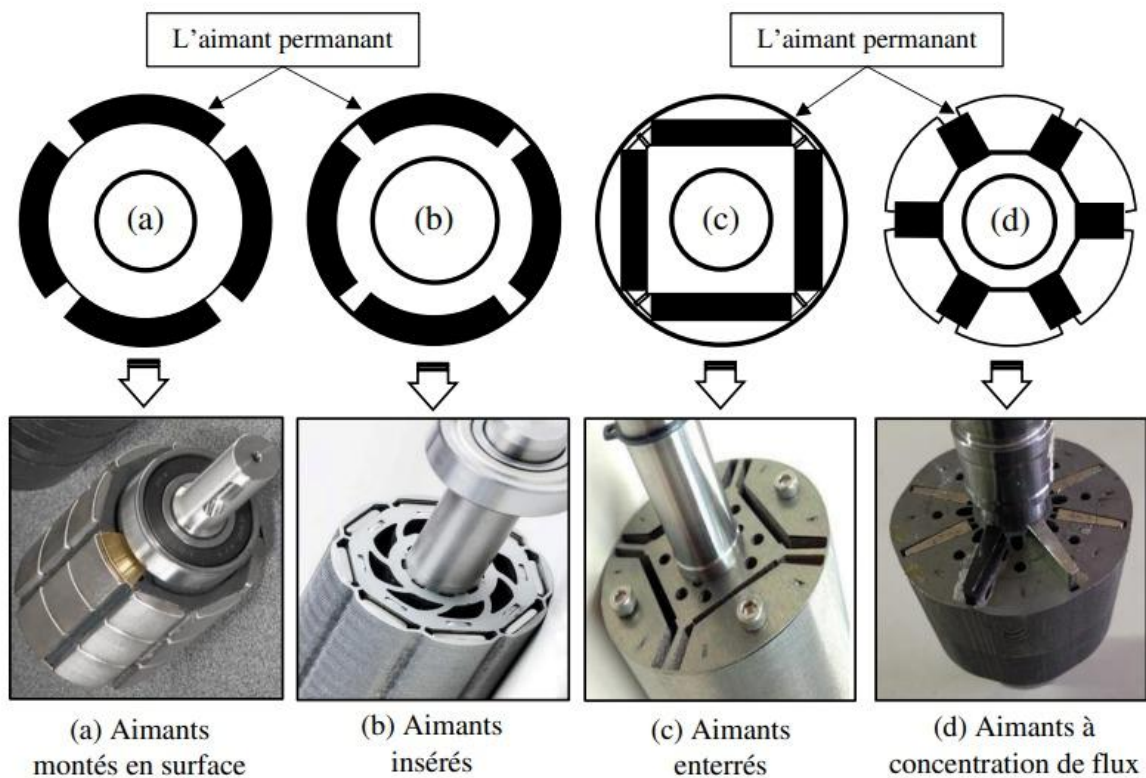
Cette structure (voir Figure I.6 (b)) est similaire à celle des machines à aimants montés en surface. Toutefois, les cavités entre les aimants sont remplies de matériau ferromagnétique, ce qui introduit une saillance magnétique au niveau du rotor. Cette conception permet de bénéficier d'un bon rapport poids/puissance, tout en améliorant la tenue mécanique des aimants, qui ne nécessitent plus de renfort de collage face aux forces centrifuges.

**-Aimants enterrés :**

Dans ce type de configuration (voir Figure I.6 (c)), les aimants permanents sont entièrement intégrés à l'intérieur du rotor. Cette structure offre un rapport de saillance supérieur à celui des machines à aimants insérés, ce qui améliore la production de couple par réductance. De plus, les aimants étant totalement protégés à l'intérieur du rotor, le risque de décollement est inexistant. En revanche, cette topologie présente un rapport poids/puissance moins avantageux. Elle est particulièrement bien adaptée aux applications à très haute vitesse en raison de sa robustesse mécanique accrue.

**-Aimants à concentration de flux :**

Cette structure (voir Figure I.6 (d)) se caractérise par une aimantation de type tangentielle, contrairement aux aimantations radiales utilisées dans les structures précédentes. Cette configuration permet une forte concentration du flux magnétique au sein du rotor, ce qui se traduit par une augmentation significative de l'induction magnétique dans l'entrefer. Elle utilise principalement des aimants en ferrite, afin de limiter le risque de saturation magnétique du fer. Cette topologie est particulièrement adaptée aux applications où le volume et la compacité ne constituent pas une contrainte majeure.



**Figure I. 6** Les différents rotors à aimants permanents

Le tableau ci-après présente une synthèse des principaux avantages et inconvénients associés aux différentes structures de rotor employées dans les moteurs synchrones à aimants permanents (MSAP) selon les sources [12], [14]

	Avantages	Inconvénients
<b>Aimants montée en surface</b>	-Structure Relativement Simple Et économique. -Un Bon Rapport Puissance-Poids. -Faible Cout De Fabrication.	-Risque De Décollement Des Aimants Car ils Sont Soumis Directement Aux Forces centrifuges Importantes -Risque De Désaimantation Des Aimants - Les Aimants Sont De Plus Très Difficiles a défluxer.
<b>Aimants insérés</b>	-un bon rapport poids-puissance. -très bonne fixation des aimants. -Une bonne protection des aimants de la corrosion, des impacts mécaniques et des poussières	-engendre un surcoute important. -la configuration de rotors est plus fragile
<b>Aimants enterres</b>	-Adaptée pour des fonctionnements à haute vitesse. -Meilleure performance en couple surtout lorsqu'il s'agit d'un fonctionnement à basse vitesse et a puissance constante. -Les pertes dues aux courants de Foucault sont plus faibles.	-La conception demeure plus compliquée compte tenu de la difficulté à insérer les aimants. -Les ondulations de couple sont plus importantes vis-à-vis de la machine a aimants en surface.
<b>Aimants a concentration de flux</b>	-Faible Risque De Désaimantation Des Aimants. -Bon Couple Massique. -Plus Rigide Mécaniquement. Utiliser Les Aimants Moins couteux et moins sensible à la température comme les aimants Ferrites.	- Propice à des ondulations de couple.

**Table I.2** Avantage et inconvénients des structures des rotors utilisées dans les MSAP

### C. Les organes mécaniques

De plus, il existe d'autres organes de types mécaniques au niveau d'un moteur synchrone à aimants permanents [3], [15]:

- **L'arbre** : l'arbre est un élément de transmission, il comporte une section centrale qui soutient le corps du rotor et une extrémité d'arbre à laquelle est attaché un demi-accouplement. Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé.
- **Les paliers** : Ils permettent de supporter et de mettre en rotation l'arbre rotorique, ils sont constitués de flasques et de roulements à billes insérés à chaud sur l'arbre. Ils se composent de flasques et de roulements à billes insérés à chaud sur l'arbre.

- **Les flasques** : elles assurent la fermeture du carter du moteur à ses extrémités. Ils sont fabriqués en utilisant une fonte grise ou de l'aluminium injecté comme matériau de base.
- **Les roulements** : Ces composants sont essentiels dans les moteurs électriques, car ils permettent de maintenir la position du rotor par rapport au stator pour transmettre l'énergie mécanique dans les meilleures conditions.
- **Le ventilateur** : Il Assure le refroidissement du moteur. Qui est monté à l'extrémité de l'arbre sur le rotor. Il peut être remplacé par une ventilation forcée pour le refroidissement aux vitesses lentes.
- **La carcasse** : Elle sert de support, elle joue le rôle d'envelopper de garantir une protection contre les éléments externes.

## I.4 Contraintes affectant les machines électriques

Les défauts dans les machines électriques ont des origines multiples. Ils peuvent être attribués à des problèmes de production, des défauts d'isolation, des surchauffes, de l'usure des matériaux ou même à des conditions environnementales défavorables telles que l'humidité, la poussière ou les vibrations. On distingue [16] :

### I.4.1 Contraintes mécaniques

Les contraintes mécaniques sont parmi les plus critiques pour la fiabilité des machines électriques. Suite à un défaut d'excentricité du rotor, celui-ci peut entrer en contact avec les conducteurs statoriques, provoquant l'abrasion du matériau isolant, voire une détérioration directe des fils de cuivre. Pour les machines à ventilation, la projection de corps étrangers par le ventilateur comme des débris d'aluminium en fusion, des résidus de soudure ou même des fragments de dents du circuit magnétique peut engendrer des effets abrasifs similaires. De plus, pendant les phases de démarrage, les conducteurs sont exposés à des forces radiales et tangentielles importantes qui peuvent détériorer le système d'isolation en raison des vibrations et des impacts mécaniques [17].

### I.4.2 Contraintes électriques

Les contraintes électriques affectent principalement l'isolation des enroulements. Des changements de tension rapides ou des surtensions peuvent entraîner des décharges partielles à l'intérieur de l'isolant, ce qui le détériore progressivement. Avec le temps, cela peut entraîner des courts-circuits entre spires ou entre phases, voire une panne totale du moteur [18].

### **I.4.3 Contraintes thermiques**

L'excès de température provoque principalement la dégradation de l'isolant des enroulements et accélère leur vieillissement, ce qui peut entraîner des courts-circuits entre spires, entre phases, ou vers la masse. Les surchauffes sont souvent causées par des variations ou déséquilibres de tension, des démarrages fréquents, une surcharge du moteur, une défaillance du système de ventilation, une température ambiante élevée ou encore des pertes thermiques internes excessives [19].

### **I.4.4 Contraintes environnementales**

L'installation d'un moteur nécessite un environnement propre et sec, car sa durée de vie dépend fortement des conditions ambiantes. L'humidité peut endommager l'isolant des enroulements, tandis que la poussière, surtout si elle contient des particules métalliques, peut entraîner des courts-circuits et détériorer la surface du rotor. Ces facteurs externes accélèrent la détérioration du moteur et amplifient le risque de défaillances [20].

### **I.4.5 Contraintes magnétiques**

Avec l'accroissement de la vitesse de rotation de la machine, les courants induits dans les aimants s'amplifient considérablement, entraînant ainsi des pertes majeures au niveau des aimants. Ces pertes provoquent aussi des échauffements au niveau de l'aimant. Cela contribue à diminuer ses performances, voire à créer des points chauds qui peuvent provoquer une désaimantation partielle d'un aimant. Beaucoup de travaux ont été effectués afin de pouvoir les réduire [21]. Les méthodes fréquemment employées comprennent : le découpage des aimants, l'emploi d'aimants en poudre, ou l'installation d'un écran protecteur non ferromagnétique à haute conductivité pour localiser les courants induits. L'augmentation de la fréquence intensifie aussi les pertes en fer. Elle est capable de provoquer Aussi un effet de pellicule magnétique. La perméabilité des plaques a tendance à diminuer avec l'accroissement de la fréquence.

### **I.4.6 Contraintes résiduelles dues aux problèmes de construction**

Les défauts issus du processus de fabrication peuvent altérer de manière significative le bon fonctionnement des machines électriques. Ces anomalies, souvent introduites lors de la phase de conception ou d'assemblage, peuvent avoir diverses origines [22], parmi lesquelles :

- Dimensionnement ou alignement incorrects lors de l'installation.
- Soudures défectueuses entre les barres conductrices et les anneaux.
- Serrage inadéquat ou isolation insuffisamment imprégnée.
- Montage inapproprié des roulements ou des enroulements.

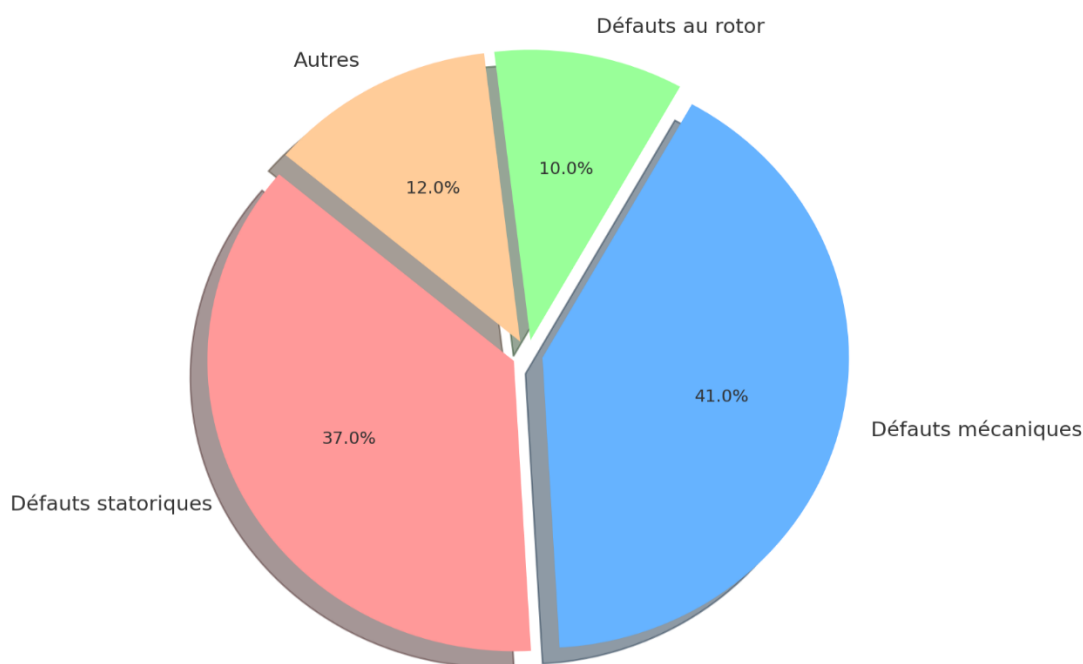
## I. 5 Etude statistique sur les défauts des machines électriques

L'analyse statistique des défaillances dans les machines électriques constitue une étape essentielle pour la mise en place de stratégies de maintenance préventive et conditionnelle. Plusieurs études menées sur le terrain ont permis d'identifier les principaux types de défauts affectant ces machines, ainsi que leur fréquence d'apparition et leur impact sur les performances globales du système.

Selon une étude menée par IEEE et EPRI, environ 40 à 50 % des pannes de moteurs électriques sont dues à des problèmes au niveau des enroulements statoriques, principalement liés à des courts-circuits, une isolation défectueuse ou une surchauffe. Les défauts mécaniques, tels que les défaillances des roulements ou les déséquilibres d'arbres, représentent quant à eux 30 à 40 % des incidents recensés. Les défauts au rotor (barres cassées, excentricité) et les problèmes d'alimentation électrique (variations de tension, harmoniques) constituent la part restante des défaillances [23].

Une enquête industrielle menée par IEEE IAS (Industry Applications Society) montre également que les défauts les plus courants dans les moteurs à courant alternatif (AC) sont répartis comme suit :

- Défauts au niveau du stator : 37 %
- Défauts mécaniques (roulements, accouplements) : 41 %
- Défauts au rotor (barres rompues, excentricité) : 10 %
- Autres (surtensions, connexions, causes environnementales) : 12 %



**Figure I. 7** Répartition statistique des défauts dans les moteurs électriques

Les moteurs synchrones à aimants permanents (MSAP) jouent un rôle clé dans de nombreuses applications modernes. Malgré leurs avantages, elles peuvent présenter certains défauts qu'il est important de détecter et d'analyser.

## **I. 6 Défauts affectant les moteurs synchrones à aimants permanents**

Dans le cadre de ce projet, l'attention est portée sur les défauts susceptibles d'affecter les moteurs électriques, et plus particulièrement les moteurs synchrones à aimants permanents. Les contraintes évoquées précédemment peuvent entraîner diverses défaillances au sein de la machine électrique, compromettant ainsi sa fiabilité et ses performances, qui peuvent être classées en quatre catégories principales [24] :

- Défauts du stator
- Défauts du rotor
  - Défauts de désaimantation de l'aimant permanent pour les MSAP
- Défauts d'excentricité
- Défauts de roulement

### **I.6.1 Défauts du stator**

Le stator, commun à tous les moteurs électriques, qu'il s'agisse de moteurs synchrones à aimants permanents (MSAP) ou de moteurs asynchrones à cage d'écureuil. Présente des caractéristiques structurelles similaires. Il est constitué d'un empilement de tôles ferromagnétiques (culasse) et d'enroulements placés dans des encoches.

Les défauts statoriques peuvent apparaître soit au niveau de la culasse, soit au niveau des enroulements. Toutefois, les défauts mécaniques de la culasse (fissures, cassures, etc.) restent relativement rares, tant pour les petites que pour les grandes machines, et seront donc négligés dans cette étude [25].

Les principaux défauts statoriques concernent généralement les enroulements, notamment la dégradation de l'isolant, qui peut engendrer les défauts suivants :

- Court-circuit entre spires d'une même phase
- Court-circuit entre phases
- Ouverture d'une phase

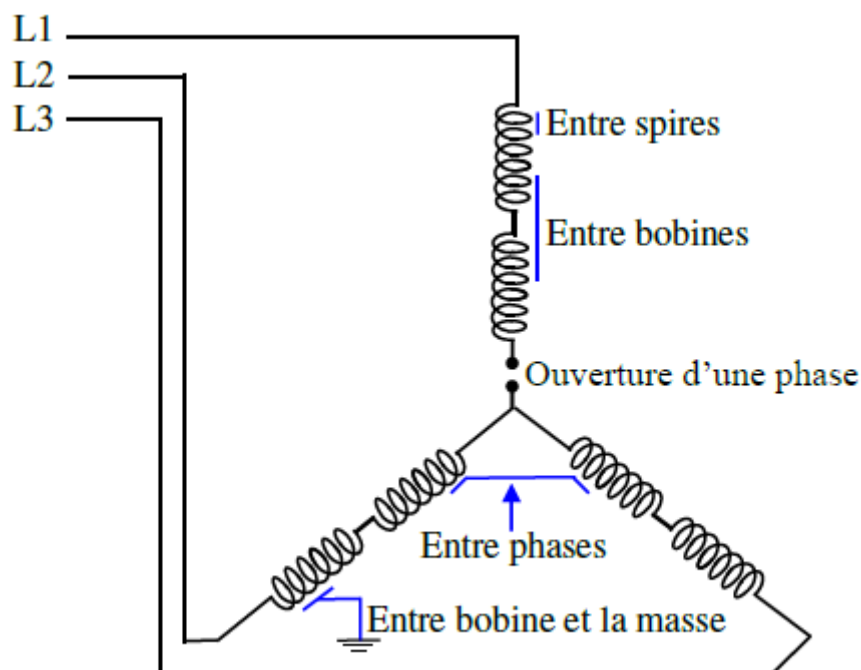


Figure I. 8 Différents types de défauts statoriques

### I.6.1.1 Défaut de dégradation de la matière isolante

Les matériaux d'isolation ont des limites de tenue en température, de tension, et en contraintes mécaniques. En cas de condition de fonctionnement au-delà d'une de ces limites, leur dégradation peut précocement se mettre en œuvre, jusqu'à ce que ceux-ci ne jouent plus leur rôle protecteur. Cela peut alors se traduire par l'apparition d'un court-circuit dans les enroulements visés [26]. Les principales causes susceptibles d'amener un tel défaut sont :

- Les pertes internes comme les pertes Joule, les pertes fer, ou les pertes mécaniques
- Le fonctionnement dans des conditions d'environnement rigoureux
- Une dégradation de l'isolant dès la pré-production
- Une tension imposée par enroulements en dépassant les capacités diélectriques de matériau isolant
- Un courant excessif causé par un court-circuit, un dysfonctionnement du convertisseur ou surcharge
- Le vieillissement naturel des matériaux isolants en passant du temps

### I.6.1.2 Défaut de court-circuit entre spires

Dans de nombreux cas, la dégradation de l'isolant conduit à l'apparition d'un court-circuit entre spires, considéré comme l'un des premiers signes de défaillance dans les enroulements. Ce type de défaut survient fréquemment au niveau des têtes de bobine (Figure I.8), en raison de leur exposition accrue aux forces électromagnétiques et aux contraintes mécaniques liées au croisement

des conducteurs [12]. Si ce défaut n'est pas identifié à un stade précoce, il engendre un échauffement localisé causé par un courant intense circulant dans la zone court-circuitée. Cette surchauffe favorise la propagation rapide du dommage à une portion plus étendue de l'enroulement. À terme, cela peut aboutir à des défauts plus critiques tels que des courts-circuits entre bobines, entre phases, ou encore entre phase et masse, pouvant aller jusqu'à un dysfonctionnement majeur voire l'arrêt complet de la machine [27].

### **I.6.1.3 Défaut de court-circuit entre phases**

Les courts-circuits entre phases représentent une défaillance électrique critique dans les moteurs synchrones à aimants permanents (MSAP), car ils peuvent entraîner une élévation rapide de température, une dégradation de l'isolant, voire la destruction de l'enroulement statorique dans les cas extrêmes [27].

Ce type de défaut survient lorsqu'un contact direct s'établit entre deux phases du stator, ce qui génère un courant de défaut intense limité uniquement par l'impédance de fuite et la résistance du circuit. Les principales causes de ce type de court-circuit incluent :

- La dégradation de l'isolation par vieillissement thermique ou contraintes mécaniques
- Des défauts de fabrication ou un imprégné insuffisant de l'enroulement
- Une contamination par l'humidité ou des particules conductrices
- Une surcharge prolongée provoquant un échauffement localisé

### **I.6.1.4 défauts ouverture d'une phase**

L'ouverture d'une phase correspond à une interruption totale du courant dans l'une des trois phases d'alimentation (généralement due à une coupure de câble, un contact défectueux, ou un défaut dans l'onduleur). Les principaux effets de ce type de court-circuit incluent :

- Déséquilibre du système triphasé
- Perte de couple et vibrations
- Risque d'arrêt brutal si le défaut est détecté par le variateur

## **I.6.2 Défauts du rotor**

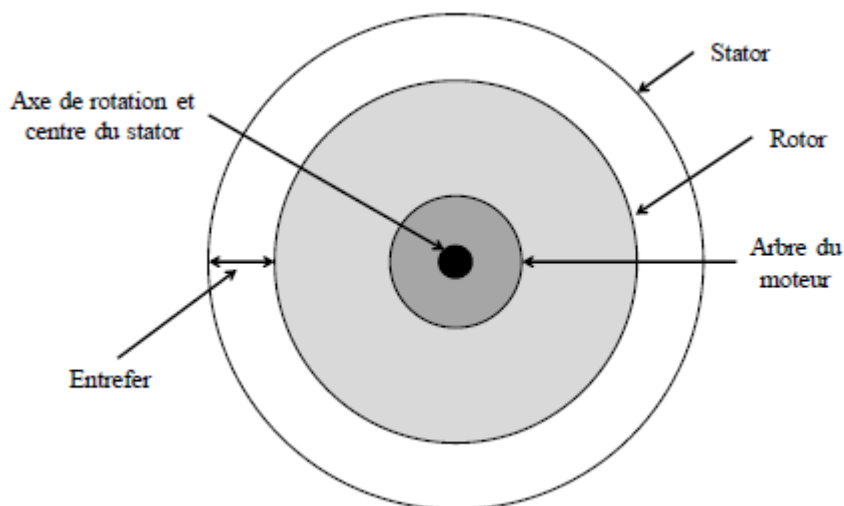
Parmi les plus courants, on distingue notamment [26] :

- Défauts de roulements mécaniques
- Excentricité du rotor
- Défauts dans les enroulements rotoriques pour les machines synchrones classiques
- Défaut de désaimantation pour les machines synchrones à aimants permanents

Dans notre mémoire, nous allons nous intéresser seulement aux défauts d'excentricité et de désaimantation

### I.6.2.1 Défaut d'excentricité

Dans une machine idéale, le centre du rotor est aligné sur celui du stator et l'axe de rotation du rotor est le même que l'axe du stator, comme illustré dans la figure I.9.

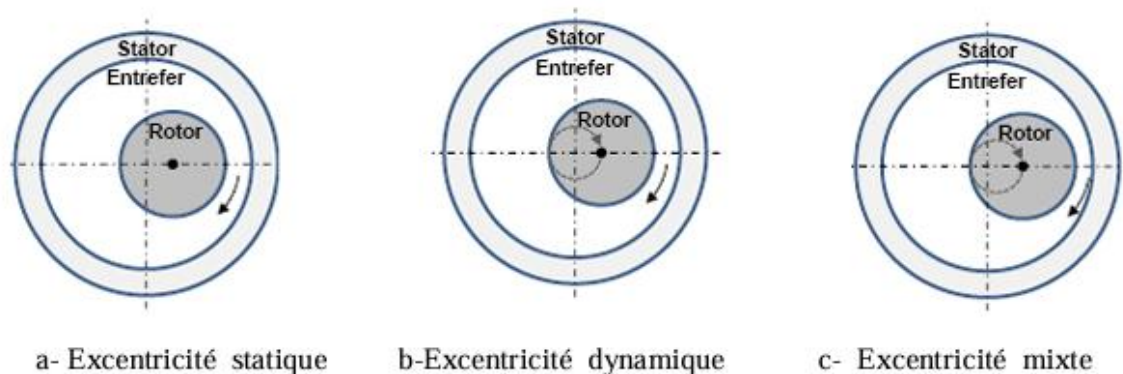


**Figure I-9** Positions du rotor et du stator dans une machine idéale

Autrefois, les conséquences des défauts mécaniques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer par des défauts d'excentricité. Ce défaut existe en général dans la machine, mais avec un faible niveau, dès sa fabrication et évolue avec le temps. Certains utilisateurs et fabricants spécifient un niveau d'excentricité maximal admissible de 5% alors que d'autres permettent un niveau maximal de 10% de la largeur de l'entrefer [28]. Selon [29], tout niveau d'excentricité supérieur à 60% nécessite une intervention immédiate afin d'éviter un frottement entre le rotor et le stator, ce qui peut mener à une panne très grave de la machine.

Trois catégories d'excentricité peuvent être identifiées dans la littérature et sont illustrées dans la figure I.10 [28] :

- Excentricité statique : qui correspond au cas d'une ovalité du stator ou/et du rotor aussi positionnement incorrecte de ces derniers lors de fabrication ou de mise en service. Figure (I.10.a)
- Excentricité dynamique : dans ce cas, pendant le fonctionnement, le centre du rotor tourne autour de l'axe de symétrie de la machine. Figure (I.10.b)
- Excentricité mixte : correspond à la combinaison des deux cas cités précédemment Figure (I.10.c)



**Figure I. 10** Différents types d'excentricité dans la machine

### I.6.2.2 Défaut désaimantation

La machine à aimants permanents est composée d'un rotor pourvu d'aimants permanents, qui peuvent être fixés à sa surface ou intégrés à celle-ci. L'une des difficultés majeures avec ces machines est la désaimantation de leurs aimants, qui constitue environ 80% du coût total de la machine, étant donné leur prix relativement élevé

Sous des conditions normales, les aimants génèrent un flux rotorique stable. Toutefois, ce flux peut fluctuer pour diverses raisons [25], comme par exemple :

- La réaction induite : le courant généré au stator produit un champ qui s'oppose à celui créé par les aimants, ce qui peut déplacer leur point de fonctionnement en dehors de la zone limite de réversibilité [30]
- La température élevée : qui réduit l'induction rémanente des aimants,

Les fissures : qui apparaissent dans les aimants durant leur production et qui sont susceptibles de provoquer leur décomposition, entraînant ainsi leur dégradation

## I. 7 Techniques de diagnostic des MSAP

Depuis les années 70, un grand nombre de recherches ont été consacrées à la surveillance de l'état de santé et au diagnostic des pannes dans les machines électriques. La majorité d'entre eux s'est essentiellement focalisée sur les machines de type asynchrone. En revanche, et avec les avancées réalisées dans le domaine des aimants terre rare, les MSAP ont connu une forte progression dans les systèmes industriels modernes, ce qui a motivé leurs exploitants à s'intéresser aux outils de diagnostic s'adaptant à ce type de machines [31].

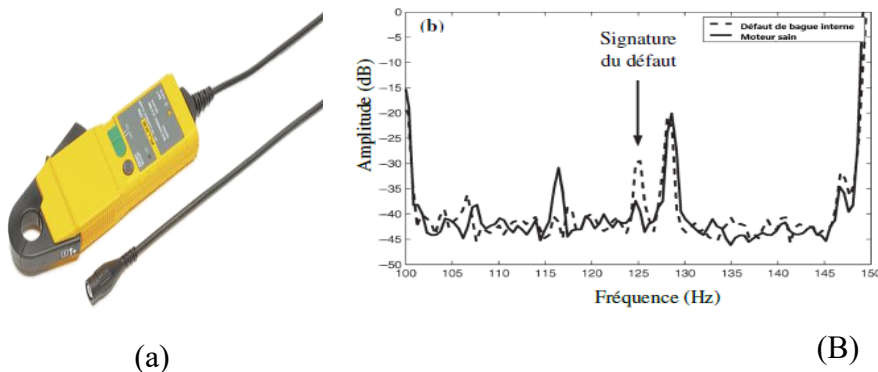
Dans les techniques de surveillance à base de signal, on s'intéresse aux grandeurs et aux Signaux mesurables sur la machine contenant les symptômes spécifiques caractérisant sa dégradation [25]. Les grandeurs mesurables les plus fréquemment employées sont les suivantes :

- Les courants statoriques
- Les vibrations mécaniques : déplacement, vitesse et accélération vibratoires
- Les grandeurs thermiques
- Le flux magnétique dans l'entrefer
- Le couple électromagnétique.

### I.7.1 Courant statorique

En complément des techniques abordées précédemment, l'analyse du courant moteur (MCSA : Motor Current Signature Analysis) s'avère ces dernières années une méthode tout particulièrement pertinente pour réaliser le diagnostic des défauts dans les machines électriques. Elle connaît effectivement un intérêt grandissant de la part des utilisateurs parce qu'elle est en mesure de détecter différents types de défauts sans nécessiter de capteurs supplémentaires. D'autre part, elle présente l'avantage d'être non intrusive et de pouvoir être utilisée pour la surveillance en temps réel. Ainsi, la MCSA est-elle aujourd'hui reconnue comme l'une des techniques de diagnostic les plus prometteuses en matière de maintenance conditionnelle, voici quelque avantage [32]:

- Utilisation d'un seul capteur de courant au lieu des équipements coûteux et encombrant (Figure I.11).
- Emplacement non spécifique du capteur (technique non invasive) : il peut être placé à n'importe quelle position entre l'alimentation et le moteur.
- Spectre riche en harmoniques : la position fréquentielle de certaines harmoniques Fournit des informations utiles sur l'état du moteur.
- Surveillance simple de la sévérité des défauts : par un simple suivi des amplitudes de leurs signatures fréquentielles.

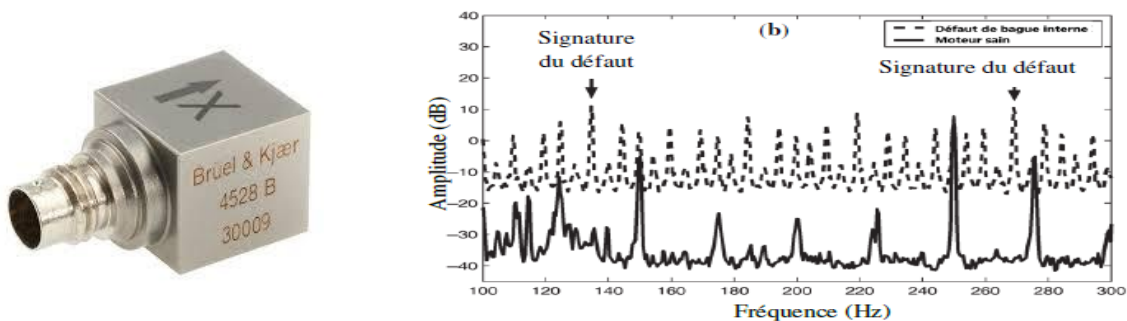


**Figure I. 11** La technique du courant statorique : (a) capture d'courant / (b) spectre de signal statorique pour le cas sain et le cas d'un défaut

C'est pourquoi de nombreux travaux de recherche [32] ont adopté cette technique comme base de développement pour l'élaboration de nouvelles approches de diagnostic. Dans cette continuité, notre étude s'inscrit dans cette démarche, en s'intéressant particulièrement à l'exploitation de cette méthode pour la détection des défauts dans les machines électriques.

### I.7.2 vibration

Technique d'analyse vibratoire parmi les méthodes les plus anciennes et courantes dans le domaine industriel. Elle sert essentiellement à identifier les défauts mécaniques et les problèmes de roulements [27]. Cette étude peut être effectuée grâce à des capteurs, habituellement des accéléromètres, positionnés sur les paliers dans les orientations verticales, axiales et radiales. Actuellement, il existe des accéléromètres triaxiaux capables d'effectuer simultanément les trois fonctions disponibles. Cependant, l'analyse vibratoire comporte certains inconvénients notamment le problème d'accessibilité et les difficultés rencontrées dans les connexions mécaniques des accéléromètres pour effectuer les mesures nécessaires au voisinage direct du défaut (Figure I.12). De plus, le coût de ces capteurs reste relativement élevé par rapport aux autres capteurs tels que les capteurs de tension ou de courant. Pour s'affranchir de ces problèmes, les recherches se sont orientées vers l'exploitation d'autres signatures pour la détection des défauts.



(a) Accéléromètre triaxial

(b) Spectre de signal vibratoire pour le cas sain et le cas d'un défaut

**Figure I.12** La technique de vibration

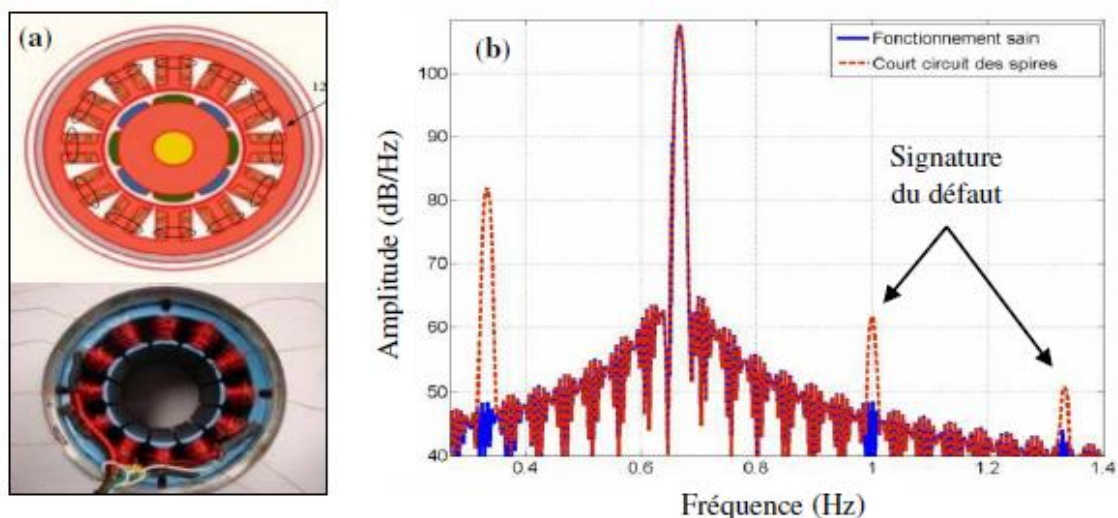
### I.7.3 Température

La température joue un rôle critique dans le fonctionnement des machines électriques. Une élévation excessive de la température peut entraîner une dégradation prématurée de l'isolation, une baisse des performances magnétiques et électriques, voire une défaillance irréversible de la machine. Voici quelques causes principales :

- Pertes Joule (effet thermique des courants dans les enroulements) : L'intensité du courant traversant les enroulements génère une chaleur proportionnelle. Ces pertes représentent une source principale d'échauffement
- Pertes dans le fer (hystérésis et courants de Foucault) : Générées par les cycles magnétiques dans le fer du stator et du rotor, surtout à haute fréquence
- Surcharge ou surintensité : Un fonctionnement au-delà du courant nominal provoque une dissipation thermique excessive dans les enroulements
- Défauts internes (ex. : court-circuit entre spires) : Ces défauts locaux génèrent des points chauds qui accélèrent la dégradation thermique [26]

### I.7.4 Flux magnétique

Dans une machine idéale avec ça fonctionnement normale, les courants et les tensions statoriques de la machine sont équilibrées, Toutefois, en cas de présence d'un défaut, que ce soit au niveau du rotor ou bien du stator, cela provoque un déséquilibre électrique et magnétique dans la section statorique. Ceci a des répercussions sur la conversion électromécanique et la distribution des champs à l'intérieur et à l'extérieur de la machine. Pour l'étude de ce flux axial, on positionne une bobine à l'extrémité de la machine ou autour de l'arbre (Figure I.13 (a)). Elle sera le lieu où se manifestera une force électromotrice induite. Il est possible d'effectuer une analyse spectrale de ce flux en vue de détecter des anomalies spécifiques dans les machines électriques (Figure I.13 (b)), [32]. Néanmoins, la mesure du flux présente un inconvénient celui de l'emplacement du capteur.



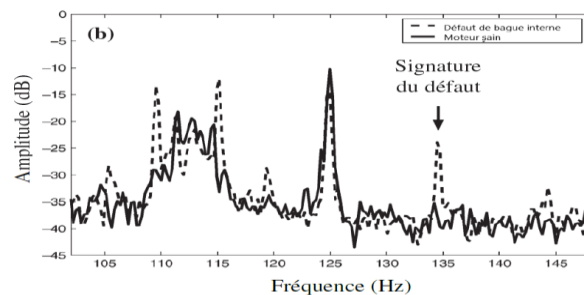
**Figure I.13** La technique du flux magnétique : (a) Bobines de mesure de flux magnétique /. (b) spectre de flux magnétique pour le cas sain et le court-circuit

### I.7.5 Couple électromagnétique / Vitesse de rotation

Certains défauts mécaniques peuvent être identifiés en analysant les harmoniques présentes dans le spectre des grandeurs mécaniques, issues de l'interaction entre le flux magnétique et le courant. Toutefois, il a été démontré que ces composantes fournissent des informations moins précises sur les défauts rotoriques que celles observées dans le spectre du courant statorique, notamment en raison d'une augmentation d'amplitude généralement moins marquée. Par ailleurs, l'acquisition de ces grandeurs mécaniques nécessite un équipement coûteux (Figure I.14) ainsi que l'installation de capteurs directement sur le corps de la machine, ce qui limite leur utilisation pratique dans un cadre industriel [8].



(a)



(b)

**Figure I.14** La technique du couple électromagnétique : (a) Couplemètre / (b) Spectre de couple électromagnétique pour le cas sain et le cas d'un défaut

## I.8 Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons vu la terminologie utilisée dans le diagnostic et les différents types de maintenances. De plus, après avoir exposé les principaux éléments de constitution d'un moteur synchrone à aimant permanent « MSAP », nous avons classé les différentes contraintes pouvant entraîner leur défaillance, suivi par une liste des principales défaillances de ce moteur.

Étant donné que nous aborderons dans le prochain chapitre les méthodes de diagnostiquer des défauts de la MSAP, nous avons présenté une étude sur les différentes techniques de diagnostic ainsi que les différentes signatures de fréquence des défauts pouvant affecter les MSAP.

**Chapitre II :**  
**Les Méthodes De Diagnostic**  
**Des MSAP**

## II.1 Introduction

L'apparition d'un défaut dans un système d'entraînement électrique entraîne une altération de son fonctionnement, ce qui impacte ses performances globales. En raison de la grande variété de ces défauts et de la complexité des relations de cause à effet, de nombreuses études se sont penchées sur le diagnostic à partir de l'analyse du courant statorique, connue sous le nom de MCSA (Motor Current Signature Analysis). Cette technique de diagnostic est particulièrement prometteuse et permet de détecter la majorité des défauts rencontrés.

Par ailleurs, les défauts affectant les moteurs électriques se manifestent généralement de deux façons :

- ❖ Par des changements dans les caractéristiques de certains signaux mesurables sur le système ;
- ❖ Ou par des variations de certains paramètres physiques du dispositif.

Ces deux modes d'observation donnent lieu à deux grandes catégories de méthodes de diagnostic : Les méthodes dites sans modèle, qui ne nécessitent pas de connaissance préalable du système ; Et les méthodes dites à base de modèle, qui s'appuient sur une connaissance a priori du fonctionnement du système.

Ce chapitre est dédié à l'étude approfondie des méthodes de diagnostic appliquées aux moteurs électriques. Nous débuterons par une présentation exhaustive des différentes méthodes utilisées pour identifier les défauts, en distinguant particulièrement deux grandes familles : les méthodes dites sans modèle, qui ne requièrent aucune connaissance préalable du système, et les méthodes basées sur un modèle, qui s'appuient sur une compréhension préalable du comportement du moteur. Par la suite, nous exposerons en détail la méthode de traitement du signal développée spécifiquement dans le cadre de cette mémoire, en mettant en avant leur principe dans le diagnostic des anomalies.

## II.2 Les méthodes de diagnostic des machines électriques

Généralement, tout problème sur une machine électrique se traduit par des changements dans les propriétés des signaux mesurés ou par des modifications de sa configuration interne. Cela permet de différencier deux principales catégories des méthodes de diagnostic : les méthodes basées sur des modèles et les méthodes sans modèle [11].

### II.2.1 Approches à base de modèle

Ces méthodes de diagnostic reposent sur une connaissance à priori du modèle physique du système à surveiller. Elles sont considérées comme des alternatives de la redondance matérielle ou physique. Le principe de ce type de diagnostic est de détecter, à partir de l'écart entre le comportement réel du système et son comportement prédit généré par son modèle, la présence ou non d'une anomalie et d'identifier la défaillance si présente [11].

Les approches de diagnostic à base de modèles les plus citées dans la littérature sont celles basées soit sur une estimation d'état du système par observateurs ou par espace de parité, soit sur une estimation des paramètres [11].

### II.2.1.1 Approche à base d'observateur

L'approche de diagnostic par estimation d'état à base d'observateurs consiste à estimer les états et les sorties du système à partir des grandeurs accessibles à la mesure, c'est-à-dire les entrées et les sorties. Le résidu est alors généré en formant la différence entre les sorties estimées et les sorties réelles. L'observateur revient finalement à un modèle parallèle au système avec une contre réaction qui pondère l'écart de sortie [11]. Lorsqu'un élément du vecteur résidu dépasse la valeur de son seuil de détection, cela signifie la présence d'un défaut ce qui permet de la détecter et par la suite de la localiser [8]. Le principe de cette approche est illustré sur la (Figure II.1), où la matrice  $H_m$  représente la contre réaction qui permet de minimiser l'effet des conditions initiales, des perturbations et des erreurs du modèle sain.

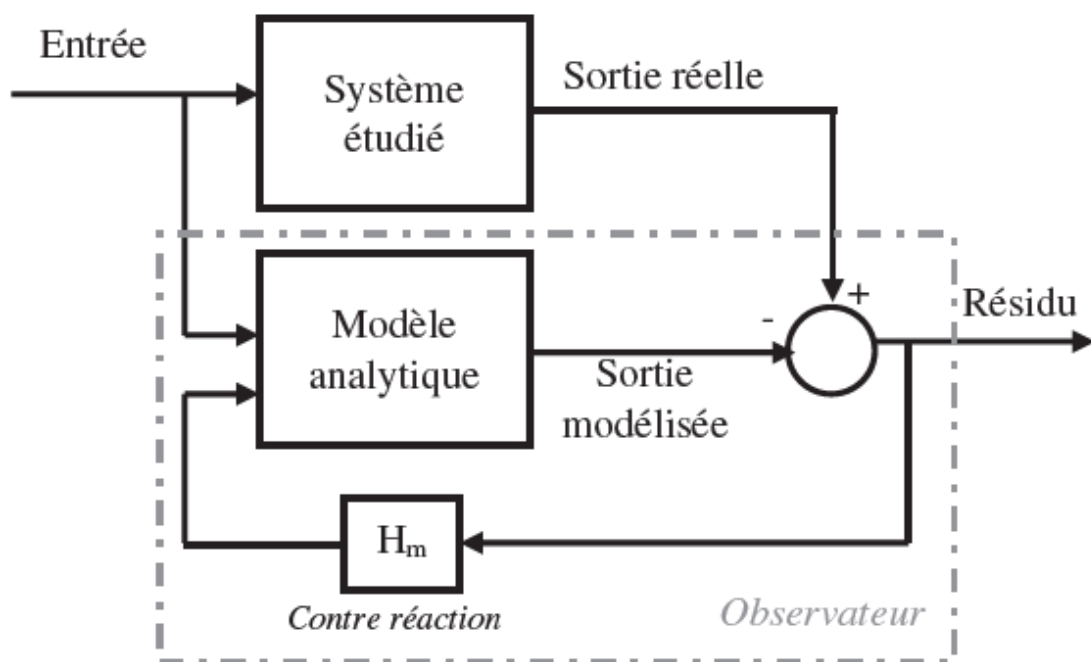


Figure II.1 Schéma de principe de l'approche à base d'observateur

### II.2.1.2 Approche par espace de parité

Cette méthode consiste à réaliser une redondance analytique entre les entrées et les sorties du système, indépendamment de ses états et des grandeurs inconnues [11]. Elle se repose sur la vérification de la cohérence existant entre les relations mathématiques du système surveillé et les mesures issues des capteurs et des actionneurs. Le résidu est défini comme l'écart entre la mesure et sa valeur calculée par le modèle. De point de vue détection, un résidu nul déclare un système

sans défaut alors qu'une valeur non nulle alerte la présence d'un défaut. Le principe de cette méthode est schématisé sur la Figure II.2.

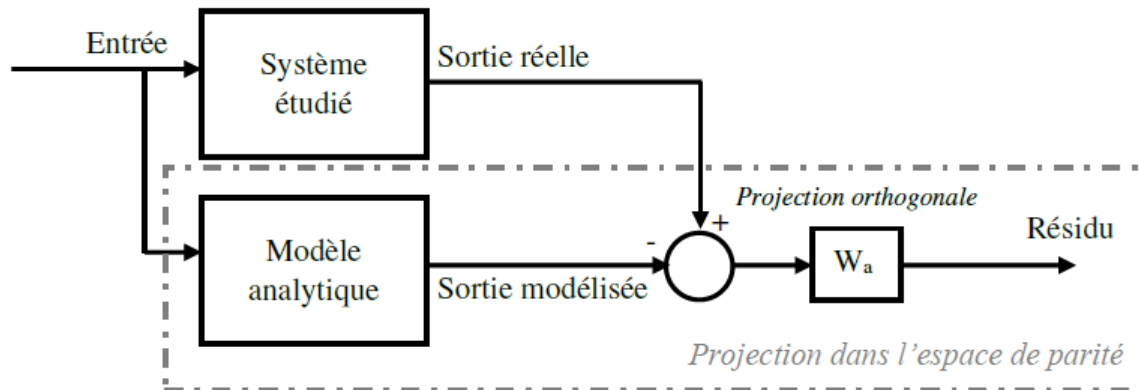


Figure II.2 principes du diagnostic par projection dans l'espace de parité

### II.2.1.3 Approche par estimation paramétrique

Cette méthode repose sur l'existence d'un modèle mathématique qui décrit le fonctionnement interne du système. Elle consiste à estimer les paramètres physiques ou structuraux contenus dans ce modèle à partir des mesures d'entrée et de sorties réelles du système. Nous réalisons une comparaison entre les valeurs estimées et les valeurs de référence de l'état normal pour détecter et identifier l'apparition d'une défaillance [11],[8]. Le principe de l'approche est illustré sur la Figure II.3

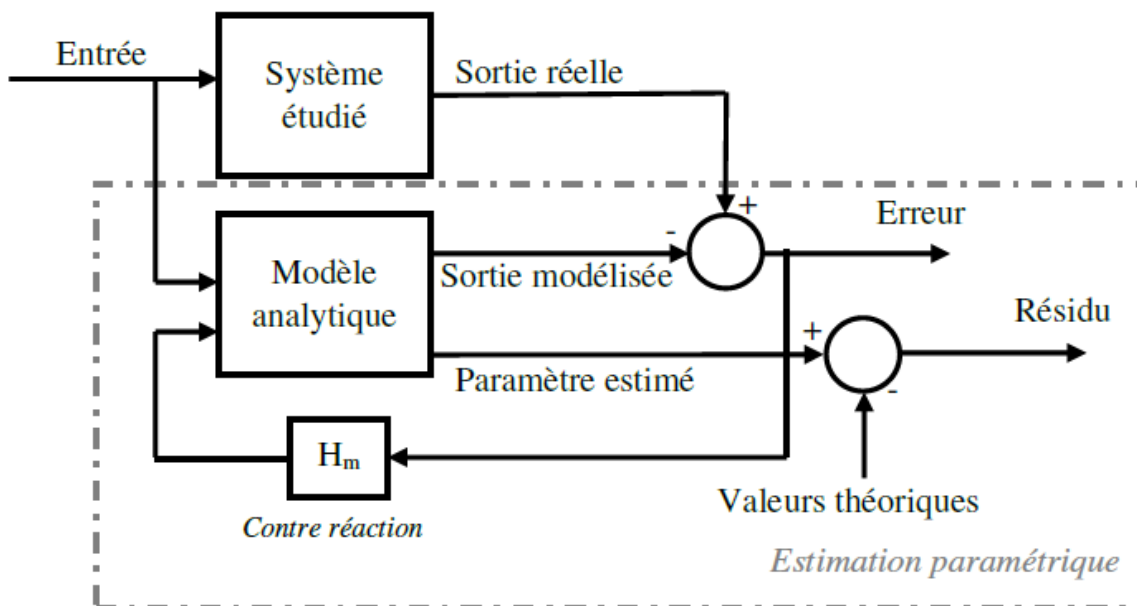


Figure II.3 Principe du diagnostic avec estimation paramétrique

## II.2.2 Approche sans modèle

Les méthodes de diagnostic sans modèles ne nécessitent aucun modèle mathématique précis du système à surveiller. Les informations acquises sur le procédé considéré permettent de caractériser son fonctionnement [8]. Ces informations, appelées indicateurs de défauts, sont analysées à l'aide de techniques de traitement du signal, de méthodes statistiques ou de méthodes basées sur des connaissances non statistiques.

Les approches sans modèle bénéficient de s'appuyer sur des connaissances du système basées uniquement sur le retour d'expérience, ce qui est idéal pour certaines applications industrielles complexes où la conception d'un modèle précis est difficile.

### II.2.2.1 Méthodes à base de connaissances

Les méthodes à base de connaissances ne nécessitent pas de modèle mathématique explicite du système. Ils sont basés sur l'emploi d'algorithmes de classification issus de la reconnaissance de formes ou de l'intelligence artificielle, dans le but d'établir avec précision l'état opérationnel du système surveillé.

L'expression « Intelligence Artificielle » englobe diverses méthodes telles que :

- Les systèmes experts, qui exploitent des règles logiques issues de l'expérience humaine.
- Les réseaux de neurones artificiels, capables d'apprendre à partir de données historiques.
- La logique floue, utile pour modéliser l'incertitude et les connaissances imprécises.

Ces techniques peuvent être utilisées indépendamment ou de manière combinée, afin d'augmenter la robustesse et la performance du diagnostic. Cette approche est spécialement adaptée quand le système est complexe, mal compris ou lorsqu'un volume considérable de données est à disposition.

### II.2.2.2 Méthodes statistiques

Les approches statistiques pour détecter les pannes se reposent sur l'hypothèse que les signaux mesurés par les capteurs présentent des propriétés statistiques caractéristiques en fonctionnement normal. L'objectif est de détecter une anomalie en analysant les variations de ces propriétés dans le temps. Pour ce faire, on applique des tests statistiques (par exemple, test de moyenne, de variance ou de corrélation) à des échantillons des signaux mesurés. Une déviation significative par rapport aux valeurs de référence peut indiquer la présence d'un défaut. Par exemple, un changement soudain de la moyenne, de la variance, ou encore de la distribution probabiliste d'un signal peut révéler une dégradation progressive ou brutale du système [8].

### II.2.2.3 Méthodes de traitement du signal

Elles sont basées sur l'observation directe et l'analyse des grandeurs physiques mesurées du moteur telles que : le couple, la vitesse, les vibrations et les courants. L'avantage majeur de ces

méthodes est qu'elles ne nécessitent pas une connaissance a priori du système à diagnostiquer. Selon leur domaine d'application, ces techniques se divisent en trois catégories : fréquences et temps-fréquence, temps.

### **A. Analyse fréquentielle**

L'analyse fréquentielle est l'équivalent indispensable de l'analyse temporelle du signal. En effet, un phénomène qui est indiscernable dans le domaine temporel peut être identifié dans le domaine des fréquences, et inversement. Dans la littérature, différentes méthodes peuvent être utilisées pour analyser le signal dans le domaine fréquentiel [24].

- La méthode de PRONY.
- La méthode de MUSIC et Root-MUSIC.
- La méthode ESPRIT.
- L'estimation de la DSP et ses extensions.
- La méthode autorégressive (AR).

### **B. Analyse temporelle**

Les techniques de traitement temporel du signal sont des méthodes qui offrent la possibilité d'étudier le signal directement dans le domaine temporel, en observant son évolution sans passer par une transformation fréquentielle. Elles reposent sur l'exploitation des équations du système, de ses conditions initiales et aux frontières, si elles sont connues. Plusieurs approches peuvent être utilisées dans ce cadre, telles que [24] :

- A. indicateurs scalaire
- B. La moyenne synchrone temporelle (MST)
- C. La décomposition en modes empiriques (EMD)

### **C. Analyse temps-fréquence**

Les techniques d'analyse temps-fréquence ont été conçues pour examiner les signaux non stationnaires, c'est-à-dire, ceux dont les caractéristiques évoluent avec le temps. Cela concerne aussi bien des signaux aléatoires que des signaux déterministes. Ces méthodes sont utiles lorsque le contenu fréquentiel ou les propriétés statistiques du signal évoluent dans le temps, ce qui est souvent le cas lors de l'apparition de défauts dans les systèmes mécaniques ou électriques [8].

Parmi les techniques temps-fréquence les plus courantes, on trouve :

- La transformée de Fourier à court terme (STFT).
- St-kurtogram.
- La distribution de Wigner-ville.
- La transformée d'hibert-huang

### II.3 Identification des défauts par la DSP

La méthode la plus couramment utilisée dans le secteur industriel est celle qui repose sur l'estimation de la densité spectrale de puissance (DSP), introduit par Schuster (1898), dans le but de déceler des périodicités dissimulées au sein des données relatives aux taches solaires. L'estimation de la Densité Spectrale de Puissance (DSP) fournit la répartition de la p puissance d'un signal aléatoire en fonction de la fréquence, facilitant ainsi son analyse harmonique. On utilise fréquemment ce calcul pour l'analyse d'un signal aléatoire de nature stationnaire, tel que le courant statorique recueilli en régime stable. Effectivement, un signal aléatoire a habituellement une puissance moyenne finie et, de ce fait, il peut être décrit par une densité spectrale de puissance moyenne.

De nombreuses études ont mis en évidence les raisons expliquant sa longévité dans le domaine du diagnostic ainsi que sa préférence par rapport à des méthodes plus récentes. Parmi les facteurs qui justifient ce succès, on peut notamment citer :

- L'estimation de la DSP est simple à mettre en œuvre et demande peu de ressources de calcul.
- La DSP est particulièrement efficace pour les signaux en régime permanent, comme les courants statoriques des machines fonctionnant à vitesse constante.

#### II.3.1 Principe d'estimation de la DSP

L'estimation de la densité spectrale de puissance (DSP) est largement employée dans le domaine du diagnostic des machines électriques, en particulier lorsque le signal mesuré tel que le courant statorique est acquis en régime permanent. Cette méthode est particulièrement adaptée à l'analyse des signaux aléatoires stationnaires. Son principal avantage réside dans la simplicité de sa mise en œuvre ainsi que dans la rapidité de son exécution, rendue possible par l'utilisation de la transformée de Fourier rapide (FFT). Dans ce contexte, la DSP permet de révéler les composantes fréquentielles caractéristiques des défauts potentiels. Ainsi, pour un signal discret  $i(n)$ , représentant le courant statorique numérisé, selon l'expression suivante [33]:

$$DSP(k\Delta f) = \frac{1}{N_e} |I(k\Delta f)|^2 \quad \text{II.1}$$

Où  $N_e$  est le nombre d'échantillons,  $I(k\Delta f)$  la Transformée de Fourier Discrète (TFD) du courant statorique acquis  $i(n)$  et  $\Delta f$  la résolution fréquentielle définie comme étant :

$$\Delta f = \frac{F_e}{N_e} = \frac{1}{T_{acq}} \quad \text{II.2}$$

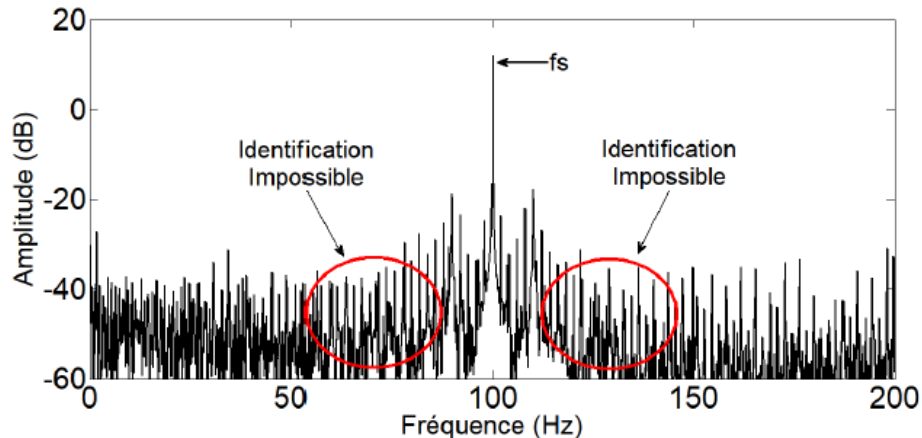
Où

$F_e$  : Fréquence d'échantillonnage.

$T_{acq}$  : Temps d'acquisition.

## II.4 Position du problème et solutions proposées

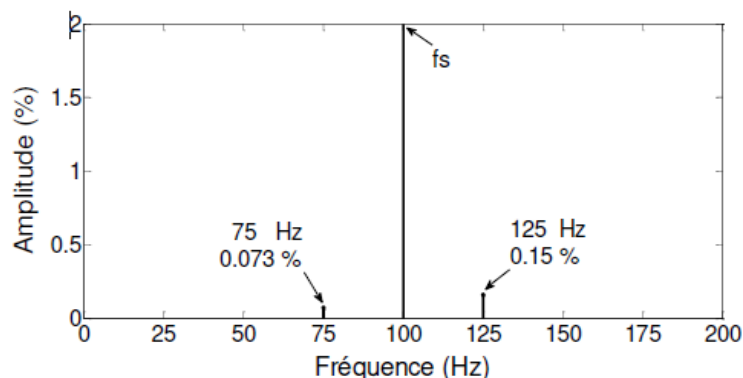
Nous avons souligné l'importance et l'utilité de l'analyse du courant statorique pour le diagnostic des défauts MSAP. Malheureusement, l'utilisation d'un onduleur, indispensable pour l'alimentation de la MSAP, génère un bruit considérable sur ce spectre du courant en raison de la commutation de ses IGBT. La lecture d'un tel spectre est illisible ce qui rend la détection des défauts quasiment impossible (voir figure II.4).



**Figure II.4** Spectre du courant statorique de la MSAP

De plus, cette technique présente un inconvénient majeur qui consiste à la création d'harmoniques aux mêmes fréquences pour différents défauts, ce qui rend cette technique inefficace dans ces situations. Pour résoudre ce problème, nous suggérons une approche efficace pour perfectionner le diagnostic et la distinction entre les signatures fréquentielles des défauts d'excentricité et de désaimantation qui affectent les MSAP, Cette approche se divise en deux parties :

1. Pour remédier à cette situation et optimiser la clarté du spectre comme indiqué dans la Figure II.5, nous avons fait appel à un algorithme élémentaire nommé Algorithme de Localisation de Maxima (ALM), Cet algorithme permet de localiser numériquement l'amplitude maximum correspondant à l'harmonique caractéristique du défaut sur la bande d'analyse sélectionnée.

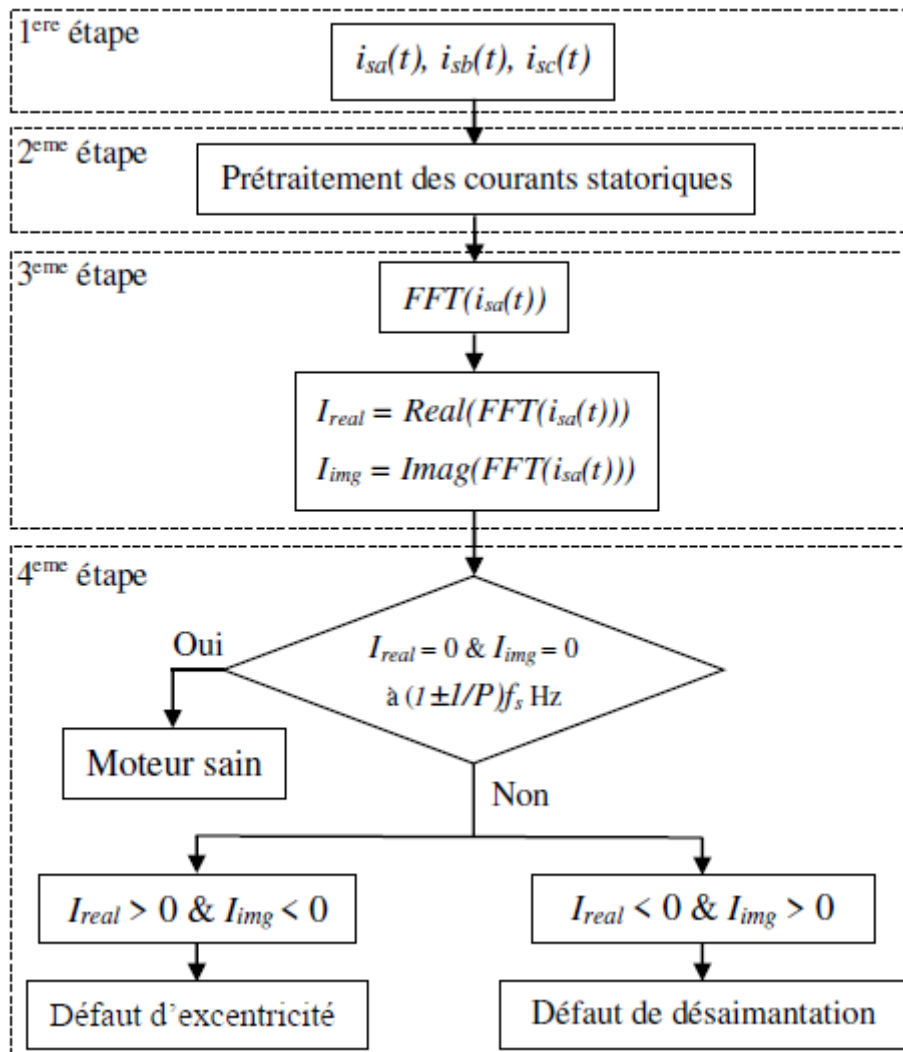


**Figure II.5** Spectres du courant statorique de la phase "a", obtenu par la DSP classique associé à l'algorithme ALM sur la bande fréquentielle

- Nous avons suivi simultanément les signes des parties réelle et imaginaire des harmoniques caractéristiques de ces deux défauts « d'excentricité et désaimantation », obtenues à partir de la transformée de Fourier du courant statorique.

### II.4.1 Séparation entre le défaut d'excentricité et le défaut de désaimantation

Cette approche est constituée de quatre étapes principales comme le montre l'organigramme de la Figure II.6.



**Figure II.6** Organigramme de l'approche proposée

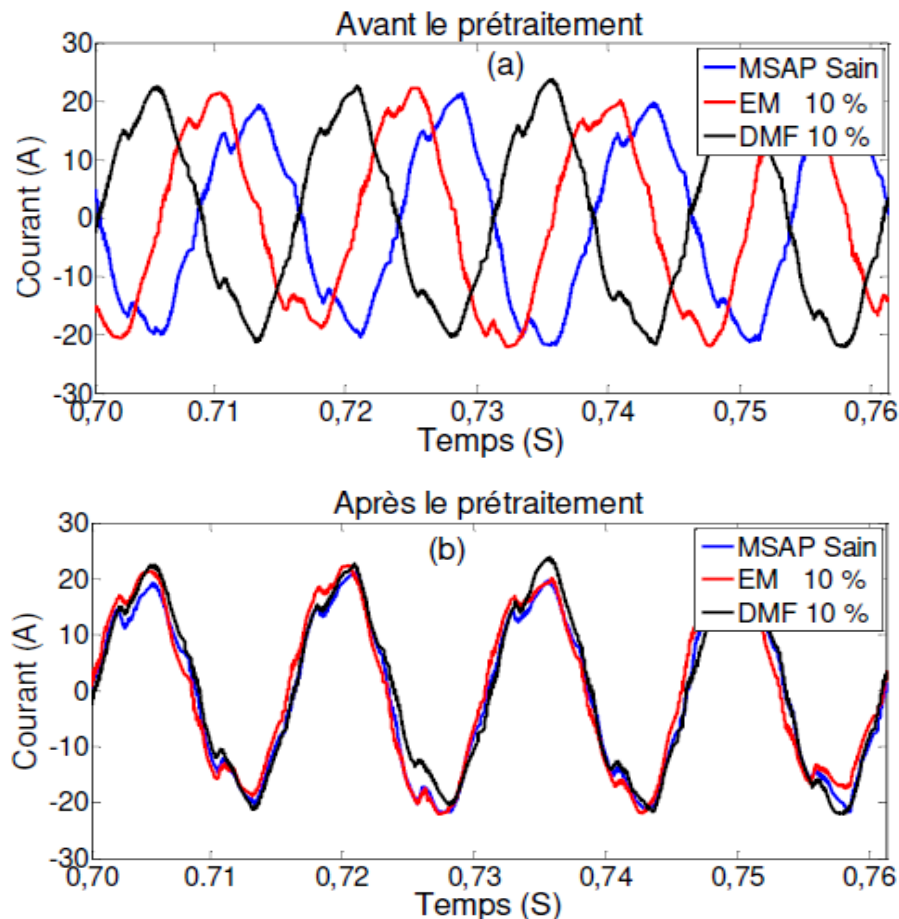
1<sup>ère</sup> étape : Acquisition des signatures des trois courants statoriques du MSAP

Cette étape consiste à introduire les signaux des trois courants statoriques.

2<sup>ème</sup> étape : Prétraitement des courants statoriques

Cette approche nécessite un prétraitement du courant statorique pour uniformiser les signaux utilisés de telle sorte que l'état initial soit la même comme le montre la Figure. II.7. (b),

Cela nous donne la possibilité d'éliminer le déphasage entre les différents signaux de la même phase comme le montre la Figure. II.7. (a), car ce déphasage affecte la fiabilité de l'approche proposée. Selon les deux graphiques II.7. (a) et II.7. (b), ce processus de prétraitement implique le déplacement des deux signaux (rouge et bleu) jusqu'à l'instant de début du premier signal en noir, afin d'éliminer tout décalage entre les trois courants comme illustré dans la Figure II.7.(b).



**Figure II.7** Courant statorique de la phase " a ", pour les différents modes de fonctionnements, (a) avant et (b) après du prétraitement.

Il convient également de souligner que la sélection du nombre d'échantillons est cruciale pour une mise en œuvre optimale de l'approche suggérée. Ce choix se fait à l'aide d'une simple opération mathématique qui utilise les fréquences spécifiques du défaut et la fréquence d'échantillonnage. Ce choix est présenté comme suit :

Dans les cas des tests expérimentaux. Les signatures des défauts de désaimantation et d'excentricité se trouvent respectivement aux fréquences de 75 Hz et 125 Hz. Ainsi, pour une fréquence d'échantillonnage de  $f_e = 3$  kHz, nous obtenons :

$$N_e = \frac{f_e}{75} = \frac{3000}{75} = 40 \text{ Échantillon / période}$$

$$N_e = \frac{f_e}{125} = \frac{3000}{125} = 24 \text{ Échantillon / période}$$

Donc, pour un meilleur suivi de ces deux harmoniques (75 Hz et 125 Hz), il est préférable de choisir un nombre d'échantillons multiples de 40 et de 24.

### 3ème étape : Transformée de Fourier du courant statorique

La transformée de Fourier (TF) est un outil mathématique très puissant, permettant d'extraire des informations utiles d'un signal dans le domaine fréquentiel. C'est une méthode non paramétrique, qui se prête bien à l'analyse des phénomènes stationnaires. La TF est exprimée par la relation suivante [33]:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} \cdot dt$$

Où :  $X(f)$  représente la TF d'un signal  $x(t)$ , qui dans notre cas c'est le courant statorique.

Par ailleurs, la transformée de Fourier est une fonction complexe qui peut être exprimée sous forme exponentielle, ou sous forme algébrique, comme l'illustre l'équation.

$$X(f) = |X(f)| \cdot e^{j\theta(f)}$$

Où :  $|X(f)|$  et  $\theta(f)$  sont respectivement le module et la phase de  $X(f)$ .

$$X(f) = A(f) + j \cdot B(f)$$

Où  $A(f)$  et  $B(f)$ , sont respectivement les parties réelle et imaginaire de  $X(f)$ , Avec :

$$A(f) = \text{Real}(X(f))$$

$$B(f) = \text{Imag}(X(f))$$

L'approche proposée est basée sur le suivi simultané des composantes réelles et imaginaires de  $X(f)$ .

### 4ème étape : Exploitation des composantes réelles et imaginaires dans la séparation entre les défauts de désaimantation et d'excentricité

Cette distinction se fait par une simple observation des signes des harmoniques typiques des défauts «  $(1 \pm 1/P)fs$  » dans les deux graphiques (réel et imaginaire) de la transformée de Fourier du courant statorique. Notre recherche indique que, en présence d'un défaut d'excentricité, les harmoniques de part et d'autre du fondamental du spectre imaginaire se trouvent dans la zone négative. Dans le spectre de la composante réelle, l'harmonique «  $(1-1/P)fs$  » se trouve dans la zone positive, tandis que celle de «  $(1+1/P)fs$  » est placée dans la zone négative. En revanche, pour le cas de l'absence de désaimantation, les deux harmoniques, positionnées de chaque côté du fondamental, se trouvent dans la zone positive sur le graphique représentant la composante imaginaire et dans la zone négative sur le graphique illustrant la composante réelle.

## II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on s'est intéressé au développement des deux approches de diagnostic des défauts des moteurs électriques, basées sur les méthodes dites sans modèle précisément les méthodes de traitements de signal, en utilisant comme grandeurs mesurables le courant statorique.

En premier temps, on a vu les différentes méthodes et approche de diagnostic pour les cas des défauts des moteurs synchrone a aimant permanent ainsi que leurs utilisations parmi eux les approches avec modèles et sans modèles. Ensuite on s'intéresse à notre méthode proposée pour simplifier la distinction entre le défaut d'excentricité et le défaut désaimantation base sur les parties imaginaires et réelles.

Par conséquent, le chapitre suivant sera consacré aux validations de nos proposition.

**Chapitre III :**  
**Résultats de Simulation**  
**et**  
**Validation Expérimentale**

### III.1 Introduction

A travers le chapitre précédents, nous avons introduit l'approches proposer de traitement du signal qui sera utilisées pour discriminer entre les défauts du moteur synchrone à aimant permanent (MSAP). Cette approche est basée sur l'estimation de la DSP en utilisant l'algorithme de ALM.

L'objectif de ce chapitre est de vérifier, dans un premier temps, par simulations les performances de méthodes proposées en utilisant Matlab. Ensuite, valider cette dernière sur des signaux réels des moteurs synchrone à aimant permanent. L'analyse concernera deux types de défaut le défaut d'excentricité et le défaut désaimantation dans le moteur synchrone à aimant permanent (MSAP). Avant de tester cette méthode de diagnostic sur les différents modes de fonctionnement choisis, une description du banc d'essais est nécessaire.

### III.2 Description de bancs d'essai

Le banc d'essai de moteur synchrone à aimant permanent utilise un onduleur (nécessaire à l'alimentation de la MSAP) (voir Figure III.1). En effet, un redresseur (AC-DC) associé à un Onduleur (DC-AC) à MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) sert à alimenter notre moteur (MSAP).

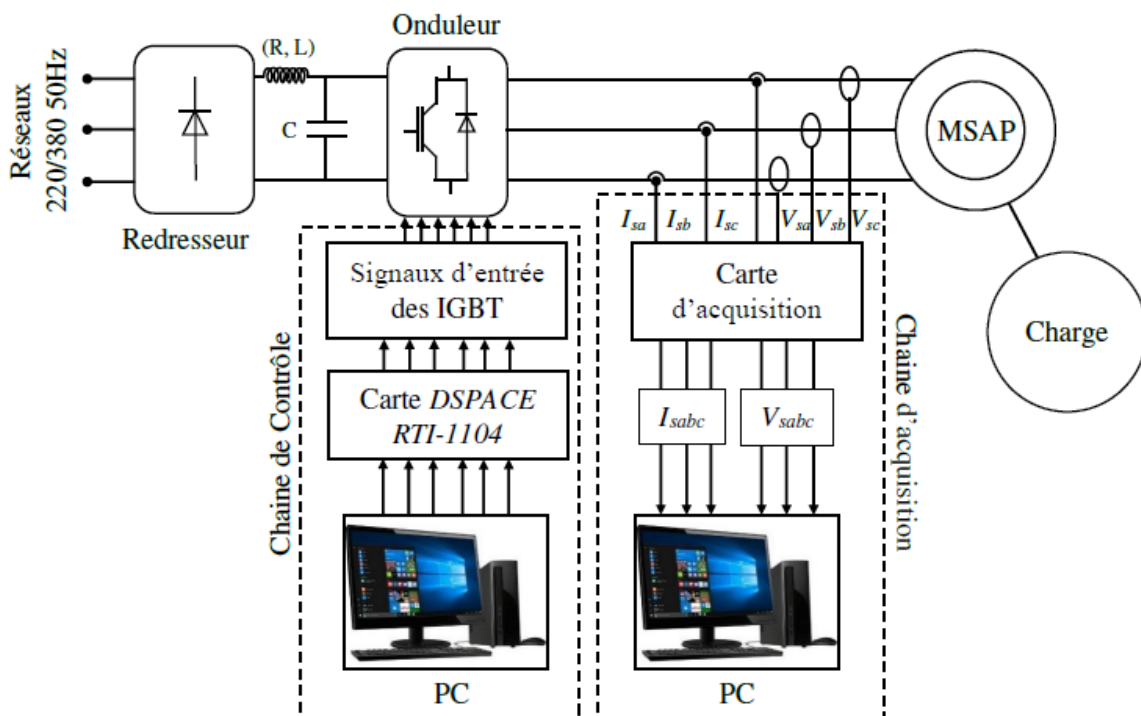


Figure III.1 Schéma synoptique du banc d'essai réalisé – MSAP

### III.2.1 Création et signatures des défauts étudiés

#### III.2.2.1 Défaut d'excentricité

La génération de défaut d'excentricité demande une précision élevée en raison de l'épaisseur de l'entrefer. Il existe de nombreuses méthodes pour générer ce genre de défaut. Nous savons que tout problème affectant la bague interne du roulement entraîne une excentricité dynamique, tandis que tout défaut associé à la bague externe provoque une excentricité statique. C'est pourquoi notre système repose sur l'ajustement des bagues (internes et externes) du roulement afin d'instaurer avec précision le défaut d'excentricité dans le MSAP. L'intention de ce dispositif est d'intégrer des anneaux additionnels ayant une forme elliptique et des dimensions assez exactes pour prévenir l'usure entre le stator et le rotor. Pour générer le défaut d'excentricité statique, nous utilisons une bague à forme ovale placée entre la bague extérieure du roulement et le flasque, tout en conservant les dimensions de la bague intérieure. Par ailleurs, la mise en place du défaut d'excentricité dynamique suit le même processus que le cas précédent, à l'exception du maintien des dimensions de la bague externe et de l'installation d'une bague de forme ovale entre l'axe rotatif et la bague interne du roulement. La Figure III.2 illustre une image des roulements comprenant les bagues additionnelles du mécanisme de défaut d'excentricité.

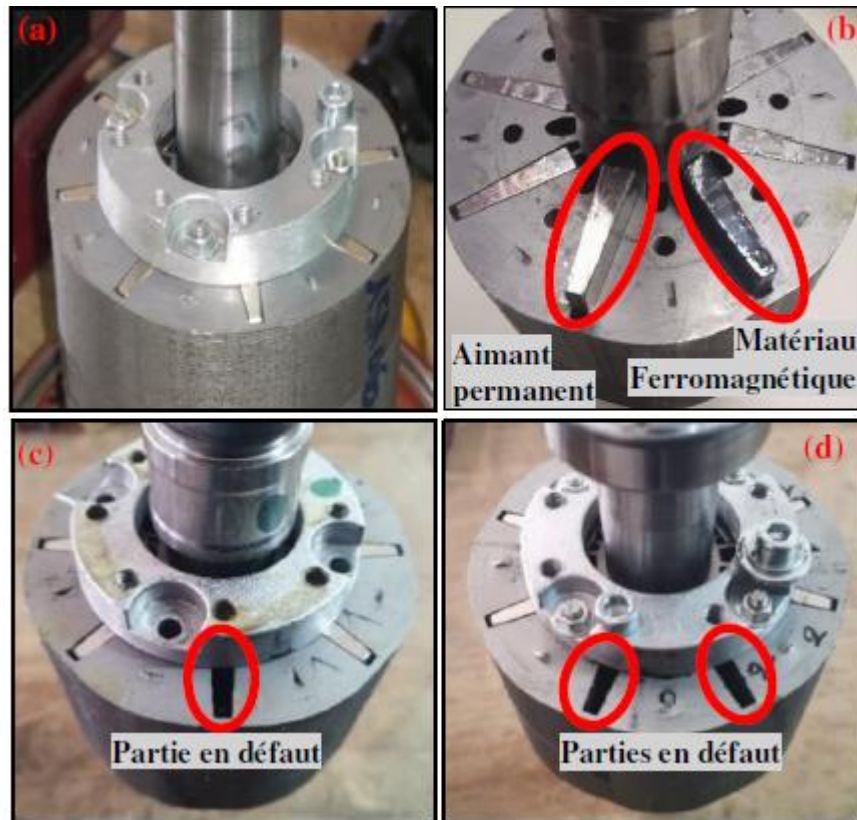


Figure III.2 Procédure de création du défaut d'excentricité

#### III.2.2.2 Défaut de désaimantation

Le défaut de désaimantation dans les MSAP est généré par diverses méthodes, en fonction de la configuration du rotor (aimants en surface, aimants insérés, etc.). Selon notre recherche, la configuration du rotor est de type inséré avec une concentration de flux, comme illustré par la Figure III.3 (a). La création du défaut de désaimantation dans ce cas est réalisée avec différentes sévérités en remplaçant un ou plusieurs aimants situés aux rotors par un matériau ferromagnétique comme le montre la Figure. III.3. (b). Le remplacement de ces aimants par le matériau ferromagnétique est réalisé afin de garder une certaine aimantation à l'aide du matériau utilisé et de maintenir le même

entrefer dans la machine même en présence du défaut de désaimantation.



**Figure III.3** Procédure de création du défaut de désaimantation

Pour valider les méthodes de diagnostic proposées dans ce travail, l'analyse des résultats est effectuée pour les trois modes de fonctionnement de la MSAP suivants :

1. MSAP à l'état sain (Sans défektivité apparente).
2. MSAP avec défaut d'excentricité à différent degré de sévérité.
3. MSAP avec défaut de désaimantation à différent degré de sévérité.

### III.2.2.3 Signatures des défauts étudiés

Théoriquement, le défaut de la bague externe du roulement, le défaut d'excentricité et le défaut de désaimantation se manifestent par la création des signatures fréquentielles particulières au niveau du spectre du courant statorique, Le Tableau suivant donne la signature fréquentielle des deux défauts étudiés selon les caractéristiques de la MSAP (voire annexe) et la fréquence d'alimentation utilisée ( $f_s=100$  Hz).

Types de défauts	Signatures fréquentielles	
	1 <sup>ere</sup> signature	2 <sup>eme</sup> signature
Défaut d'excentricité	75 Hz	125 Hz
Défaut désaimantation	75 Hz	125 Hz

**Table III.1** Signatures fréquentielles des défauts étudiés

Les signatures des défauts étudiés sont localisées autour de la fréquence fondamentale. Donc pour une meilleure lisibilité du spectre, l'analyse spectrale sera effectuée uniquement sur la bande fréquentielle [0 Hz – 130 Hz].

### III.3 Validation de l'approche proposée à travers des signaux de simulation

#### a. Analyse des courants statoriques par la DSP classique

Pour démontrer l'efficacité de la méthode suggérée, nous débutons par une étude spectrale des courants statoriques grâce à la technique traditionnelle du DSP dans divers modes d'opération : sain et en présence des défauts de désaimantation et d'excentricité. D'après l'analyse théorique, les harmoniques liées aux défauts d'excentricité et de désaimantation se trouvent respectivement de part et d'autre de l'harmonique fondamentale dans le spectre du courant statorique aux fréquences " $(1 \pm 1/P) f_s$ ".

##### 1) *Fonctionnement du moteur sain*

La Figure III.4 illustre le spectre du courant statorique de la phase « a », lorsqu'il fonctionne normalement sous une charge nominale. À partir de cette illustration, il est évident qu'aucune marque distincte n'est observée autour de l'harmonique fondamentale, ce qui paraît sensé pour un moteur jugé en bon état. Ce spectre sera utilisé comme référence pour tous les modes de fonctionnement ultérieurs.

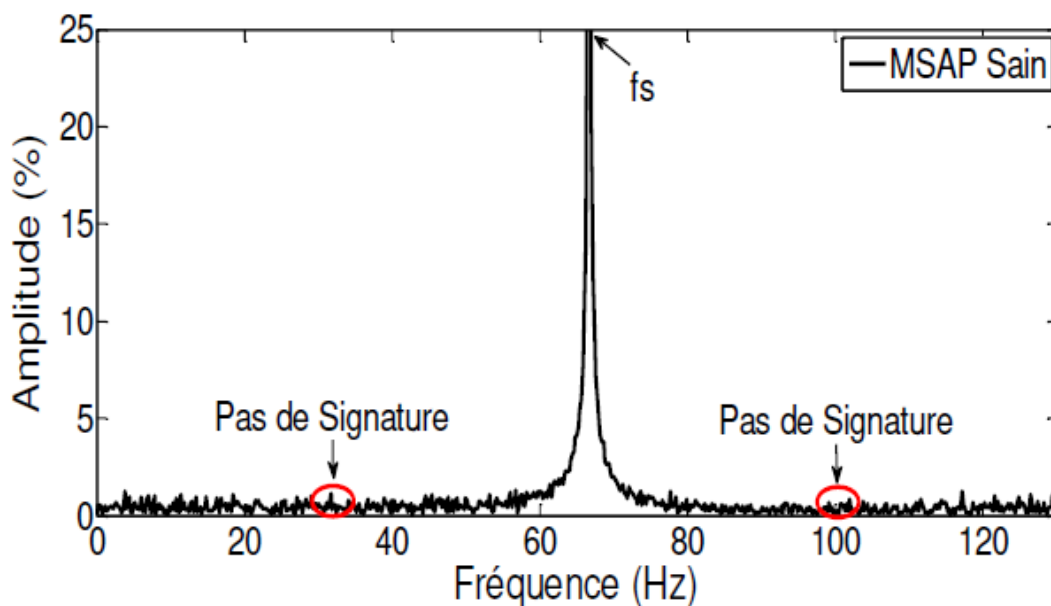
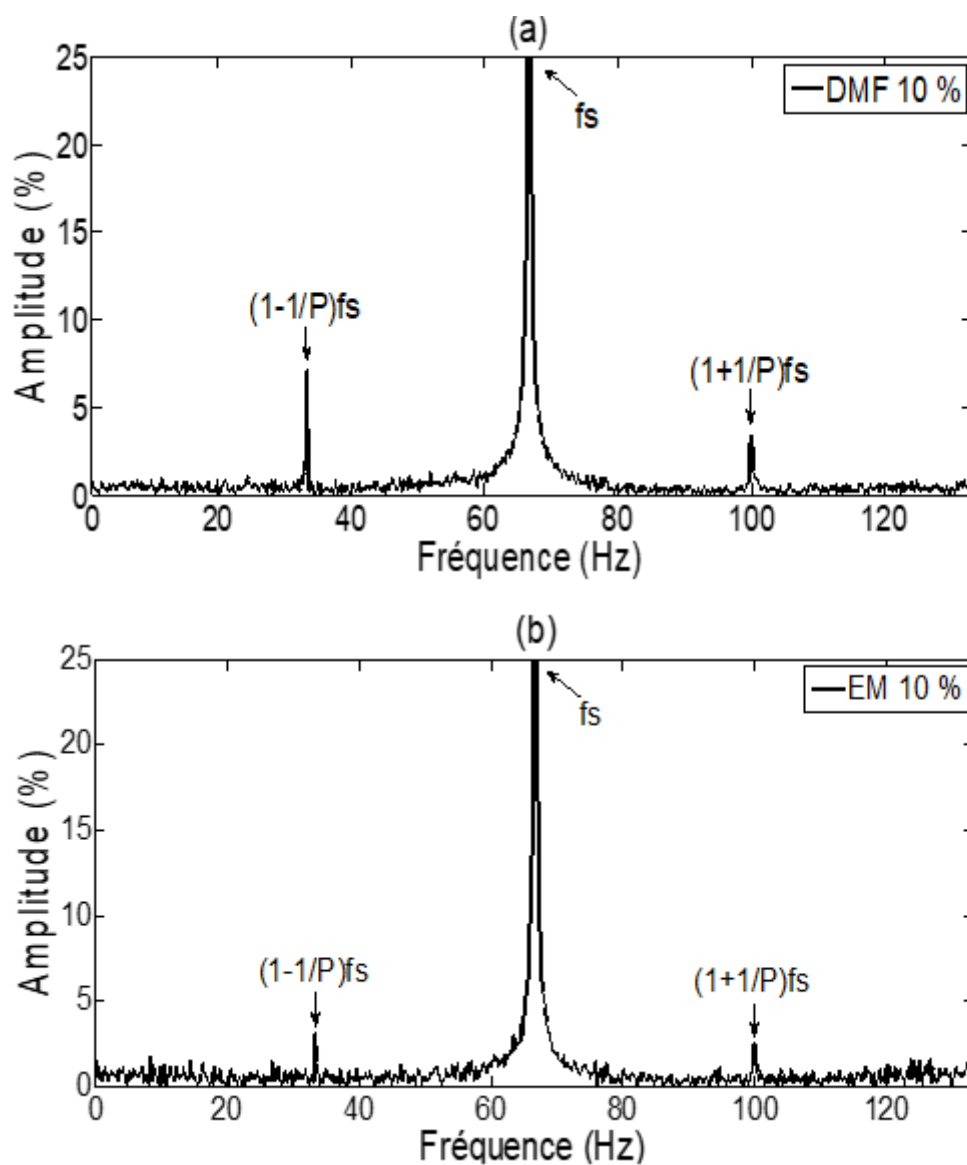


Figure III.4 Fonctionnement du moteur sain : spectres du courant de la phase "a"

2) *Fonctionnement du moteur en présence des défauts de désaimantation et d'excentricité*

Les graphiques III.5 (a) et III.5 (b) illustrent respectivement les spectres du courant de stator pour la phase « a », en cas de désaimantation de 10 % et d'excentricité de 10 %.

Le graphique présenté indique qu'il n'y a presque aucune différence entre les deux spectres (III.5 (a) et III.5 (b)). Cela signifie que la détection des harmoniques à des fréquences " $(1\pm 1/P)fs$ " ne permet pas de déterminer avec assurance l'existence de l'un de ces défauts. C'est pourquoi nous examinerons dans la section suivante l'application de la méthode suggérée pour différencier avec précision les effets générés par le défaut de désaimantation de ceux engendrés par le défaut d'excentricité.



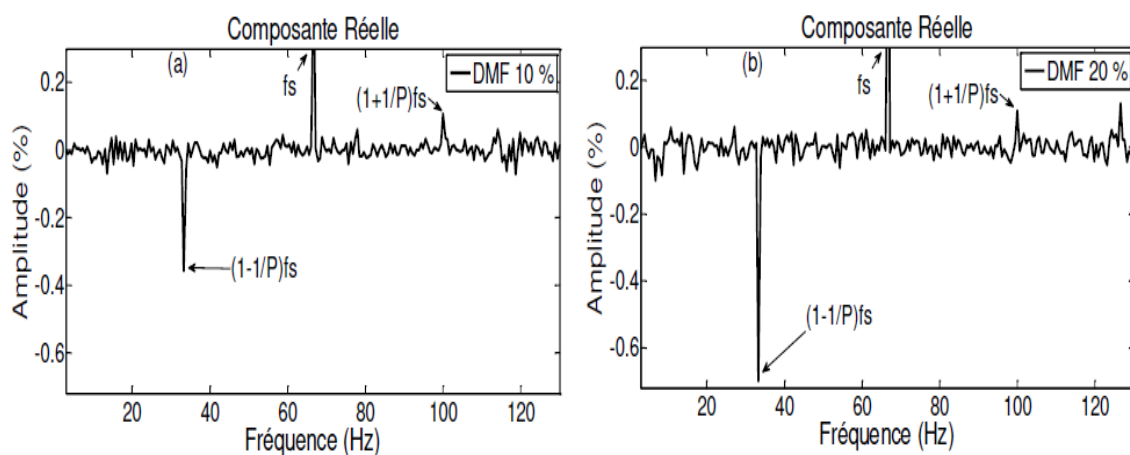
**Figure III.5** Spectres du courant statorique de la phase "a" : (a) pour une désaimantation de 10% (b) pour une excentricité de 10%

## b. Séparation entre les défauts de désaimantation et d'excentricité par l'utilisation de l'approche proposée

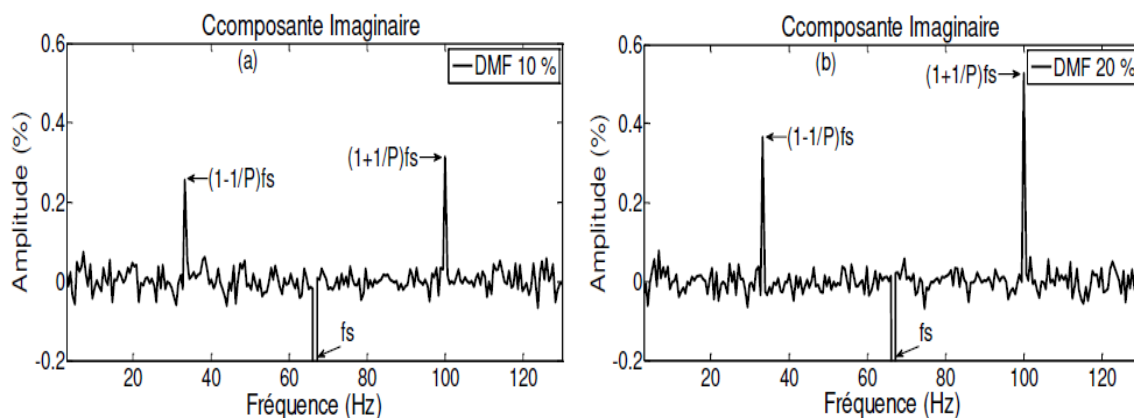
Cette méthode repose sur la surveillance simultanée des harmoniques spécifiques à ces deux défauts, obtenue grâce au spectre de fréquence de la composante réelle et à la composante imaginaire de la TRF du courant statorique.

### 1) *Fonctionnement du moteur en présence du défaut de désaimantation*

Les Figures III.6 et III.7, représentent respectivement, les spectres des composantes réelles et imaginaires de la transformé de Fourier du courant statorique de la phase " a ", pour une désaimantation de 10 % et de 20 %.



**Figure III.6** Spectres des composantes réelles de la TF du courant statorique : pour une désaimantation de 10% (a) et de 20% (b)



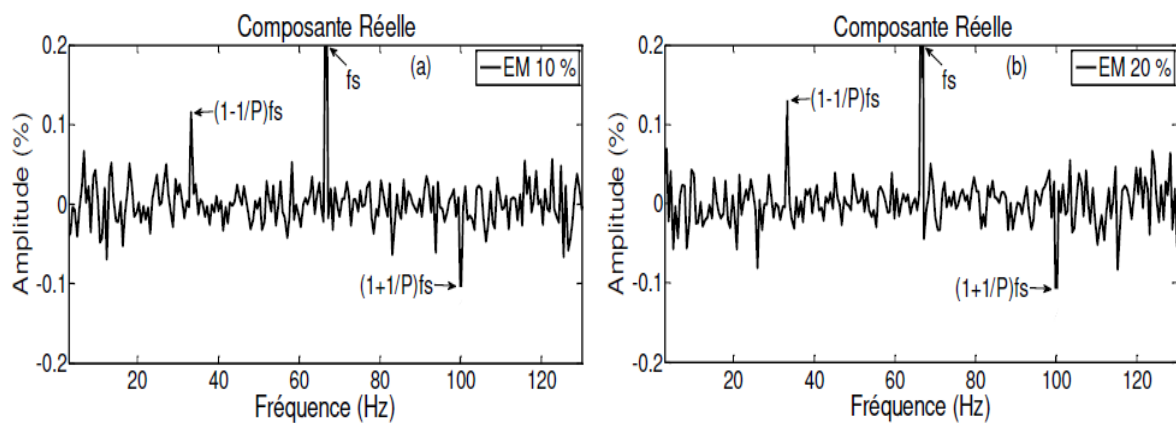
**Figure III.7** Spectres des composantes imaginaires de la TF du courant statorique : pour une désaimantation de 10% (a) et de 20 % (b)

Il est évident que, dans le spectre de la composante imaginaire, les harmoniques qui se situent de chaque côté de la fréquence fondamentale sont toutes présentes dans la zone positive. Toutefois, dans le spectre de la composante réelle, l'harmonique à gauche de la fondamentale montre une amplitude négative, alors que celle à droite démontre une amplitude positive.

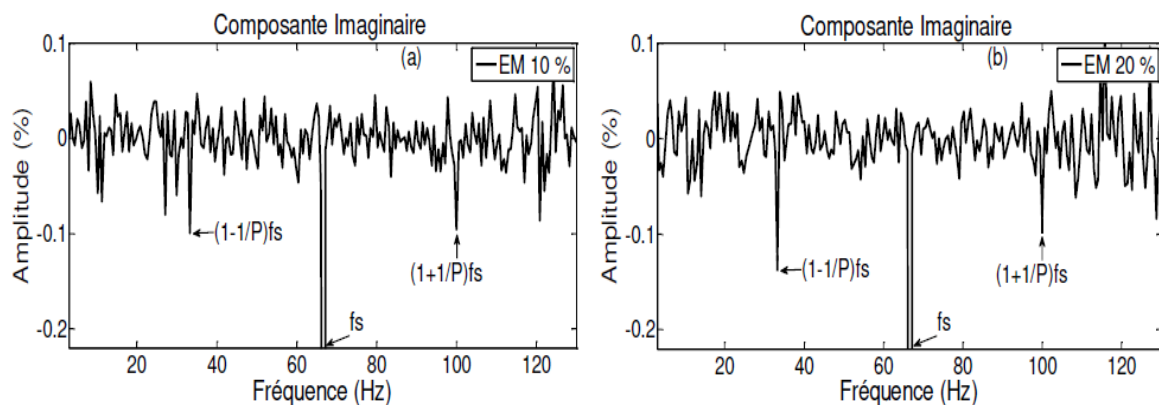
2) *Fonctionnement du moteur en présence du défaut d'excentricité*

Les figures III.8 et III.9, illustrent respectivement les spectres des composantes réelles et imaginaires de la transformation de Fourier du courant statorique de la phase « a », pour une excentricité de 10% et de 20%.

À la différence du défaut de désaimantation, les graphiques III.8 et III.9 démontrent que les signes des harmoniques, de part et d'autre de la fréquence fondamentale du spectre de la composante imaginaire, se trouvent dans la section négative. De façon similaire, concernant les harmoniques qui entourent la fréquence fondamentale dans le spectre de la composante réelle, l'harmonique à gauche de la fondamentale a un signe positif, alors que celle à droite possède un signe négatif. Ce comportement est exactement contraire à celui constaté en cas de défaut de désaimantation.



**Figure III.8** Spectres des composantes réelles de la TF du courant statorique pour excentricité de 10 % (a) et de 20 % (b)



**Figure III.9** Spectres des composantes imaginaires de la TF du courant statorique pour une excentricité de 10 % (a) et de 20% (b)

Voici le tableau suivant qui montre les différents signes des harmoniques caractéristiques des défauts " $(1 \pm 1/P) fs$ " dans les deux tracés selon l'état de la machine.

	Défaut de désaimantation		Défaut d'excentricité	
	Réelle	Imaginaire	Réelle	Imaginaire
$(1-1/P)f_s$	-	+	+	-
$(1+1/P)f_s$	+	+	-	-

**Table III.2** Signes des tracées réelles et imaginaires dans les différents cas de fonctionnement

Selon ce tableau, il est préférable de suivre l'harmonique «  $(1-1/P)f_s$  » pour les deux composantes réelles et imaginaires de la transformation de Fourier du courant statorique afin d'établir une distinction précise entre le défaut de désaimantation et l'autre de l'excentricité.

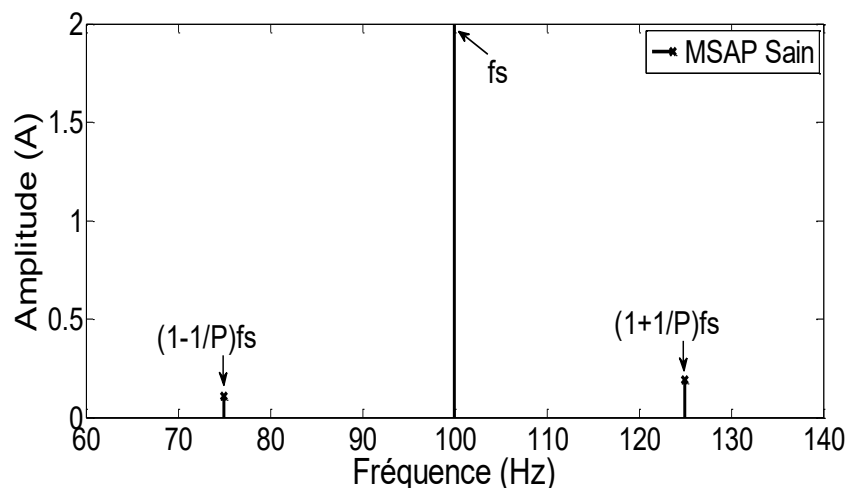
### III.4 Validation de l'approche proposée à travers des signaux expérimentaux

#### a) Analyse des courants statoriques par la DSP classique

Nous débutons avec la méthode traditionnelle d'évaluation de la DSP dans les différents modes de fonctionnement : sain et en présence de défauts tels que la désaimantation et l'excentricité.

##### 1) Fonctionnement du moteur sain

Voici la représentation suivante qui montre le spectre du courant statorique de la phase « a », dérivé de l'estimation de la DSP classique en association avec l'algorithme ALM. On observe que deux harmoniques, qui se trouvent de chaque côté de l'harmonique fondamentale, apparaissent aux fréquences identiques à celles des harmoniques liées au problème d'excentricité, à savoir 75 Hz et 125 Hz. Leurs amplitudes, indiquées en pourcentage, sont d'environ 10 % et 20 % respectivement. Ceci est attribué à l'existence d'une excentricité inhérente, même dans le contexte d'un MSAP qui est sain et tout neuf.

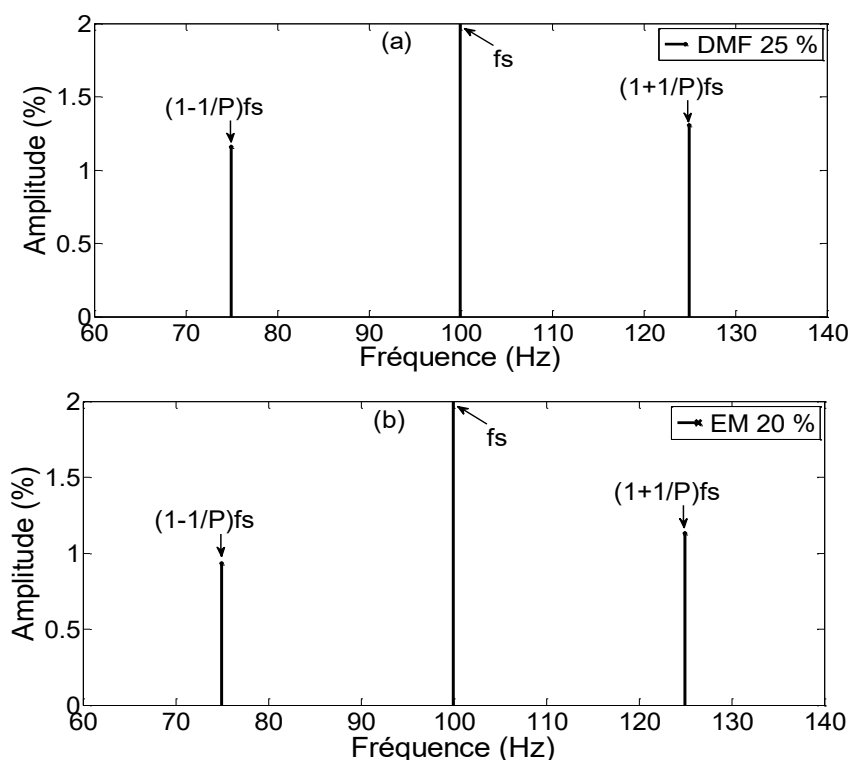


**Figure III.10** Fonctionnement des moteurs sains spectres du courant statorique obtenu par la DSP classique associé à l'algorithme ALM

### 2) *Fonctionnement du moteur en présence des défauts de désaimantation et d'excentricité*

Les spectres du courant de la phase « a », obtenus grâce à l'estimation de la DSP conventionnelle liée à l'algorithme ALM pour une désaimantation de 25% et une excentricité de 20%, sont illustrés respectivement dans les Figures III.11 (a) et III.11 (b).

Comme on peut l'observer, les deux spectres sont pratiquement identiques. Cela signifie que la détection des harmoniques aux fréquences «  $(1 \pm 1/P)fs$  » ne permet pas d'affirmer avec certitude l'existence de l'un de ces défauts. C'est pourquoi, dans la section suivante, nous avons exploré l'application de l'approche suggérée pour faire une distinction précise entre les effets causés par le défaut de désaimantation et ceux liés au défaut d'excentricité.

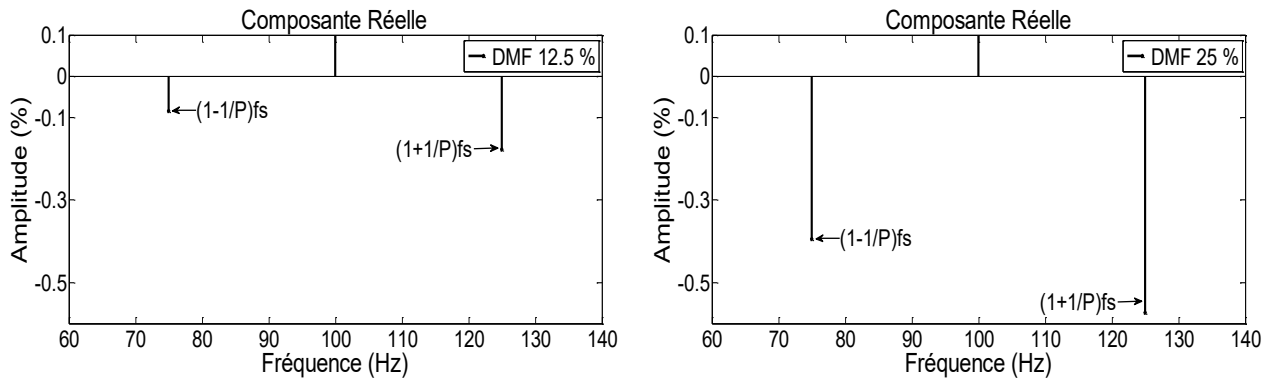


**Figure III.11** Spectres du courant statorique obtenu par l'estimation de la DSP classique associé à l'algorithme ALM : (a) pour une désaimantation de 25%/ (b) pour une excentricité de 20%

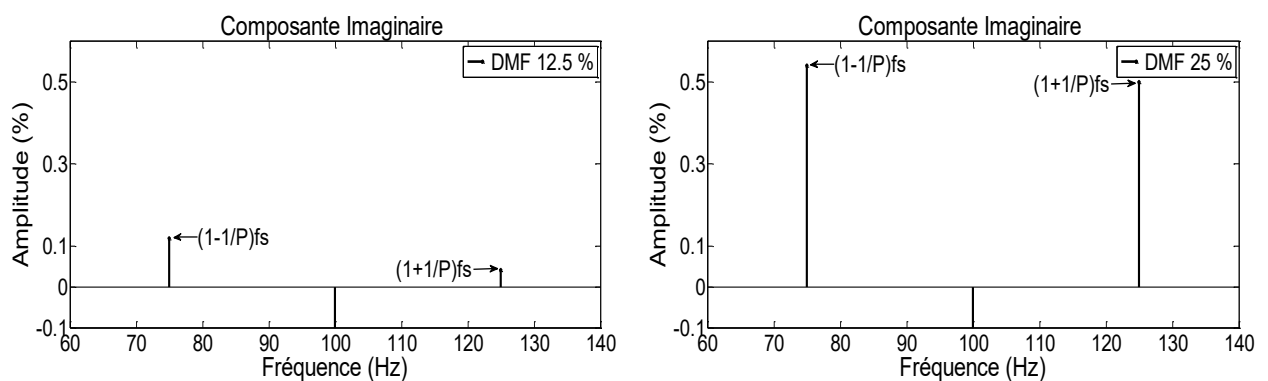
## b) Séparation entre les défauts de désaimantation et d'excentricité par l'utilisation de l'approche proposée

### 1) *Fonctionnement du moteur en présence du défaut de désaimantation*

Les Figures III.12 et III.13 illustrent respectivement les spectres des composantes réelles et imaginaires de la transformation de Fourier du courant statorique, déduits via l'estimation classique de la DSP associée à l'algorithme ALM pour une désaimantation de 12,5 % et 25 %.



**Figure III.12** Spectres des composantes réelles de la TF du courant statorique de la phase "a" : pour une désaimantation de 12,5% (a) et de 25%(b)



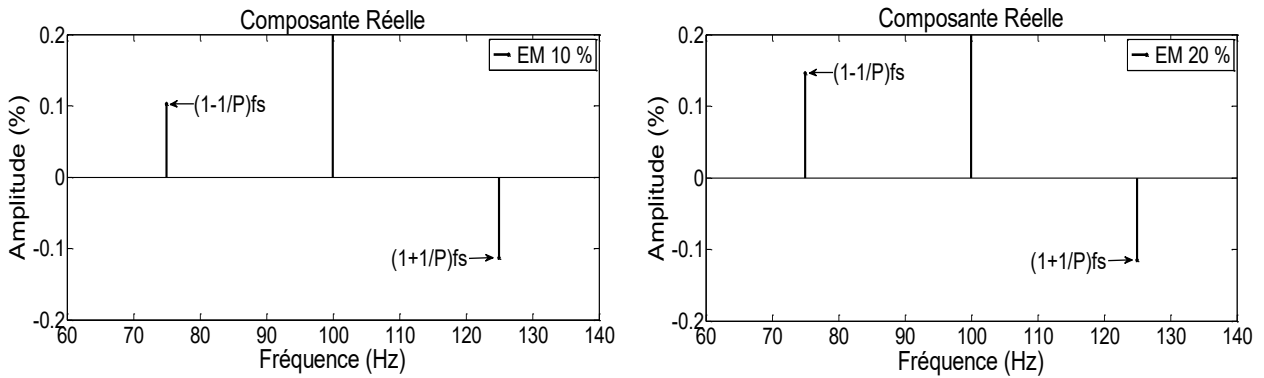
**Figure III.13** Spectres des composantes imaginaires de la TF du courant statorique de la phase "a" pour une désaimantation de 12,5 (a) et de 25%(b)

Suite à ces observations, on note que les harmoniques, tant en amont qu'en aval du fondamental du spectre de la composante réelle, se retrouvent dans la section négative (voir Figure III.12). Tandis que les indices des harmoniques, de part et d'autre du composant fondamental du spectre de la composante imaginaire, se trouvent dans la section positive (voir Figure III.13).

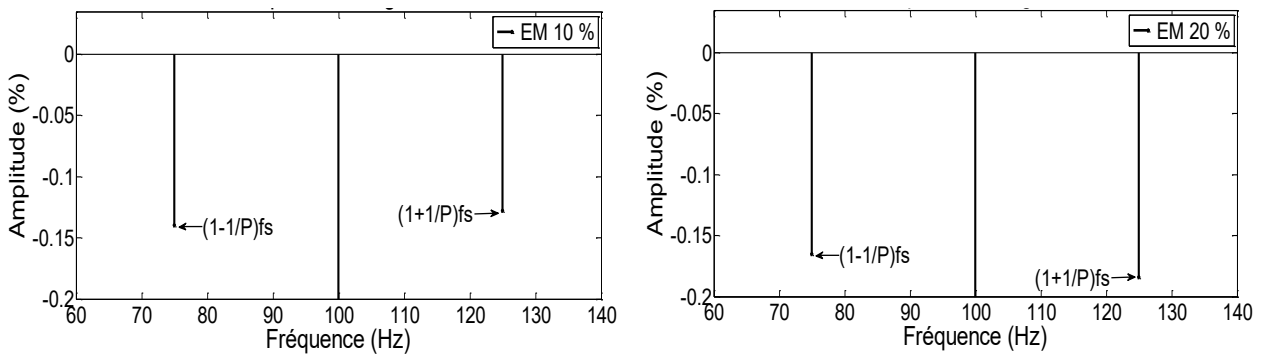
## 2) *Fonctionnement du moteur en présence du défaut d'excentricité*

Les figures III.14 et III.15 représentent respectivement les spectres des composants réels et imaginaires de la TF du courant statorique, dérivés de l'estimation classique de la DSP associée à l'algorithme ALM pour une excentricité de 10 % et 20 %.

Contrairement au défaut de désaimantation, les Figures montrent que les signes des harmoniques de part et d'autre du fondamental du spectre de la composante imaginaire sont situés dans la partie négative. De même pour les harmoniques de part et d'autre du fondamental du spectre de la composante réelle, l'harmonique situé à gauche du fondamental est de signe positif, alors que celle situé à droite du fondamental est de signe négatif.



**Figure III.14** Spectres des composantes réelles de la TF du courant statorique de la phase "a" pour une excentricité de 10% (a) et de 20%(b)



**Figure III.15** Spectres des composantes imaginaires de la TF du courant statorique de la phase "a" pour une excentricité de 10%(a) et de 20%(b)

Le tableau suivant montre les différents signes des harmoniques caractéristiques des défauts " $(1\pm 1/P)f_s$ " dans les deux tracées selon l'état de la machine.

	Défaut de désaimantation		Défaut d'excentricité	
	Réelle	Imaginaire	Réelle	Imaginaire
$(1-1/P)f_s$	-	+	+	-
$(1+1/P)f_s$	-	+	-	-

**Table III.3** signes des tracées réelles et imaginaires dans les différents cas de fonctionnement

D'après ce tableau, on conclut que le suivi de l'harmonique " $(1-1/P)f_s$ ", nous permet par une simple comparaison de signe de séparer avec précision entre le défaut de désaimantation et le défaut d'excentricité.

D'après les résultats obtenus, il est clair que l'approche proposée permet, de manière très simple:

- ❖ Le diagnostic des défauts d'excentricité et de démagnétisation.
- ❖ Le discernement entre leurs signatures fréquentielles.
- ❖ Le suivi de leurs sévérités.

### **III.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté une innovante approche pour faire la séparation entre les défauts et les phénomènes produisant les mêmes signatures fréquentielles dans le spectre du courant statorique du MSAP (discrimination entre le défaut de désaimantation et le défaut d'excentricité)

Cette approche est basée sur le suivi simultané des parties réelle et imaginaire des harmoniques caractéristiques de ces défauts, obtenues à partir de la transformé de Fourier du courant statorique. Les résultats obtenus par simulation et expérimentalement montrent l'efficacité de cette nouvelle approche grâce à la simplicité de la procédure utilisée. Cette procédure est basée sur l'analyse des parties réelles et imaginaires des signatures fréquentielles des deux défauts traités. Ainsi un simple suivi des signes de ces deux signatures (parties réelles et imaginaires), permet une meilleure lisibilité du spectre et une rapidité de décision en ce qui concerne la distinction entre la signature du défaut de désaimantation et celle de l'excentricité.

# *Conclusion générale*

## Conclusion générale

Le travail mené dans cette mémoire a été consacré à la discrimination des défauts affectant les moteurs synchrones à aimants permanents (MSAP), à travers une approche fondée sur l'analyse spectrale du courant statorique. L'objectif principal a été de développer une méthode efficace permettant de distinguer des défauts qui génèrent des signatures fréquentielles similaires, ce qui constitue un véritable défi dans le domaine du diagnostic des machines électriques.

Dans un premier temps, une revue générale a été présentée concernant le fonctionnement des MSAP, leurs avantages et les principaux défauts susceptibles de les affecter. Parmi ceux-ci, la désaimantation des aimants permanents et l'excentricité du rotor sont particulièrement critiques car ils peuvent apparaître progressivement et engendrer des effets néfastes sur la performance, tout en étant difficiles à identifier de manière isolée. Le chapitre introductif a également souligné l'importance croissante des techniques de maintenance conditionnelle et du diagnostic non-invasif, en particulier via l'analyse des signaux électriques, comme le courant statorique, qui sont facilement accessibles dans les systèmes d'entraînement modernes.

Le second chapitre a été consacré à l'étude des différentes approches de diagnostic basées sur l'analyse fréquentielle. Il a été démontré que plusieurs défauts notamment la désaimantation, l'excentricité, peuvent générer des composantes harmoniques proches, voire identiques, dans le spectre du courant statorique. Ce chevauchement fréquentiel constitue une difficulté majeure pour les techniques de diagnostic classiques. Afin de surmonter cette limitation, on a vu une approche conçue pour faire la distinction entre la désaimantation et l'excentricité, deux défauts présentant des composantes fréquentielles quasi identiques. Elle s'appuie sur le suivi des composantes réelle et imaginaire des harmoniques caractéristiques extraites via la transformée de Fourier appliquée au courant statorique. L'idée innovante réside dans l'analyse du signe de ces composantes, qui permet une discrimination rapide, claire et fiable entre les deux défauts, sans recours à des modèles complexes ni à des capteurs supplémentaires.

Le dernier chapitre a été consacré à la validation expérimentale de la méthode proposée. Les essais ont été menés sur un banc d'essai réel, dans des conditions contrôlées, pour différents états de fonctionnement du moteur : sain, avec désaimantation, et avec excentricité. Les mesures ont été réalisées en régime permanent à 1500 tr/min, avec un temps d'acquisition une fréquence d'échantillonnage, assurant une résolution fréquentielle suffisante. Les résultats expérimentaux ont confirmé les résultats obtenus en simulation : la méthode proposée offre une lisibilité améliorée du spectre, permet une détection fiable des défauts, et réduit significativement le risque de confusion entre des anomalies aux signatures spectrales proches.

A la lumière des résultats obtenus dans cette mémoire, un certain nombre de perspectives peuvent être envisagées. Le développement des axes de recherche suivants est recommandé pour continuer cet effort :

- L'application de l'approches proposées dans des applications en boucle fermée (Commande et régulation)
- Développement des lois de commande tolérantes aux défauts ;
- Développement des techniques de séparation en temps réel.

# Annexe

## *Paramètres du moteur synchrone à aimant permanent*

---

Puissance nominale	3 kw
Fréquence d'alimentation	100 Hz
Tension nominale	360 V
Courant nominal	5.9 A
Vitesse nominale	1500 tr/min
Nombre de paires de pôles	4

---

## Référence

- [1] G. Zwingelstein, «DIAGNOSTIC DES DEFAILLANCES. Théorie et pratique pour les INDUSTRIELS », EDITION HERMES 1995.
- [2] « P. Tavner, L. Ran, J. Penman, et H. Sedding, Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines, 2nd edition. London, U.K: Institution of Engineering and Technology (IET), 2008. »
- [3] « Norme AFNOR-NF EN 13306, « Terminologie de la maintenance », janv. 2018. »
- [4] « K. A. Nguyen, « Développement de stratégies de maintenance prévisionnelle de systèmes Multi composants avec structure complexe », Thèse de doctorat, université de technologie de Troyes, 2015. »
- [5] « Kelly, A. (2006). Maintenance Strategy: Business-Centered Maintenance. Butterworth-Heinemann. »
- [6] « Boldea, I., & Nasar, S. A. (2005). Electric Drives. CRC Press. »
- [7] « T. J. E. Miller et J. R. Henderson Jar, Design of brushless permanent magnet motors. Oxford Press 1995. »
- [8] « K. Alameh, « Contribution au diagnostic et à l'analyse de défauts d'une machine synchrone aimants permanents », Thèse de doctorat, l'Université de Rouen Normandie, 2017 ».
- [9] « M. M. Momenzadeh, A. F. Ahmed, ET A. Tolba, « Modelling and Simulation of the BLDC Electric Drive System Using SIMULINK/MATLAB for a Hybrid Vehicle », Paderborn, Germany, 2014. »
- [10] « Krause, P. C., Wasynczuk, O., Sudhoff, S. D., & Pekarek, S. D. (2013). Analysis of Machinery and Drive Systems (3rd Ed.). Wiley-IEEE Press. »
- [11] « M. Khov, « Surveillance et diagnostic des machines synchrones à aimants permanents : Détection des courts-circuits par suivi paramétrique », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2009. »
- [12] « B. Aubert, « Détection des courts-circuits inter-spores dans les Générateurs Synchrones à Aimants Permanents : Méthodes basées modèles et filtre de Kalman étendu », Thèse de doctorat, université de Toulouse, 2014. »
- [13] « LARBI M'Hamed, « Contribution à la commande sans capteur des machines synchrones à aimants permanents », Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2012 ».
- [14] « Nicolas Bracikowski, « Modélisation multi-physique par modèles à constantes localisées ; application à une machine synchrone à aimants permanents en vue de son dimensionnement », Thèse de doctorat, École centrale de lille, 2012 ».
- [15] « V, Rengaswamy, R., Yin, K., & Kavuri, S. N. (2003). A review of process fault detection and diagnosis: Part II: Qualitative models and search strategies. Computers & Chemical Engineering, 27(3), 313–326. »
- [16] « A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Lazzari, and M. Pastorelli, “Evolution and modern approaches for thermal analysis of electrical machines,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 10, pp. 3568–3576, Oct. 2008. »
- [17] « S. Williamson and A. C. Smith, “Electrical insulation degradation in electric machines,” IEE Proceedings - Electric Power Applications, vol. 143, no. 5, pp. 367–375, Sep. 1996. »
- [18] « R. M. Eichhorn, “Partial Discharge and Electrical Insulation Aging,” IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 5, no. 6, pp. 19–22, Nov.–Dec. 1989. »
- [19] « A. Boglietti et al., “Thermal analysis of electrical machines—A review,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 10, pp. 3710–3719, Oct. 2009. »
- [20] « G. Stone, “Understanding the aging process of electrical insulation in machines,” IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 15, no. 4, pp. 14–19, 1999. »

- 
- [21] « H. Polinder et M. J. Hoeijmakers, « Effect of a shielding cylinder on the rotor losses in a Rectifier loaded PM machine », Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy, vol. 1, p. 163-170, Oct. 2000. »
- [22] « N. H. Obeid, « Contribution à la détection des défauts statoriques des actionneurs à aimants permanents : Application à la détection d'un défaut inter-spires intermittent et au suivi de vieillissement », Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2016. »
- [23] « A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni, and G. Capolino, “Advances in diagnostic techniques for induction machines,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, no. 12, pp. 4109–4126, Dec.2008. »
- [24] « AIMER Ameer Fethi, « Identification du type de défaut de roulement par analyse du courant statorique », Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2017. »
- [25] « J. A. Farooq, « Étude du problème inverse en électromagnétisme en vue de la localisation des défauts de désaimantation dans les actionneurs à aimants permanents », Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2008. »
- [26] « O. Ondel, « Diagnostic par reconnaissance des formes: application à un ensemble Convertisseur - machine asynchrone », Thèse de doctorat, l'école centrale de Lyon, 2006. »
- [27] « S. Nandi, H. A. Toliyat, ET X. Li, « Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors—A Review », IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 20, no 4, p. 719-729 Déc 2005. »
- [28] « A. Ibrahim, “Contribution au diagnostic de machines électromécaniques : Exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée,” Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 2009. »
- [29] « R. Z. S. Haddad, “Fault detection and identification in permanent magnet synchronous machines,” Michigan State University, 2016. »
- [30] « Z. Wu, “Conception optimale d'un entraînement électrique pour la chaîne de traction d'un véhicule hybride électrique,” Université de Franche-Comté, 2012. »
- [31] « A. Djerdir, J. Farooq, A. Rezig, et A. Miraoui, « Faults in permanent magnet traction motors: State of the art and modelling approaches », in IEEE PES General Meeting, juill. 2010, p. 1-5. »
- [32] « P. J. Tavner, B. G. Gaydon, et D. M. Ward, « Monitoring generators and large motors », IEE Proceedings B - Electric Power Applications, vol. 133, no 3, p. 169-180, mai 1986. »
- [33] « A. H. Boudinar, N. Benouzza, A. Bendiabdellah, ET M. Khodja, « Induction Motor Bearing Fault Analysis Using a Root-MUSIC Method », IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 52, no 5, p. 3851-3860, sept. 2016. »