République démocratique et populaire d'Algérie

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Amar Telidji-LAGHOUAT

Faculté de technologie — كلية التكنولوجيا

Département mecanique — قسم الميكانيك

Projet de fin de cycle

Pour obtenir un diplôme de master

Filiére: Electrotechnical — **ميدان**: ميكانيك

Spécialitié: Maintenance industrielle — **تخصص**: صيانة صناعية

Thème:

Diagnostic des Moteurs à Courant Continu par Analyse des Spectres Vibratoires - Caractérisation du défaut de désalignement par intelligence artificielle

Présenté par:

CHOUL MEBAREK

President de jury
Dr. Boudraa saliha

Encadreur
Dr.Hachani Keltoum

Co-encadreur
Hadjaj Ahmed

Examinateur
Dr. Ameur ilies

2023/2024

أَعُوذُ بِاللهِ السَّمِيعِ الْعَلِيمِ من الشَّيْطَانِ الرَّجِيمِ, مِنْ هَمْزِهِ، وَنَفْخِهِ، وَنَفْسِهِ

بِاسْمِ رَبِّكَ الَّذِي خَلَقَ ﴿1﴾ خَلَقَ الْإِنْسَانَ مِنْ عَلَقٍ ﴿2﴾ اقْرَأْ وَرَبُّكَ اقْرَأْ ﴿3﴾ الَّذِي عَلَّمَ بِالْقَلَمِ ﴿4﴾ عَلَّمَ الْإِنْسَانَ مَا لَمْ يَعْلَمْ﴿5﴾

Al-‘Alaq -ماتيسر من سورة العلق

ملخص

يتعلق العمل المقدم في هذه الأطروحة بتوصيف أعطال المحاذاة الخاطئة في محركات التيار المباشر (DC) باستخدام تحليل الاهتزازات وتطبيق تقنية الذكاء الاصطناعي القائمة على المنطق الضبابي.

محرك التيار المستمر الذي تمت دراسته هو محرك يستخدم كمحرك مساعد للتوربينات الغازية في وحدة إنتاج الكهرباء في حاسي رمل. أجريت الدراسة على محرك في حالة سليمة وفي وجود خلل في المحاذاة. تم التشخيص من خلال تحليل أطياف اهتزاز المحرك في كلتا الحالتين. تم تنفيذ نتائج قياسات الاهتزاز في نظام ذكي يعتمد على تقنية المنطق الضبابي. أظهرت هذه النتائج فعالية التقنية المستخدمة في التنبؤ بالأعطال وأثبتت كفاءة قراءة مؤشرات الأعطال في محركات التيار المستمر.

الكلمات المفتاحية: محرك تيار مستمر، تحليل الاهتزاز، اختلال المحاذاة، التشخيص، الخطأ، المنطق الضبابي

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la caractérisation de défaut de désalignement dans les moteurs à courant continu (MCC) par analyse vibratoire et l'application d'une technique de l'intelligence artificielle basée sur la logique floue.

Le moteur à courant continu étudié est un moteur utilisé comme des auxiliaires de la turbine à gaz au niveau de l'unité de production de l'électricité a Hassi R'Mel, l'étude est réalisée sur un moteur dans l'état sain et en présence d'un défaut de désalignement. Le diagnostic est effectué par analyse des spectres vibratoires du moteur dans les deux cas. Les résultats de mesures vibratoires sont implantés dans un système intelligent basé sur la technique de la logique floue . Ces résultats ont montré l'efficacité de la technique utilisée pour la prédiction de défauts et prouve une lecture efficace des indicateurs de défaut de désalignement dans les moteurs a courant continu

Mots-clés : Moteur à courant continu, analyse vibratoire, désalignement, Diagnostic, défaut, Logique floue

---

Abstract

The work presented in this thesis concerns the characterization of misalignment faults in direct current (DC) motors using vibration analysis and the application of an artificial intelligence technique based on fuzzy logic.

The DC motor studied is a motor used as a gas turbine auxiliary at the Hassi R'Mel electricity generation unit. The study is carried out on a motor in a healthy state and in the presence of a misalignment fault. Diagnosis is carried out by analyzing the motor's vibration spectra in both cases. The results of the vibration measurements are implemented in an intelligent system based on the fuzzy logic technique. These results demonstrate the effectiveness of the technique used for fault prediction, and prove an efficient reading of misalignment fault indicators in DC motors.

Keywords: DC motor, vibration analysis, misalignment, diagnosis, fault, fuzzy logic

Remerciements

Tous mes remerciements et ma gratitude à notre Dieu le Seigneur des cieux et des terres ALLAHالله - سبحانه وتعالى - qui nous a accordé de réussir à achever cet humble travail sans mon pouvoir sauf le sien AL puissant. Je tiens également à remercier ma famille, qui a contribué pendant 5 ans à la réalisation de ce modeste projet.

Hachani Keltoum pour sa bienveillance et ses efforts, ainsi que toute la famille universitaire, en particulier mes professeurs depuis la première année jusqu'à la fin de mes études.

Enfin et surtout, quiconque n'est pas reconnaissant envers les gens n'est pas reconnaissant envers ALLAH.

CHOUL MEBAREK

Dédicace

Je souhaite dédier ce travail à :

A ma chère mère qui m'a donné tout le soutien qui m'a conduit au succès et à la lutte. recevez ma profonde gratitude. Que Dieu vous accorde une longue vie.

À mon cher père, tu as été le meilleur exemple des sacrifices que tu as toujours faits pour nous. Merci pour vos efforts.

Que la paix et les bénédictions soient sur le Messager de Dieu, le Prophète MOHAMMED, ses compagnons, ses épouses, ses disciples et ceux qui l'ont suivi jusqu'au Jour du Jugement Dernier.

CHOUL MEBAREK

Sommaire

Résumé _____ *I*

Remerciements _____ *III*

Dédicace _____ *IV*

Table des figures _____ *VI*

Les tableaux _____ *VII*

Introduction Générale _____ *1*

Chapitre I : Généralités sur les machines a courant continu

I.1 Introduction _____ *3*

I.2 Constitution du moteur à courant continu _____ *3*

I.2.1 Définition : _____ 3

I.2.2 Constitution _____ 4

I.3: Différents types d'un moteur à courant continu : _____ *5*

I.3.1: Le moteur à excitation séparée [2,3] : _____ 6

I.3.2: Le moteur à excitation shunt : _____ 6

I.3.3 Le moteur à excitation série: _____ 6

I.3.4: Le moteur à excitation composée : _____ 6

I.4 Défaillance de moteur à courant continu _____ *6*

I.4.1 Défaut _____ 6

I.4.2 Défaillance _____ 6

I.4.3 Panne _____ 7

I.5 Service de diagnostique et maintenance _____ *7*

I.5.1 Définition de la maintenance _____ 7

I-5.2 Différentes types de maintenance _____ 7

I.5.3 Diagnostic des défaillances _____ 11

I.5.4 Méthodes de diagnostiques _____ 11

I.5.5 Les types des signaux vibratoires : _____ 14

I.5.6 Les modes de détection : _____ 14

I.6 Exemples (La surveillance vibratoire appliquée sur les machines tournantes (SONATRACH.): _____ *15*

I.7 Interprétation (diagnostic des experts) _____ *17*

I.8 Conclusion _____ *18*

Chapitre II : Procédures Expérimentales et Résultats

II.1 Introduction ____ ***20***

II.2 Caractéristiques de la machine étudiée ____ ***20***

II.2.1 Utilisation des moteur à courant continu sur les site dans SONATRACH ____ **20**

II.3 Description de matériel utilisé ____ ***22***

II.3.1 Les prosimètre ____ **22**

II.3.2 Vélocimétrie ____ **22**

II.3.3 Les accéléromètres ____ **23**

II.4 Procédures de mesure ____ ***24***

II.5 Résultats et interprétation (Etude de défaut d'alignement) ____ ***26***

II.5.1 Premier cas : variation de frequence de defauts en fontion de la charge ____ **26**

II.5.2 Deuxieme cas: Variation de frequence en fontion de tension d'alimentation ____ **28**

II.6 Conclusion ____ ***35***

Chapitre III : Caractérisation de défaut de désalignement par IA

III.1. INTRODUCTION : ____ ***37***

III.2 Généralités sur la logique floue ____ ***37***

III.2.1 Concepts et définitions ____ **37**

III.2.2 Structure générale d'un système flou. ____ **38**

III.3 Conception d'un système flou ____ ***38***

III.3.1 Univers de discours ____ **38**

III.3.2 Fuzzification ____ **40**

III.3.3 inférences floues ____ **42**

III.3.4 Opérateurs de la logique floue ____ **42**

III.3.5 méthodes d'inférences floues ____ **43**

III.3.6. Defuzzification ____ **44**

III.4 Application de la logique floue ____ ***45***

III.4.1 Fonctions d'appartenance ____ **45**

III.4.2 Règles d'inférences : ____ **47**

III.5 Résultats et discussions ____ ***47***

III.5. Conclusion ____ ***49***

Conclusion générale et perspectives ____ ***50***

Références Bibliographique ____ ***51***

Table des figures

Figure I. 1 *: Fonctionnement d'une machine A courant continu* 3
Figure I. 2 : *Construction du moteur à courant continu* 4
Figure I. 3 : *L'inducteur.de machine CC- (a)inducteur à aiment permanant ;* 4
Figure I. 4 :*Photographie d'un induit d'une machine industrielle* 5
Figure I. 5 *: Composition de l'induit* 5
Figure I. 6 : *Différents types de moteurs* 6
Figure I. 7 *: Les déférents types de maintenance [2].* 9
Figure I. 8 *: Mesures vibratoires sur la machine tournante [5]* 13
Figure I. 9 *: Les déférents signaux vibratoires[6]* 14
Figure I. 10 : *Modes de détection usuels [6]* 14
Figure I. 11 : *Chaine de mesure [6]* 15
Figure I. 12 : *Spectre 0-1000Hz - palier CA* 16
Figure I. 13 : *Spectre 0-1000Hz – palier COA* 17

Figure II. 1 *: Photographie de la machine a courant continu de banc d'essai* 21
Figure II. 2 : *Plaque signalétique de la machine* 21
Figure II. 3 *: Prosimètre* 22
Figure II. 4 : *Capteur de vélocimétrie. [ ]* 22
Figure II. 5 *: Schéma de principe d'un accéléromètre.* 23
Figure II. 6 : *Photographie de capteur de vitesse utilisé [ ]* 24
Figure II. 7 : *Photographie de l'accéléromètre utilisé* 24
Figure II. 8 *: Machine CC* 25
Figure II. 9 *: Banc d'essais vibrations* 25
Figure II. 10 : *Comparative des signaux vibratoires dans le domaine fréquentiel de deux cas sain et avec défaut d'alignement (a vide)* 26
Figure II. 11 : *Comparative des signaux vibratoires dans le domaine fréquentiel de deux cas sain et avec défaut d'alignement (avec charge 0.5 N)* 27
Figure II. 12 *: Comparative des signaux vibratoires dans le domaine fréquentiel de deux cas sain et avec défaut d'alignement (avec charge 1 N)* 27
Figure II. 13 *: Comparative des signaux vibratoires dans le domaine fréquentiel de deux cas sain et avec défaut d'alignement (T=0 ; V=100 V)* 28
Figure II. 14 : *Comparative des signaux vibratoires dans le domaine fréquentiel de deux cas sain et avec défaut d'alignement(T=0, V=150V)* 29
Figure II. 15 *: Comparative des signaux vibratoires dans le domaine fréquentiel de deux cas sain et avec défaut d'alignement (T=0, V=220V)* 29
Figure II. 16 : *Comparative des signaux vibratoires dans le domaine fréquentiel de deux cas sain et avec défaut d'alignement(T=0.5, V=220V)* 30
Figure II. 17 *: Comparative des signaux vibratoires dans le domaine fréquentiel de deux cas sain et avec défaut d'alignement(T=0.5, V=150V)* 31
Figure II. 18 : *Comparative des signaux vibratoires dans le domaine fréquentiel de deux cas sain et avec défaut d'alignement(T=1, V=150V)* 31
Figure II. 19 : *variation de fréquence de défaut d'alignement en fonction de paramètres de services de moteur étudié* 32

Figure III. 1 : *Schéma général d'un système flou [12,13]* 38
Figure III. 2 *: Degré d'appartenance aux ensembles considérés en logique booléenne* 39
Figure III. 3 *: Exemple de fonction d'appartenance de Vib* 41

***Figure III. 4** : a)Fonctions d'appartenance de forme trapézoïdale ; b) Fonctions d'appartenance de forme triangulaire; c) Fonctions d'appartenance de forme de cloche [12,13] 41*
***Figure III. 5** : Méthode d'inférence Somme-produit [12,13] 44*
***Figure III. 6** : Le système flou conçu 45*
***Figure III. 7** : Fonction d'appartenance de l'entrée (fréquence de défaut) 45*
***Figure III. 8** : Fonction d'appartenance de l'entrée (Couple de charge) 46*
***Figure III. 9** : Fonction d'appartenance de l'entrée (tension d'alimentation) 46*
***Figure III. 10** : Fonction d'appartenance de l'entrée (vibration) 46*
***Figure III. 11** : Fonction d'appartenance de la sortie 47*
***Figure III. 12** : Les règles d'inférences du système conçu 47*
***Figure III. 13** : Quelques exemples de résultats obtenu 48*

Les tableaux

Tableau I. 1 :*l'historique de l'analyse vibratoire site Hassi R'mel [2]* _____ *16*

Tableau II. 1 *: Caractéristiques de moteur étudié [ ]* _____ *21*
Tableau II. 2 *: caracteristiques de defaut de des alignement en fonction de la charge* _____ *28*
Tableau II. 3 *: Effet de la variation de charge sur les reponses vibratoires de defaut de defaut de desalignement (à vide)* _____ *30*
Tableau II. 4 : *Effet de la variation de charge sur les reponses vibratoires de defaut de desalignement (en charge T = 0.5 ; 1 N)* _____ *32*
Tableau II. 5 *: Récapitulatif des résultats d'essais sur le moteur CC* _____ *32*

Introduction Générale

Introduction Générale

Le moteur à courant continu est un convertisseur d'énergie électromécanique. Il se distingue des autres moteurs à courant alternatif par une vitesse réglable et des performances satisfaisantes. Actuellement, ce type de moteur a pris l'attention des chercheur dans le milieu industriel et les différents compagnies, vu la tendance de l'utilisation de l'énergie renouvelable qui va dominer le monde et prendre la place de l'énergie alternative

Comme tous les systèmes, le moteur à courant continu a besoin d'une surveillance et maintenance, et pour la bonne mise en œuvre de la maintenance, l'étape de diagnostic est une étape essentielle ,car cette étape est un moyen pour déterminer si l'outil ou le système est défaillant ou non, et déterminer l'origine de la panne, aussi le temps nécessaire avant la maintenance pour assurer la fiabilité de fonctionnement du système, et la sécurité de l'installation et la sécurité humaine.

Par conséquent, il est très intéressant de développer des systèmes de diagnostic pour détecter de manière anticipée les défauts pouvant surgir dans ce type de machines, afin d'y remédier dans des délais les plus brefs pour minimiser les effets induits sur l'installation électrique ou sur la machine elle-même. Les chercheurs travaillent pour améliorer les processus de diagnostic et de développer les méthodes de surveillance.

Parmi les méthodes de surveillance et de diagnostic utilisées actuellement dans l'industrie, la méthode d'analyse vibratoire

Et l'un des techniques de diagnostic c'est les techniques de l'intelligence artificielle comme la logique flue, l'application de cette technique pour le diagnostic et la classification de défaut d'une machine tournante permettra de fournir des informations sur l'état et le fonctionnement de la machine aux opérateurs qui l'exploitent. Il est capable aussi de provoquer dans les cas graves un arrêt de la machine ou de permettre au système de production de continuer de fonctionner en mode dégradé en cas de problème ne nécessitent pas un arrêt immédiat

Dans cette étude, nous allons utiliser la méthode de l'analyse vibratoire et la technique de logique floue pour caractériser le défauts dans les moteurs à courant continu. Notre mémoire est organisée en trois principaux chapitres:

- Le premier chapitre concerne des généralités sur le moteur à courant continu: définition,Constitution, ces différents types selon le mode d'excitation, différent types

de défauts et les méthodes de surveillance et de diagnostic actuellement utilisées dans les sociétés Sonelgaz et Sonatrach en Algérie

- Dans le deuxième chapitre, nous allons discuter les résultats des essais expérimentaux effectués sur un moteur à courant continu dans les laboratoires des machines électriques de l'université de Laghouat, les méthode et les équipements utilisé sont aussi présentés.

- Le troisième chapitre est consacré a l'application de la logique floue pour le diagnostic de défauts dans le moteur à courant continue, ou les résultats et leurs interprétation seront bien détaillés .

On terminera ce mémoire par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus et donne les perspectives futures de ce travail

Chapitre I :

Généralités sur les machines a courant continu

I.1 Introduction

Ce dernier temps ; la technologie moderne des systèmes d'entraiment et la vision future d'exploitation des énergies renouvelables; exige de plus en plus une attention particulière aux équipements de puissance a courant continu plus précisément les moteurs à courant continu vu leurs grande performances et leurs faibles cout.

Ce type des moteurs électriques, sont plus présents dans divers processus industriels, ils offrent des performances élevées sur une large plage de vitesse, sont très faciles à contrôler et ont une grande flexibilité, avec une capacité de surcharge élevée. Cette capacité les rend plus adaptés que les moteurs à courant alternatif pour de nombreuses applications.

L'objet de ce chapitre est de présenter les moteurs à courant continu, leur constitution, les différents domaines d'application, leurs défaillances et les différentes techniques et méthodes de surveillance et de diagnostic appliquées pour la maintenance de ce type de moteur.

I.2 Constitution du moteur à courant continu

I.2.1 Définition :

Une machine à courant continu (MCC) est un convertisseur électromécanique qui permet la transmission d'énergie dans les deux sens.[1]

- En fonctionnement moteur, l'énergie électrique est transformée en énergie mécanique.
- En fonctionnement générateur, l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique

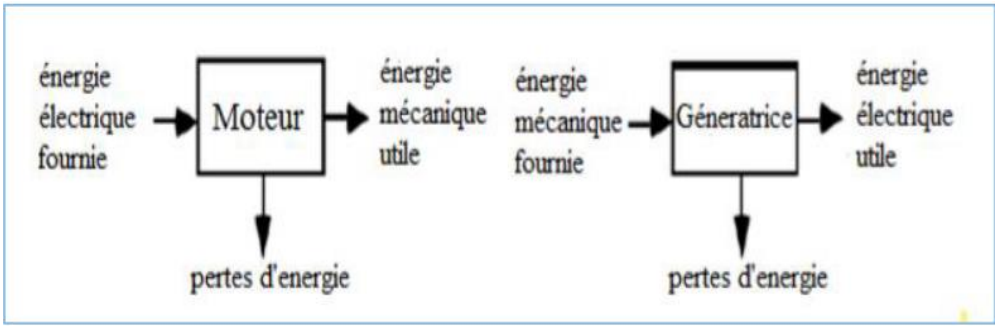


Figure I. 1 : Fonctionnement d'une machine A courant continu

I.2.2 Constitution

Le moteur à courant continu est constitué principalement de : **[1,2]**

- L'inducteur (stator).
- L'induit (rotor).
- Le Collecteur
- Les Ballais

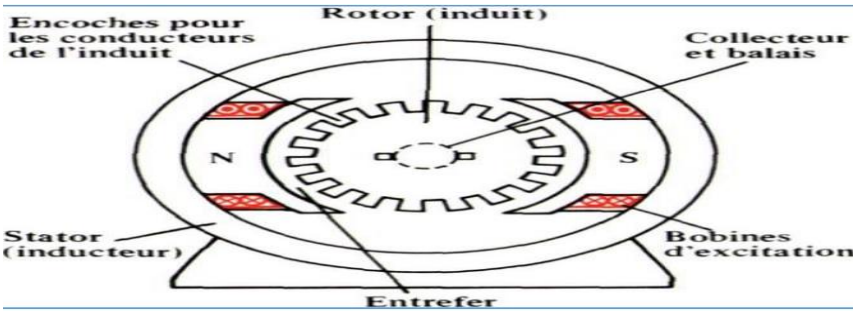


Figure I. 2 : Construction du moteur à courant continu

- **L'inducteur**, peut être aussi appelé stator. Le stator est la source du champ magnétique, comme celui-ci est créé soit par une bobine, soit par un aiment permanant, le champ magnétique est présent à tout moment.

(a) (b)

Figure I. 3 : L'inducteur.de machine CC- (a)inducteur à aiment permanant ;
(b) inducteur (stator) bobiné

- Un ensemble de paires de pôles constitué d'un empilement de tôles ferro-magnétiques.
- Les enroulements (ou bobinage en cuivre) destinés à créer le champ ou les champs magnétiques suivant le nombre de paires de pôles.

Pour des moteurs d'une certaine puissance, le nombre de paires de pôles est multiplié afin de mieux utiliser la matière, de diminuer les dimensions d'encombrement et d'optimaliser la pénétration du flux magnétique dans l'induit.

- **L'induit** du moteur à courant continu est composé d'un arbre sur lequel est empilé un ensemble de disques ferro-magnétiques. Des encoches sont axialement pratiquées à la périphérie du cylindre formé par les disques empilés. Dans ces encoches les enroulements (bobines de l'induit) sont "bobinés" selon un schéma très précis

Figure I. 4 : Photographie d'un induit d'une machine industrielle

Chaque enroulement est composé d'une série de sections, elles même composées de spires; dont ses conducteurs sont connectés a des lames en cuivre espacée par un isolant).

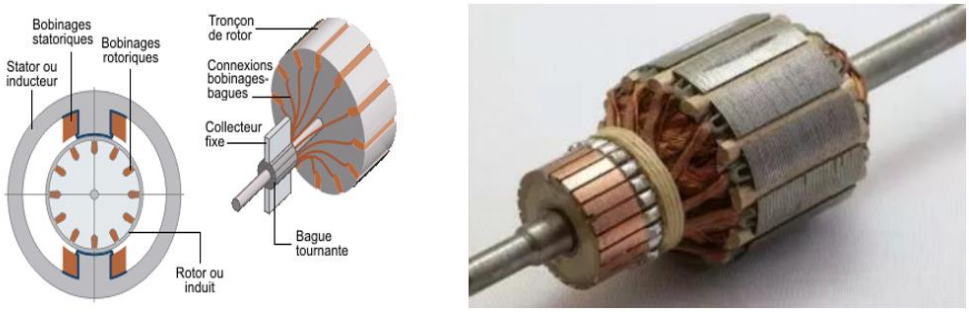


Figure I. 5 : Composition de l'induit

L'interface entre l'alimentation à courant continu et le collecteur de l'induit est assuré par les balais qui assurent le passage du courant électrique entre l'alimentation et les bobinages de l'induit sous forme d'un contact par frottement.

I.3: Différents types d'un moteur à courant continu :

Il existe quatre types de moteurs adaptés aux différentes tâches dans le secteur industriel:

I.3.1: Le moteur à excitation séparée [2,3] :

Dans un moteur à excitation séparée, l'inducteur et l'induit sont alimentés par deux sources distinctes.

I.3.2: Le moteur à excitation shunt :

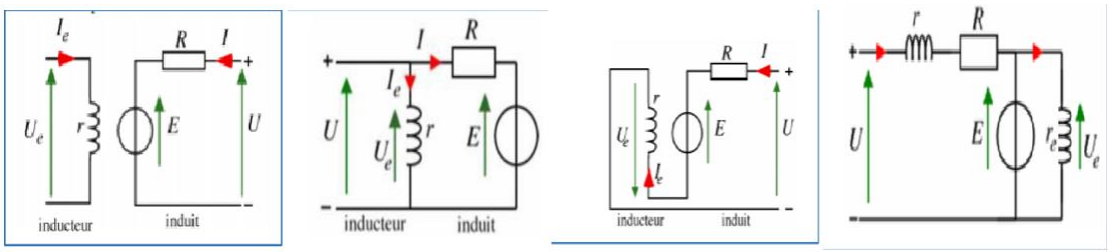
Les enroulements du rotor et du stator sont connectés en parallèle, il est soumis à la même tension d'alimentation.

I.3.3 Le moteur à excitation série:

Le bobinage du stator est connecté en série avec le bobinage du rotor.

I.3.4: Le moteur à excitation composée :

Ce type de moteur combine la structure à excitation série et celle du bobinage "shunt". Ce type de moteur possède un couple de démarrage élevé et offre une large variation de vitesse.



(1) Séparé **(2) Shunt** **(3) Série** **(4) composé**

Figure I. 6 : Différents types de moteurs

I.4 Défaillance de moteur à courant continu

I.4.1 Défaut

Un défaut est défini comme déviation d'une variable observée par rapport à sa valeur théorique. Il peut également être défini comme la différence entre la valeur mesurée et la valeur attendue. Un défaut peut rester caché pendant un certain temps avant de donner lieu à une défaillance. [2-4].

I.4.2 Défaillance

La défaillance est l'altération de l'aptitude du système à exécuter les fonctions de base pour les quelles il a été conçu, et cette défaillance peut être partielle ou complète [3].

- ✓ Défaillance complète est l'incapacité de système à accomplir une fonction requise

- ✓ Défaillance partielle est détérioration de la capacité du système à exécuter les fonctions requises.

I.4.3 Panne

Une panne est l'inaptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise. Elle résulte toujours d'une défaillance et donc d'un défaut.

Défaut → défaillance → panne

Dans le cadre de la maintenance, le diagnostic doit permettre de détecter et localiser un défaut avant que celui-ci ne conduise à une défaillance ou à une panne qui entrainerait l'arrêt du système.

I.5 Service de diagnostique et maintenance

1) Détection de défaut : est la 1ere étape de diagnostic qui permet de décider qu'un indicateur de défaut est pertinent et donc de signaler si le système est défaillant ou pas. Il s'agit d'une opération qui consiste à déterminer un état comportemental anormal.
2) Localisation de défaut : est la 2eme étape de diagnostic qui consiste à déterminer les composantes défaillantes.
3) Identification de défaut : est la 3eme étape de diagnostic permettant la détermination de la l'amplitude et l'évolution de défaut.
4)

I.5.1 Définition de la maintenance

C'est l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifie ou en mesure d'assurer un service déterminé «extrait de norme AFNORX60-010

I-5.2 Différentes types de maintenance

Ces actions se différent selon les techniques de mises en œuvre à savoir deux types qui sont utilisé par le service de maintenance de SONATRACH **[4]**:

- ❖ Maintenance corrective
- ❖ Maintenance préventive :
  - systématique
  - conditionnelle.

I.5.2.1 Maintenance Corrective

C’est un ensemble des activités réalisées après la défaillance d’un bien. Autrement dit, la maintenance corrective est effectuée après la détection d’une panne : Elle devra s’appliquer automatiquement aux défaillances complètes et soudaines. Ce type de maintenance sera réservé aux matériels peu coûteux, non stratégiques pour la production et dont la panne aurait peu d'influence sur la sécurité.[4]

I.5.2.2 Maintenance Préventive

Ce type de maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance. Elle doit permettre d’éviter les défaillances des équipements au cours de l’utilisation. La mise en pratique de ce type de maintenance nécessite la décomposition des sous-systèmes en composants (roulement, circuit magnétique, etc...).**[4]**

Les buts de la maintenance préventive, sont :

- Augmenter la durée de vie des équipements.
- Diminuer le budget de la maintenance.
- Supprimer les causes des accidents graves.

On distingue deux types de la maintenance préventive :

A) Maintenance préventive systématique

La maintenance systématique est un type de maintenance planifiée dans le temps (graissage, lubrification, nettoyage, dépoussiérage, calibrage,...). Il s'agit là d'éviter les causes de défaillances et de vieillissement des composantes du système. Généralement, la maintenance préventive systématique s’adresse aux éléments dont le coût des pannes est élevé, mais ne revenant pas trop cher en changement (les meilleurs exemples sont le changement systématique de l’huile, des filtres, changement de la courroie de synchronisation, des roulements, des paliers de rotation …)**[4]**

. **B) Maintenance préventive conditionnelle**

C'est un type de maintenance déclenché suite à un symptôme observable (température, vibration, jeu excessif, …) permettant de prédire une défaillance prochaine. Il s'agit là d'intervenir juste avant que la panne ne survienne. La maintenance préventive

conditionnelle est réalisée dès lors qu'une mesure dépasse une valeur précise (seuil) d'une grandeur physique (température, pression…).

La maintenance préventive conditionnelle s'adresse aux pièces des machines coûteux, et pouvant être surveillées par des méthodes non– destructives (vibration, huile, température, courant, etc.). Autrement dit, on ne change l'élément que lorsque celui-ci présente des signes de vieillissement ou d'usure affectant les performances du fonctionnement.

La maintenance préventive conditionnelle nécessite une équipe de maintenance de niveau technologique plus élevé formée en méthodes du diagnostic. Les outils ou bien les signaux qui peuvent être utilisés par la maintenance préventive conditionnelle sont**[4]** :

- mesure de température, thermographie infrarouge (lignage, roulements, paliers)
- mesures de pression (paliers) ;
- mesure de débit (paliers) ;
- analyse d'huile (roulements, paliers, engrenages) ;
- mesure de vibration (déséquilibre, lignage, roulements, paliers, engrenages, jeux, etc.) ;
- mesure du courant statorique, du couple, de la vitesse ou de la puissance.

D'après ces définitions, il apparaît donc que si un composant d'un système soit jugé défaillant, sa réparation ou son remplacement doit être considéré comme de la maintenance corrective ; si celui-ci est jugé non défaillant mais en état dégradé, sa réparation ou son remplacement doit être considéré comme de la maintenance préventive.**[4]**

La fonction maintenance est bien détaillée par la norme : AFNOR X60-000 d'où on peut extraire trois stratégies de maintenance préventive.

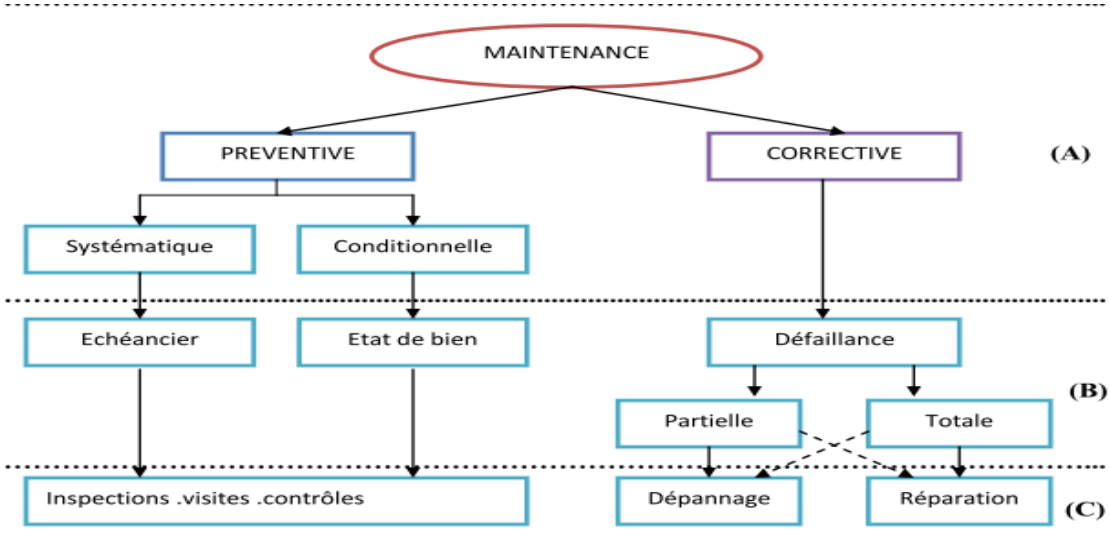


Figure I. 7 : Les déférents types de maintenance [12].

(A):Méthodes de maintenance

(B) : Evènements

C) : Opération de maintenance

I.5.3 Diagnostic des défaillances

Le diagnostic a pour objectif de détecter d'une manière précoce un défaut avant qu'il ne conduise à une défaillance totale dans l'installation industrielle. Lorsqu'un défaut apparaît dans un équipement industriel, le système de diagnostic lié à ce dernier doit d'abord détecter l'anomalie du fonctionnement puis y identifier la (ou les)cause (s) de défaillance à l'aide d'un raisonnement logique pour qu'il puisse être isolé.**[5]**

I.5.3.1 L'organisation générale de la procédure de diagnostic

s'articule autour des étapes suivantes **[5]**

1- A partir des moyens de mesure ou d'observation appropriés, nous effectuons l'extraction des informations nécessaires à la mise en forme des caractéristiques associées aux fonctionnements normaux et anormaux.

2- l'élaboration des signatures associées à des symptômes de défaillance en vue de la détection d'un dysfonctionnement.

3- la détection d'un dysfonctionnement par comparaison avec des signatures associées à des états de fonctionnements normaux

4- la mise en œuvre d'une méthode de diagnostic de défaillance à partir de l'utilisation des connaissances sur les relations de causalité (catalogue cause - effets).

5- une phase d'interprétation des données de diagnostic.

6- la prise de décision en fonction des conséquences et de l'importance des défauts.

Donc ; les deux principales tâche de diagnostic sont :

- la détection **:** La détection consiste à signaler l'existence du défaut,
- la localisation des défauts **:** qui a pour objet de trouver le type de défaut

Pour cela il existe beaucoup méthodes de diagnostiques de machine Asynchrone **[5]:**

I.5.4 Méthodes de diagnostiques

- **Redondance physique ou matérielle**

La redondance physique consiste à utiliser plusieurs capteurs, actionneurs , µ processeurs et logiciels pour mesurer et/ou contrôler une variable particulière .Un principe de vote est appliqué sur les valeurs redondantes pour décider si une faute est présente ou non. Cette approche entraîne un coût important en instrumentation mais s'avère extrêmement fiable et

simple à implanter. Elle est mise en œuvre essentiellement sur des systèmes à hauts risques tels que les centrales nucléaires.

❖ Redondance analytique ou Méthodes basées sur un modèle

Un complément à la redondance physique est d'exploiter les contraintes liant les différentes variables du système. Ces contraintes peuvent souvent s'exprimer sous la forme de relations analytiques liant les variables connues (relations d'entrée/sortie ou de sortie/sortie). Ces relations sont appelées des relations de redondance analytique. Le principe de la surveillance consiste à vérifier si ces relations sont égales à zéro) en utilisant les mesures prélevées en ligne sur le système.

Le concept de redondance analytique repose sur l'utilisation d'un modèle mathématique du système à surveiller. Pour cette raison, les méthodes utilisant la redondance analytique pour la surveillance sont appelées méthodes à base de modèle.

❖ Méthodes basées sur l'analyse spectrale

L'analyse spectrale est utilisée depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les ruptures de barres et/ou de portions d'anneaux au rotor des machines asynchrones, la dégradation des roulements, les excentricités et les court-circuits dans les bobinages. Ces cas se prêtent bien à cette approche dans la mesure où de nombreux phénomènes se traduisent par l'apparition de fréquences directement liées à la vitesse de rotation ou à des multiples de la fréquence d'alimentation

a) Analyses vibratoires de la machine

L'analyse vibratoire de la machine asynchrone peut être menée grâce à des accéléromètres placés sur les paliers dans les directions verticales, axiales et radiales.

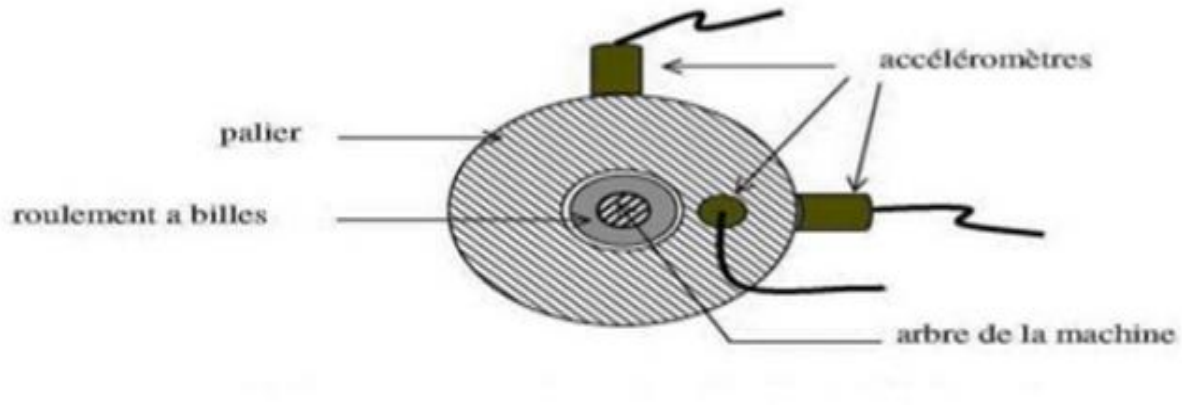


Figure I. 8 : Mesures vibratoires sur la machine tournante [5]

Les vibrations de la machine fournissent des informations sur pratiquement tous les défauts fréquemment rencontrés, notamment ceux mécaniques. Cependant, ces analyses vibratoires comportent certains inconvénients :

- Problème d'accessibilité ou difficultés rencontrées dans les connexions mécaniques des accéléromètres pour effectuer les mesures nécessaires au voisinage direct du défaut.
- Le coût de ces capteurs est relativement élevé par rapport aux autres capteurs tels que les capteurs de vitesse ou de courant.

Pour s'affranchir de ces problèmes, les recherches focalisent leurs efforts pour détecter et localiser les défauts par l'analyse d'autres signaux. **]2[**

b) Analyse des courants statorique.

Les signaux évoqués précédemment permettent de détecter un grand nombre de défauts sur la machine. Cependant, ces signaux nécessitent la mise en place d'un grand nombre de capteurs (flux, accéléromètres,…) souvent onéreux, sensibles et délicats à placer dans des environnements contraignants.

Pour ces inconvénients et pour extraire de manière précise les informations relatives aux défauts les recherches ont été particulièrement dirigées vers le spectre des courants statorique pour deux raisons: Les courants sont faciles à mesurer, ils fournissent des informations sur de nombreux défauts. **[5]**:

I.5.5 Les types des signaux vibratoires :

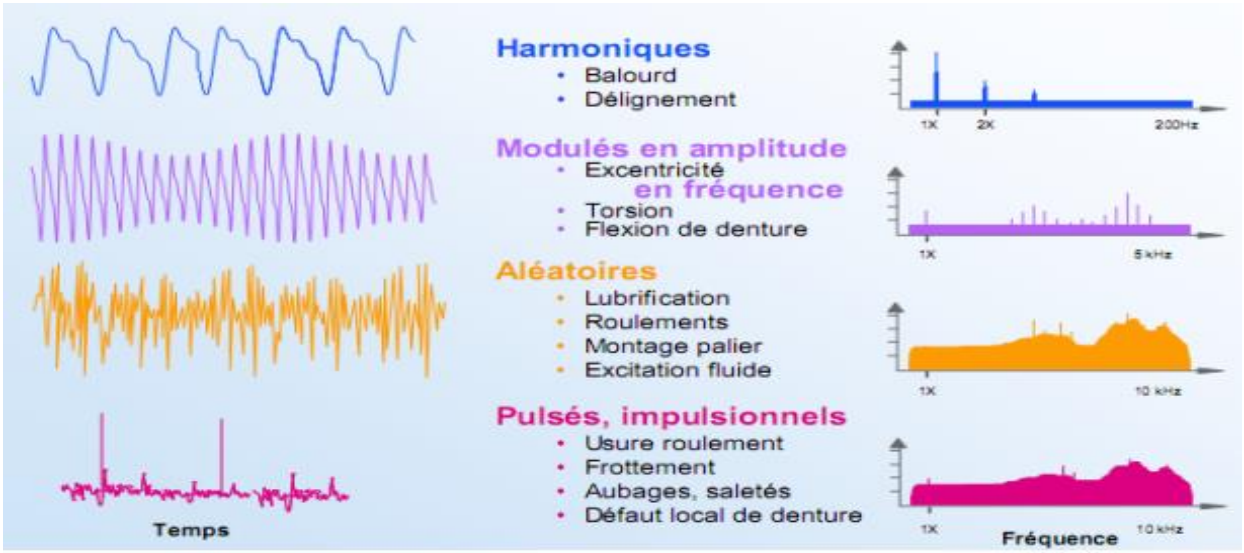


Figure I. 9 : Les déférents signaux vibratoires[6]

I.5.6 Les modes de détection :

En mesure vibratoire, on utilise couramment trois modes de détection

- ❖ Valeur efficace
- ❖ Valeur crête
- ❖ Valeur crête à crête

$$Facteur\ de\ crête = \frac{\text{Valeur de crête}}{\text{Valeur efficace}}$$

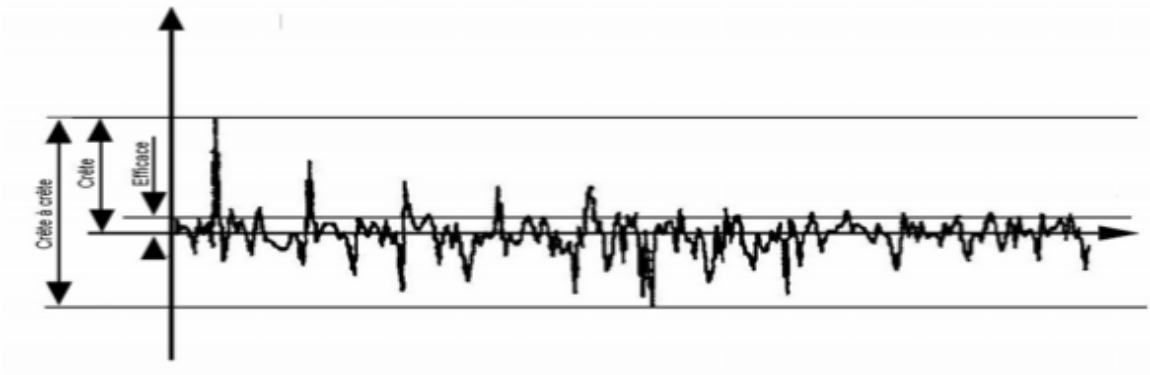


Figure I. 10 : Modes de détection usuels [6]

I.5.7 Chaine de mesure vibratoire:

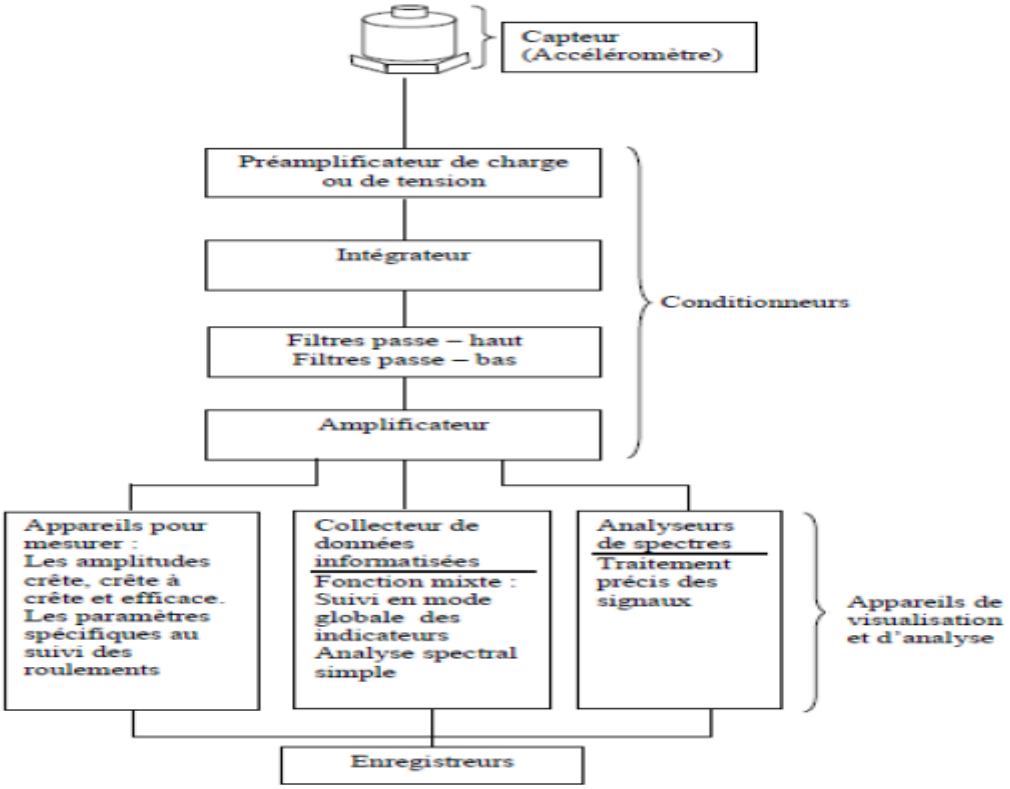


Figure I. 11 : Chaine de mesure [6]

Il existe deux type de surveillance vibratoire, online donc les capteurs sont installés à demeure sur la machine et off line dans ce cas le mesure se fait manuellement avec le capteur**[6].**

I.6 Exemples (La surveillance vibratoire appliquée sur les machines tournantes (SONATRACH.):

L'analyse vibratoire est un moyen utilisé pour suivre l'état des machines tournantes en fonctionnement et le méthode de diagnostique le plus utilises dans SONATRACH. A partir des vibrations régulièrement recueillies sur une machine tournante, l'analyse vibratoire consiste à détecter d'éventuels dysfonctionnements et à suivre leur évolution dans le but de planifier ou reporter une intervention mécanique.**[6]**

Tableau I. 1 :l'historique de l'analyse vibratoire site Hassi R'mel [2]

	Logiciel de diagnostique	Appareil de mesure	Fournisseur	Observation
1988	VAS (sous DOS)	MICROMAX (analyseur)	VIBROMETER	Début de suivi vibratoire des machines tournantes
1989	——	VIBROPOR 30 (analyseur)	SCHENCK (allemande)	VIBROPOR 30 : petite appareil de mesure globale
1990	CM 120 (sous DOS)	VIBROSTOR41 (collecteur)	SCHENCK	———
1992	CM 120 (sous DOS)	VIBROPOR 41 (analyseur)	SCHENCK	———
1999	CM 400 (sous Win)	VIBROPOR 41	SCHENCK	———
2000	CM 400	VT 60 (collecteur-analyseur)	SCHENCK	VT 60 : compatible avec CM 400

Aujourd'hui le service l'analyse vibratoire des machine tournante joue un très importante tell que ils sont avoir plusieurs du développement et l'expérience dans ce domaine des mesures et diagnostics des défauts par fréquence .qui permet de démuniriez les panne catalectique.

Relevés vibratoires sur le moteur électrique du GEP C pour le Spectre 0-1000 Hz [3]

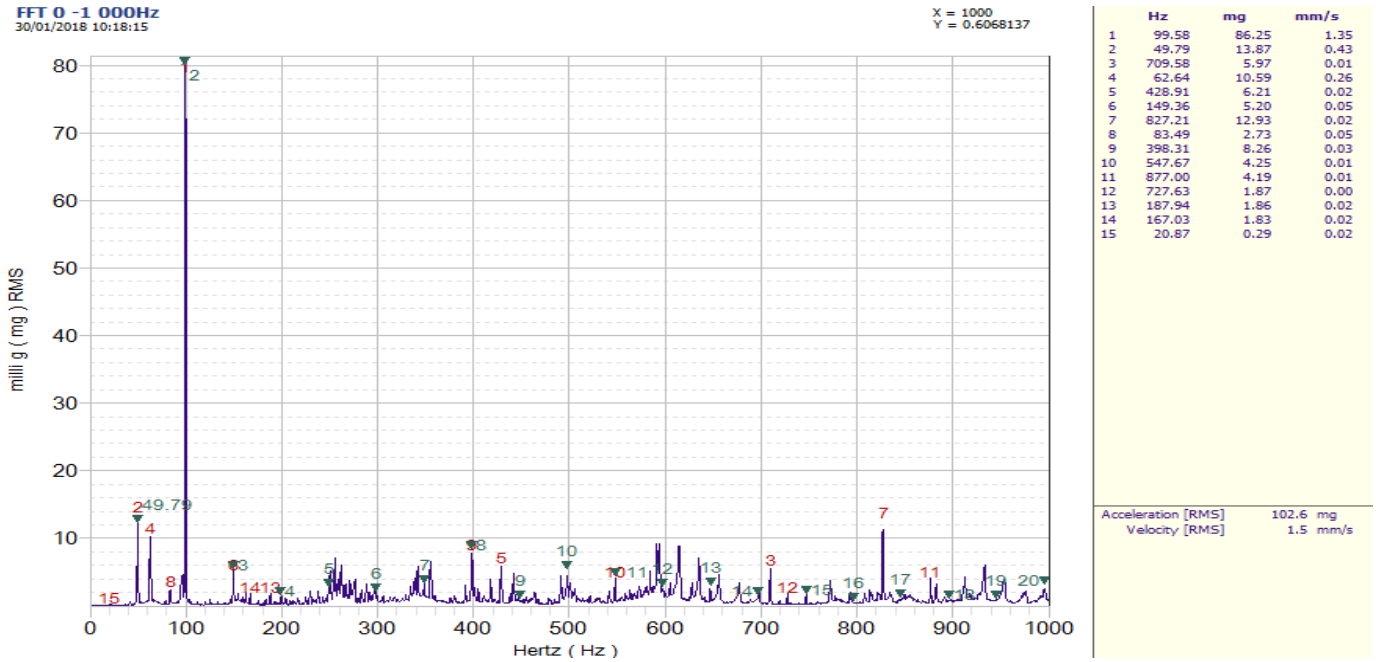


Figure I. 12 : Spectre 0-1000Hz - palier CA

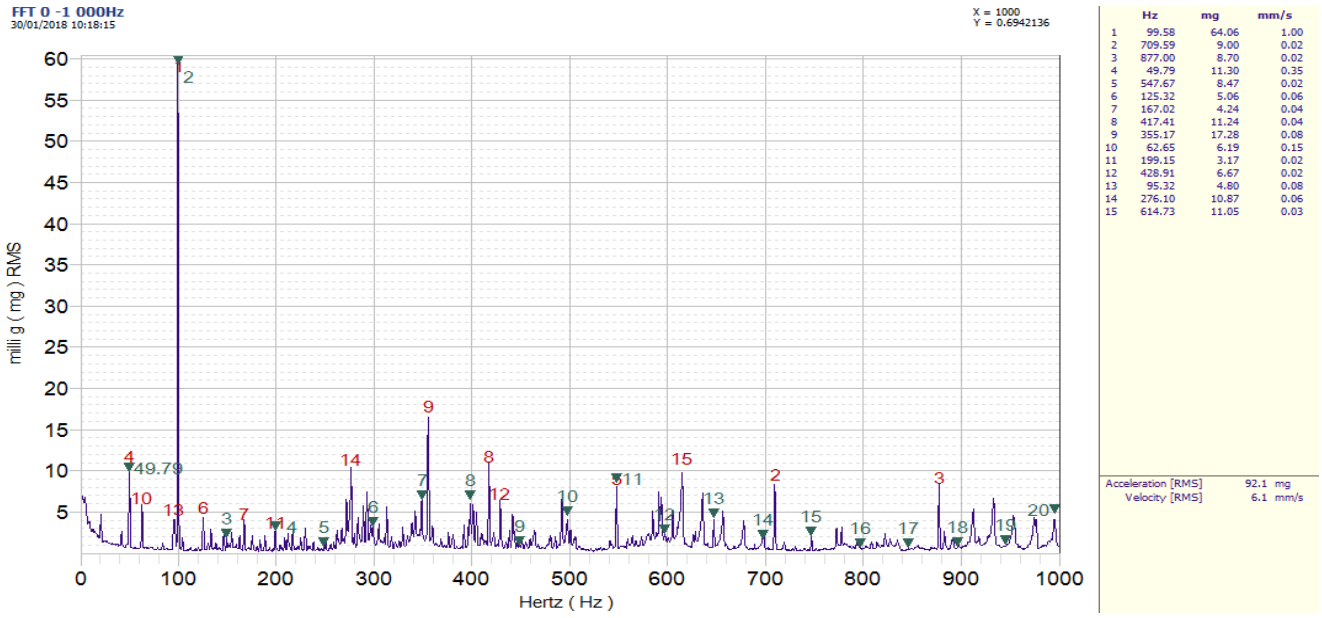


Figure I. 13 : Spectre 0-1000Hz – palier COA

I.7 Interprétation (diagnostic des experts)

Relevés vibratoires sur le moteur électrique du GEP C : Les spectres montrent que le moteur présente un problème de désalignement **[3]**

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques généralités sur la constitution de la machine a courant continu. Nous avons étalé les types de défaillances, et présenter d'une façon générale, l'enchaînement des mécanismes de défaillance probables dans un moteur mise en service, nous avons donné quelques domaines d'application, ainsi que leurs avantages et inconvénients.

A la fin du chapitre, nous avons donné quelques méthodes de surveillance et de diagnostique et nous avons mis l'accent sur la methode d'analyse vibratoire.

Chapitre II :

Procédures Expérimentales et Résultats

II.1 Introduction

La majorité des défauts d'une machine tournante repose sur une analyse vibratoire de la machine ou sur une analyse harmonique des courants statoriques Les vibrations furent les premières grandeurs mesurées à être utilisées dans les approches de diagnostic à base de signal, aujourd'hui mieux maitrisée et appliquée par SONATRACH, la surveillance par analyse vibratoire connait un nouvel essor et s'implante de plus en plus sur une large gamme de machines tournante.

Deux principales technologies de réalisation de la surveillance vibratoire:

- Mesures directes de déplacements des parties tournantes : réalisées à l'aide de capteurs à courant de Foucault mesurant en permanence les déplacements des arbres de machines. Cette technologie est presque toujours réalisée en temps réel et sa technologie de mise en œuvre est lourde.

- Mesures de l'accélération subie par les parties fixes de la machine : réalisées à l'aide d'un accéléromètre, relié à un collecteur de données, qui recueillie les vibrations subies par les carters des machines. Cette technique de surveillance s'effectue aussi bien en temps réel qu'en périodique.

Ce chapitre est dédié aux différents outils utilisées dans l'analyse temporelle et fréquentielle des signaux vibratoires enregistrés sur une machine en présence de défauts. Nous allons présenter les résultats des analyses effectuées sur des machines a courant continu utilisées comme auxiliaires de démarrage ou/et de freinage des turbines à gaz au sein de la société SONATRACH HASSI R'MEL, une méthode de classification qui repose sur d'extraction et de choix d'indicateurs de défauts à partir des signaux vibratoires est ainsi dévoilé.

II.2 Caractéristiques de la machine étudiée

II.2.1 Utilisation des moteur à courant continu sur les site dans SONATRACH

Les moteurs à courant continu sont adaptés à une grande variété d'applications dans la compagnie SONATRACH.**[ ]**:

1) Avec pompe d'huile pour lubrification de la turbine

Les caractéristiques de moteur étudié dans ce travail sont représentées dans le tableau II.1

Tableau II. 1 : Caractéristiques de moteur étudié [7]

Pa	13.3 KW
U	110V
I	141 A
Resistance de shunt	0.22, 0.08, 0.03

Figure II. 1 : Photographie de la machine a courant continu de banc d'essai

Figure II. 2 : Plaque signalétique de la machine

II.3 Description de matériel utilisé

La première étape conduisant à l'obtention d'une lecture de vibration consiste à convertir la vibration mécanique produite par une machine en un signal électrique équivalent. Cette opération est réalisée au moyen des capteurs de vibrations, deux types de capteurs sont utilisés:

- ✓ Les accéléromètres placés sur les paliers dans les directions verticales, axiales et radiales, (mesure d'accélération).

II.3.1 Les prosimètre

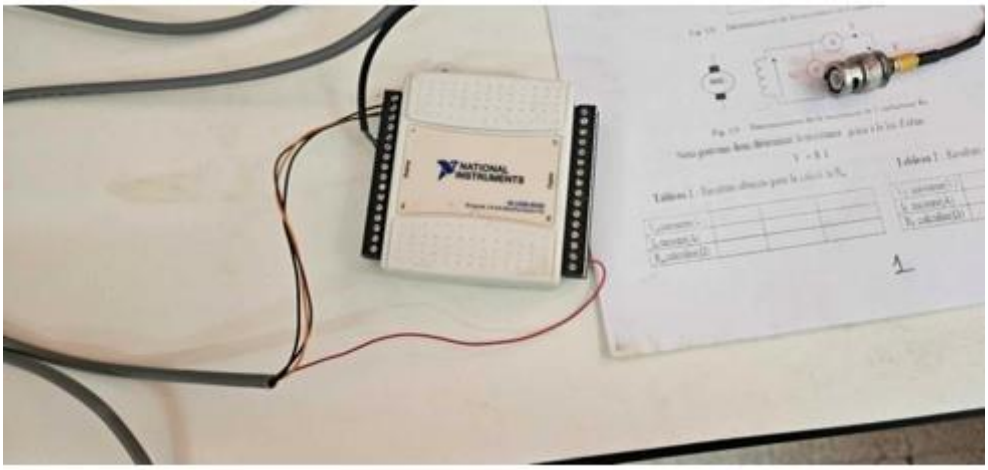


Figure II. 3 : Prosimètre

II.3.2 Vélocimétrie

Les capteurs de vitesse, ou vélocimétrie, sont constitués d'une sonde a contact dite sondesismique qui mesure le mouvement absolu de l'organe sur lequel elle est fixée.

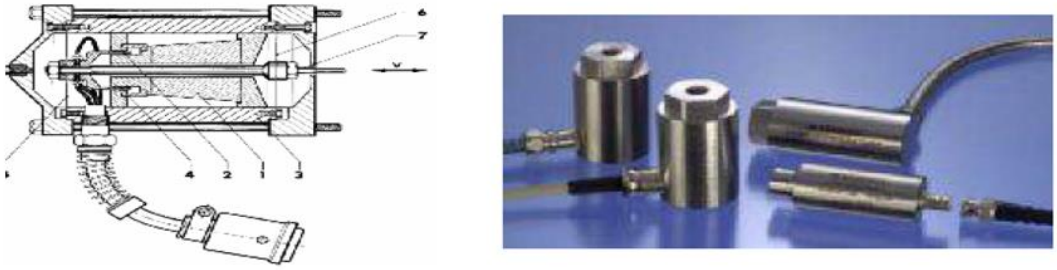


Figure II. 4 : Capteur de vélocimétrie. [8]

II.3.3 Les accéléromètres

L'accéléromètre piézoélectrique utilisé est composé d'un disque en matériau piézoélectrique (quartz), qui joue le rôle d'un ressort sur lequel repose une masse sismique précontrainte .

Ç)

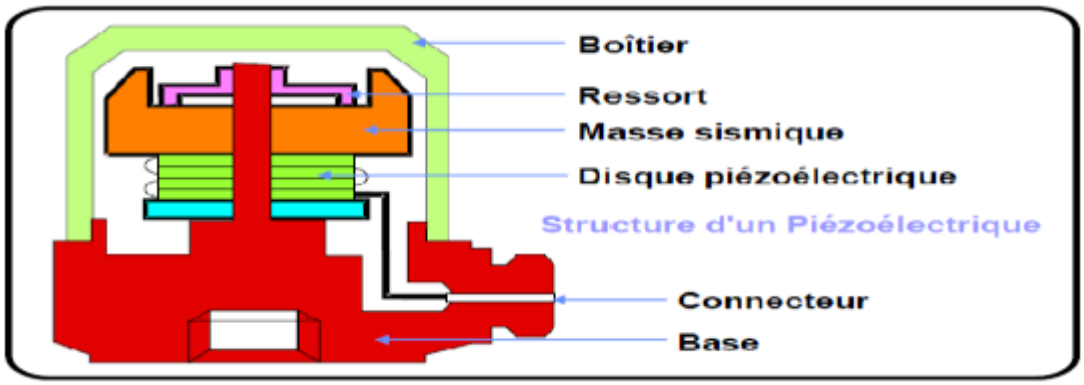


Figure II. 5 : Schéma de principe d'un accéléromètre.

Les accéléromètres piézoélectriques tendent à devenir les capteurs de vibration absolue les plus utilisés pour la surveillance. Ils possèdent les propriétés suivantes :

- ✓ Utilisables sur de très grandes gammes fréquentielles.
- ✓ Excellente linéarité sur une très grande gamme dynamique (typiquement 140 dB).
- ✓ Le signal d'accélération peut être intègre électroniquement pour donner le déplacement et la vitesse
- ✓ Aucun élément mobile, donc extrêmement durable.

Figure II. 6 : Photographie de capteur de vitesse utilisé [ ]

Figure II. 7 : Photographie de l'accéléromètre utilisé

II.4 Procédures de mesure

a) Le choix de points de mesure

Généralement, la localisation des points de mesure se fait pour les raisons suivantes:

- ✓ Les mesures de vibrations sont réalisées sur les paliers de la machine ;
- ✓ Le capteur doit être placé de façon à assurer un trajet direct aux vibrations. [9]

Les mesures peuvent, donc, se faire dans un plan radial (vertical : PRV, horizontal : PRH, oblique : PRO) ; et/ou dans un plan axial (axial : PA).

Pour notre machine, la mesure de l'accélération subie par les parties fixes de la machine est réalisées à l'aide d'un accéléromètre, relié à un collecteur de données, qui recueillie les vibrations subies par les carters des machines. [10]

Figure II.7 Différents points de mesure des vibrations.

Figure II. 8 : Machine CC

b) Présentation de la Banc d'essais

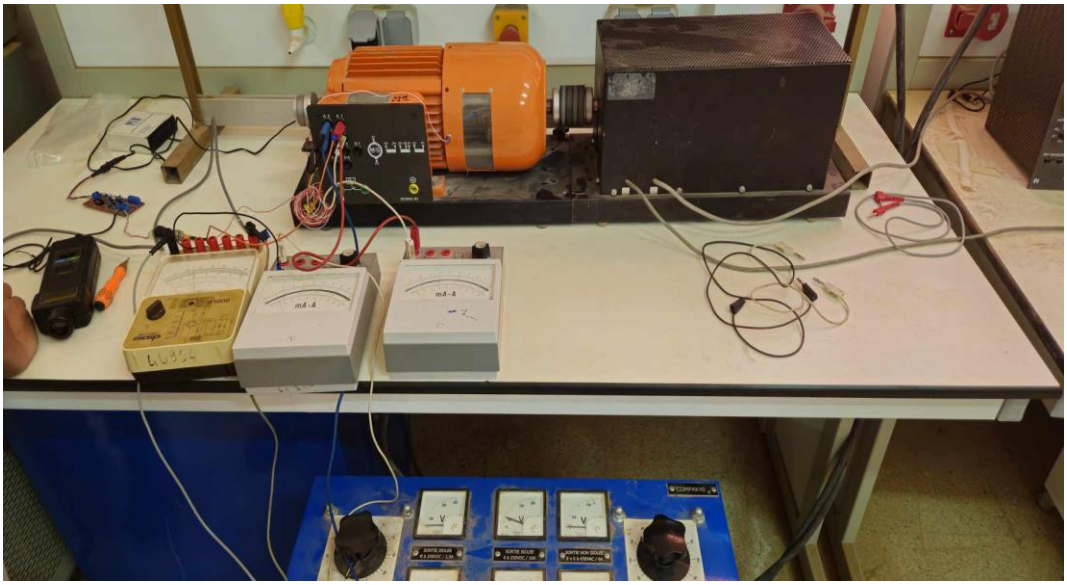


Figure II. 9 : Banc d'essais vibrations

II.5 Résultats et interprétation (Etude de défaut d'alignement)

II.5.1 Premier cas : variation de frequence de defauts en fontion de la charge

Relevés vibratoires en cas d'un moteur sain et avec défaut d'alignement, pour le Spectre 0-1000 Hz

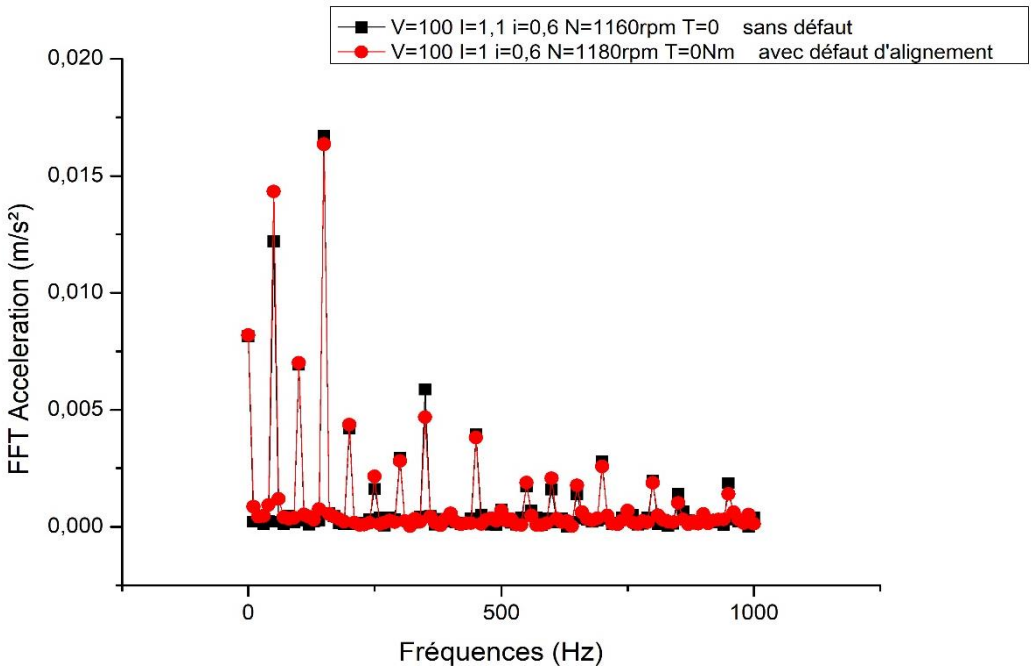


Figure II. 10 : Comparative des signaux vibratoires dans le domaine fréquentiel de deux cas sain et avec défaut d'alignement (a vide)

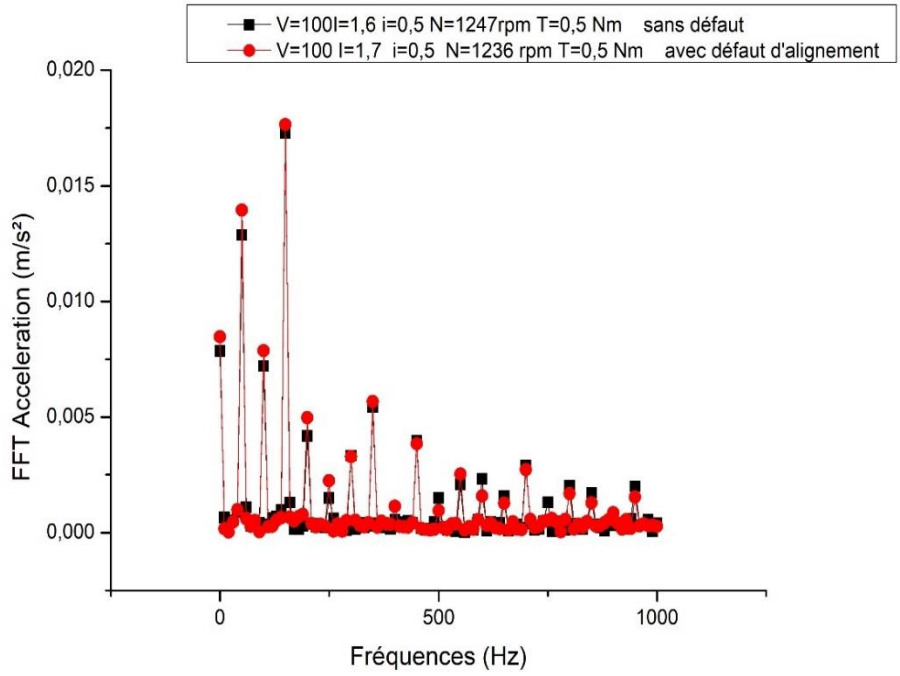


Figure II. 11 : Comparative des signaux vibratoires dans le domaine fréquentiel de deux cas sain et avec défaut d'alignement (avec charge 0.5 N)

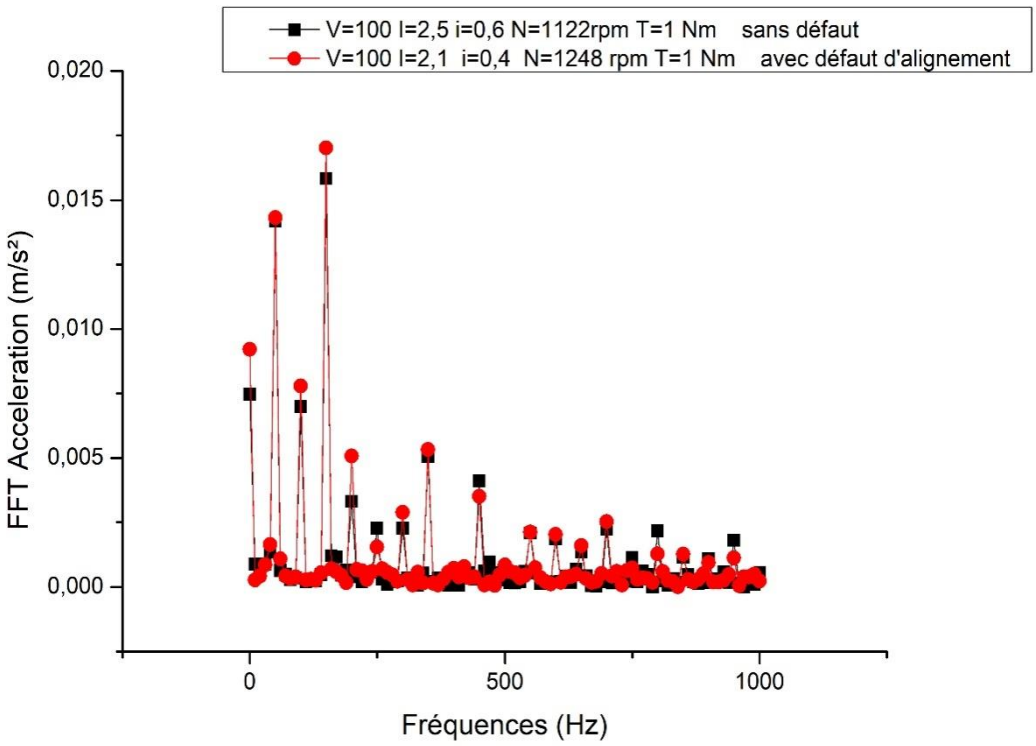


Figure II. 12 : Comparative des signaux vibratoires dans le domaine fréquentiel de deux cas sain et avec défaut d'alignement (avec charge 1 N)

D'aprés les figures II.10- II.12, le defaut d'aligenemnt dans le moteur à courant continu est caracterisé par les valeurs de frequence mentionnés dans le tableau II.2

Tableau II. 2 : caracteristiques de defaut de des alignement en fonction de la charge

Charge(N)	0		0.5		1			
Fréquence (Hz)	60	420	50	200	10	180	230	450
Pic Vib. (mm^2/s) Moteur Sain	0.012	0.007	0.012	0.004	0.007	0.016	0.003	0.004
Pic Vib. (mm^2/s) Moteur avec défaut	0.015	0.005	0.014	0.005	0.009	0.0175	0.005	0.0035

II.5.2 Deuxieme cas: Variation de frequence en fontion de tension d'alimentation

- **A vide :**

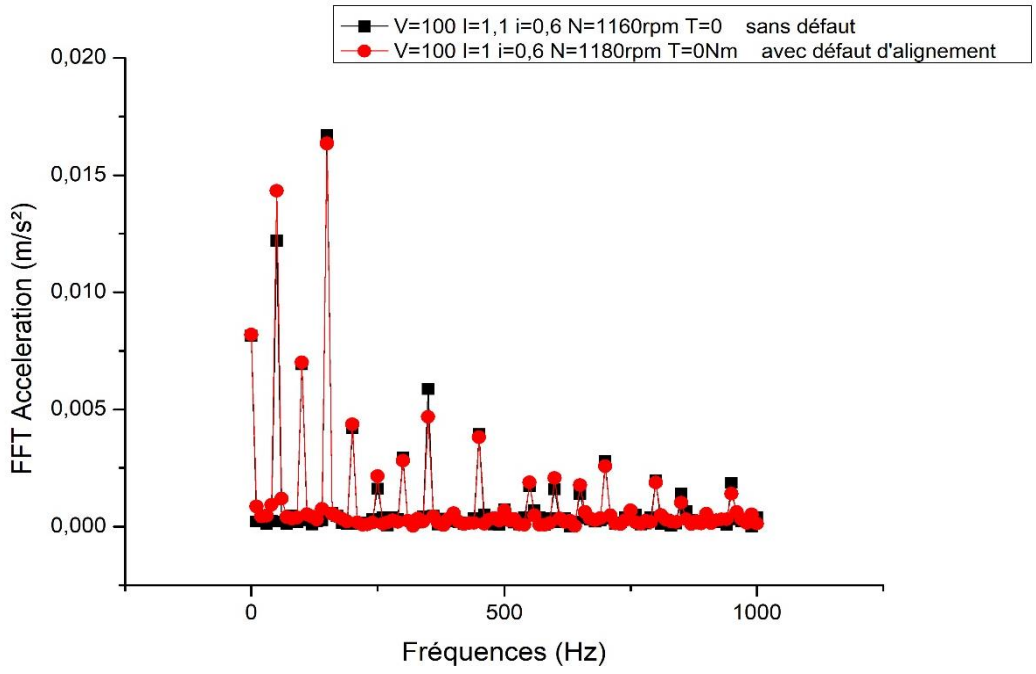


Figure II. 13 : Comparative des signaux vibratoires dans le domaine fréquentiel de deux cas sain et avec défaut d'alignement (T=0 ; V=100 V)

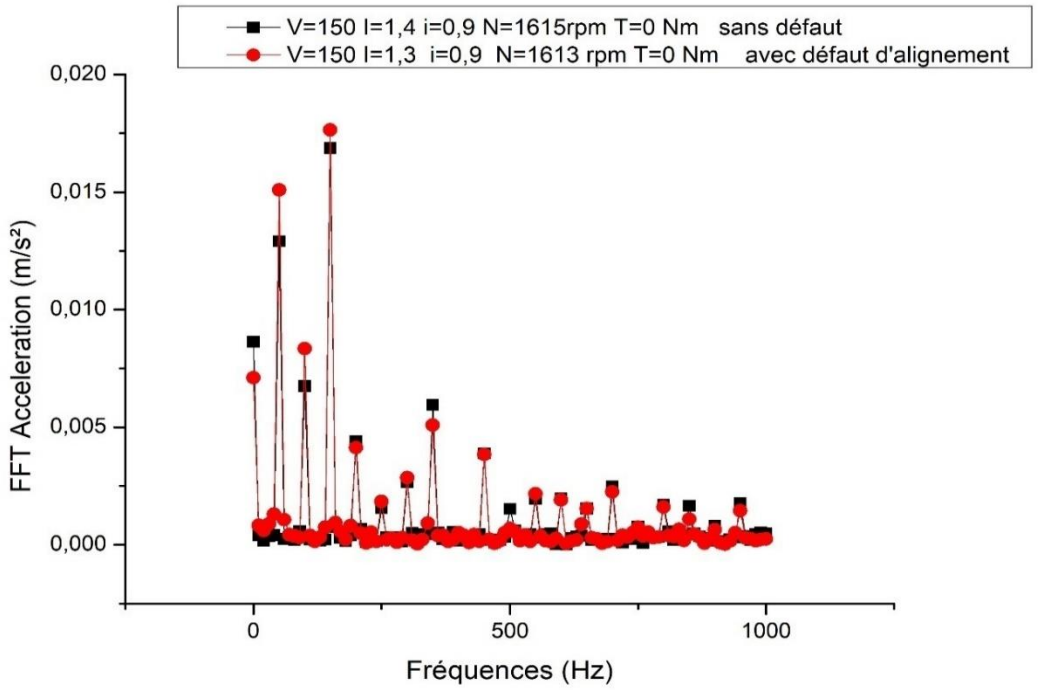


Figure II. 14 : Comparative des signaux vibratoires dans le domaine fréquentiel de deux cas sain et avec défaut d'alignement(T=0, V=150V)

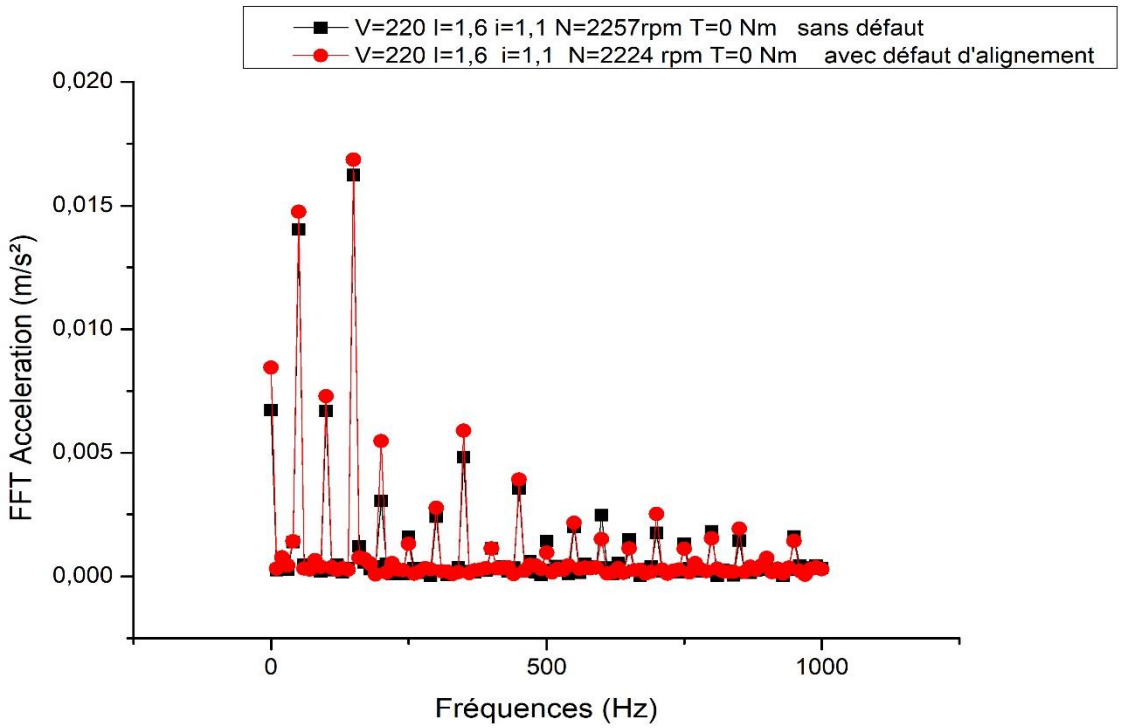


Figure II. 15 : Comparative des signaux vibratoires dans le domaine fréquentiel de deux cas sain et avec défaut d'alignement (T=0, V=220V)

D'aprés les figures II.13- II.15, l'effet de la variation de tension d'alimentation sur les frequences de defauts d'aligenemnt est recapitulé dans le tableau II.3

Tableau II. 3 : Effet de la variation de charge sur les reponses vibratoires de defaut de defaut de desalignement (à vide)

Tension (V)	100		150				220				
Fréquence (Hz)	60	420	10	50	100	200	10	60	200	400	
Pic Vib. (mm^2/s) Moteur Sain	0.012	0.007	0.008	0.013	0.006	0.006	0.006	0.014	0.002	0.004	
Pic Vib. (mm^2/s) Moteur avec défaut	0.015	0.005	0.006	0.015	0.008	0.005	0.008	0.015	0.005	0.007	

- **En charge :**

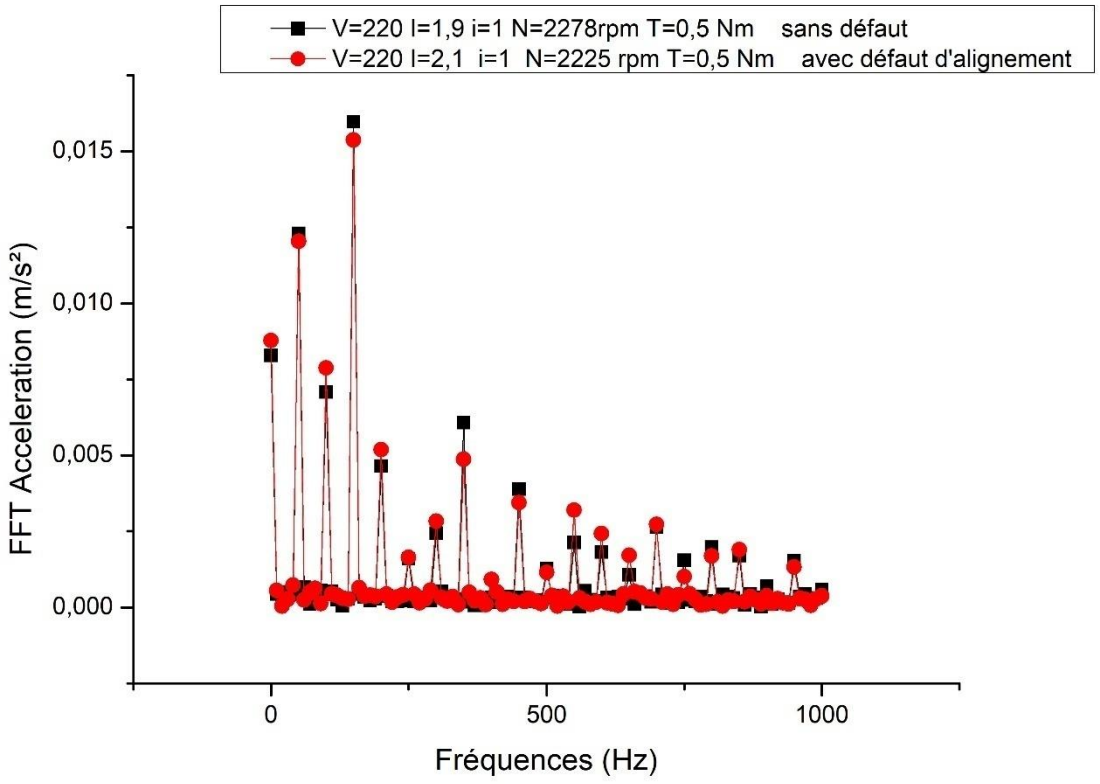


Figure II. 16 : Comparative des signaux vibratoires dans le domaine fréquentiel de deux cas sain et avec défaut d'alignement(T=0.5, V=220V)

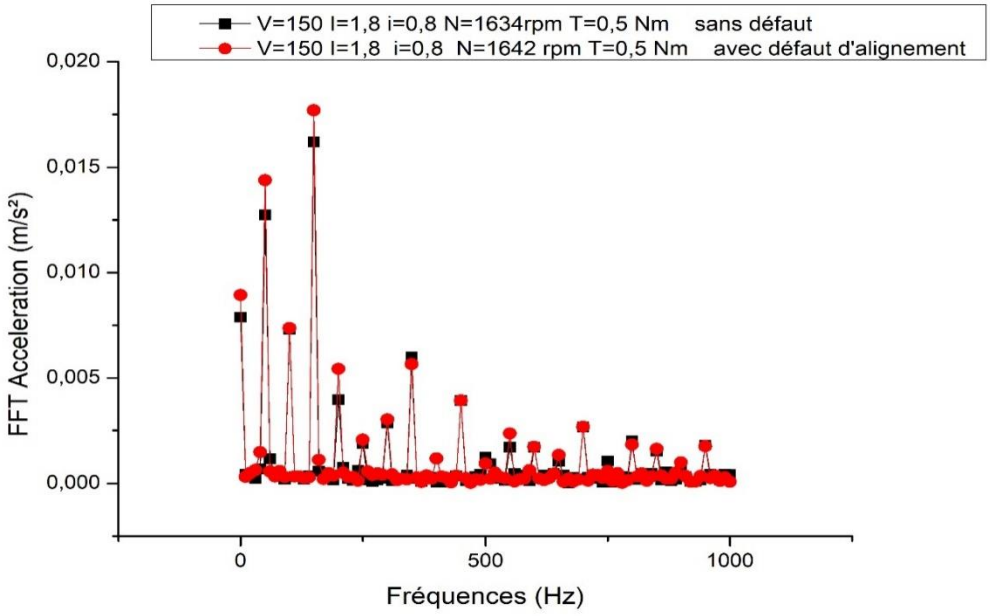


Figure II. 17 : Comparative des signaux vibratoires dans le domaine fréquentiel de deux cas sain et avec défaut d'alignement(T=0.5, V=150V)

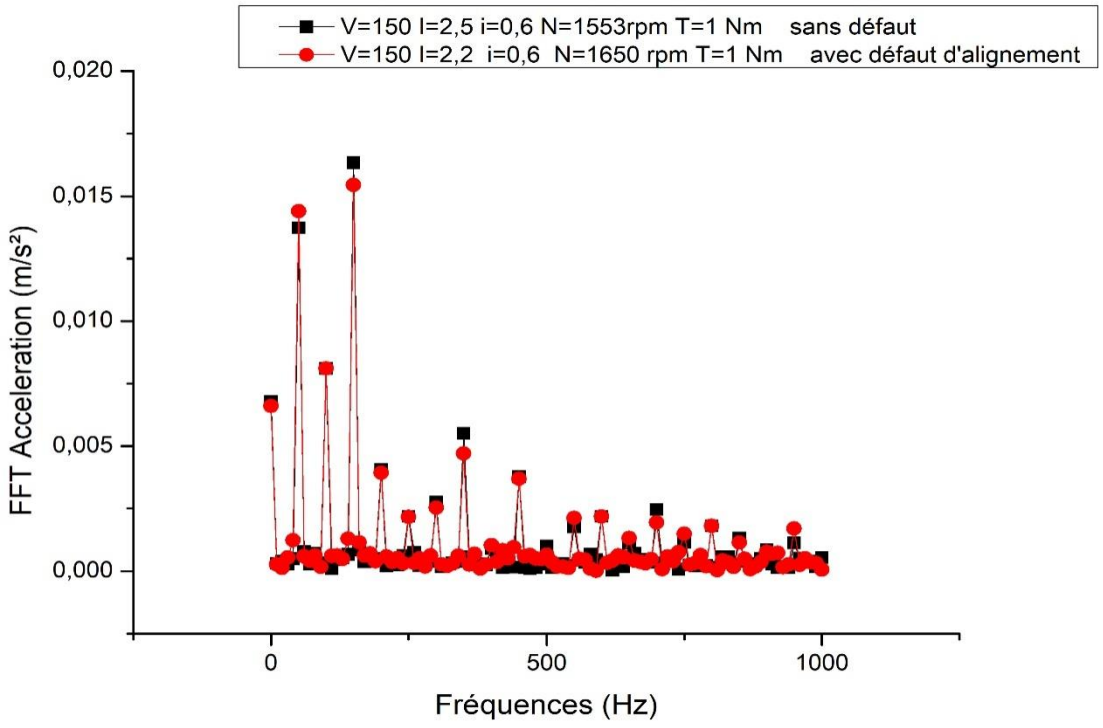


Figure II. 18 : Comparative des signaux vibratoires dans le domaine fréquentiel de deux cas sain et avec défaut d'alignement(T=1, V=150V)

D'aprés les figures II.16- II.18, l'effet de la variation de tension d'alimentation sur les frequences de defauts d'aligenemnt est recapitulé dans le tableau II.4

Tableau II. 4 : Effet de la variation de charge sur les reponses vibratoires de defaut de desalignement (en charge T = 0.5 ; 1 N)

Charge (N.m)	**0.5**		**0.5**				**1**				
Tension (V)	**220**		**150**				**150**				
Fréquence (Hz)	100	400	30	70	180	320	50	200	320		
Pic Vib. (mm^2/s) Moteur Sain	0.03	0.007	0.07	0.012	0.016	0.004	0.013	0.017	0.006		
Pic Vib. (mm^2/s) Moteur avec défaut	0.04	0.004	0.09	0.014	0.018	0.006	0.014	0.015	0.004		

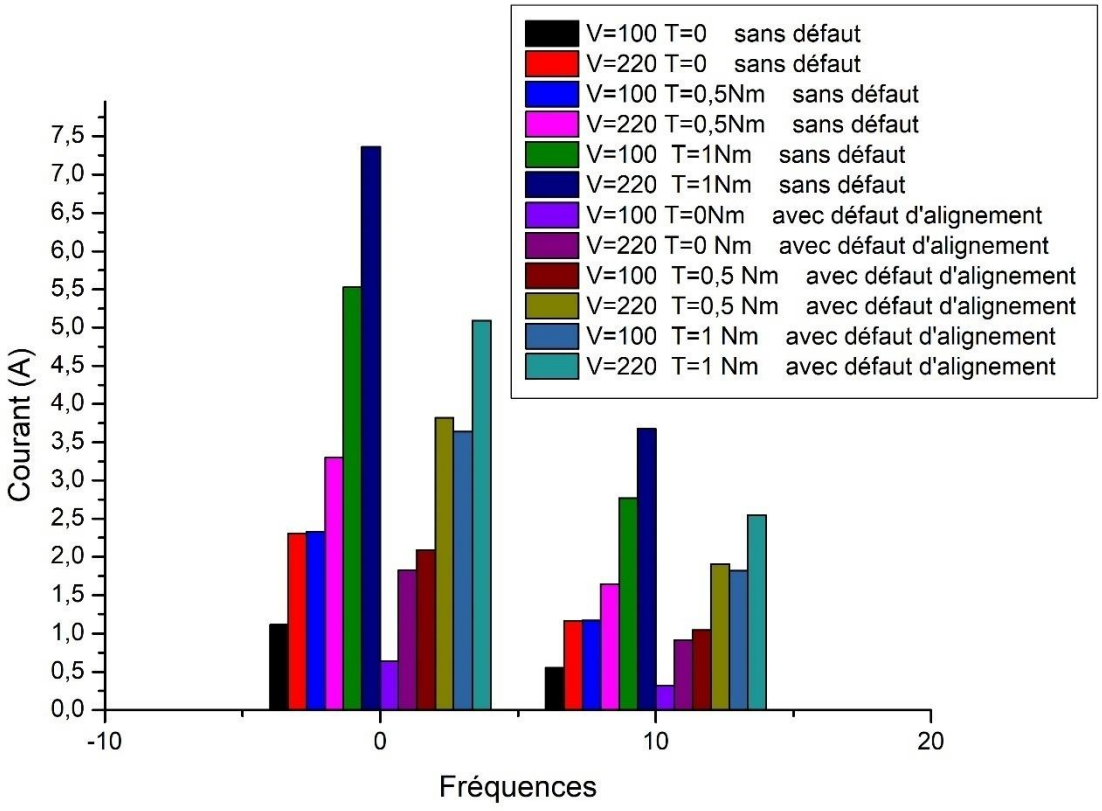


Figure II. 19 : variation de fréquence de défaut d'alignement en fonction de paramètres de services de moteur étudié

D'après les résultats expérimentaux obtenus, les paramètres caractérisant les défauts d'alignement dans le moteur à courant continu dans les différentes conditions de services sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau II. 5 : Récapitulatif des résultats d'essais sur le moteur CC

	1	2	3	4	5	6	7	8
Tension (V)	100	100	100	150	150	150	220	220
Courant I (A)	1	1.6	2.5	1.4	1.8	2.5	1.6	1.9
Courant i (A)	0.6	0.5	0.6	0.9	0.8	0.6	1.1	1
Charge T (Nm)	0	0.5	1	0	0.5	1	0	0.5
Vitesse (rd/min)	1160	1247	1122	1615	1634	1553	2257	2278
Tension (V)	100	100	100	150	150	150	220	220
Courant I (A)	1	1.7	2.1	1.3	1.8	2.22	1.6	2.1
Courant i (A)	0.8	0.5	0.4	0.9	0.8	0.6	1.1	1
Charge T (Nm)	0	0.5	1	0	0.5	1	0	0.5
Vitesse (rd/min)	1180	1236	1248	1613	1642	1650	2224	2225

À partir des résultats obtenus des expériences précédentes, nous observons une variation de l'intensité des fréquences des vibrations dans chaque expérience, ainsi qu'une différence dans le fonctionnement du moteur dans deux états : en présence d'un défaut d'alignement et en absence de tout défaut. Ainsi, nous constatons qu'en appliquant une tension de 100V, l'intensité de la fréquence de 50Hz augmente en cas de défaut, et cela lors de la rotation du moteur sans charge. Dans la même expérience, nous remarquons une augmentation de la fréquence de 350Hz figure II.9. Lors de l'application d'une charge de 0,5 Nm, la fréquence de 50Hz diminue légèrement en présence d'un défaut, accompagnée par une fréquence de 200Hz, comme illustré dans la figure II.10. Après avoir augmenté la charge à 1 Nm, on observe une augmentation des composantes de 0Hz, 150Hz, et 200Hz après l'apparition du défaut, comme indiqué dans la figure II.11.

Lorsque la tension est augmentée à 150V, les figures II.12, II.13 et II.14 montrent une augmentation des fréquences de 50Hz, 150Hz et 200Hz après l'apparition du défaut. À la tension maximale supportée par le moteur, soit 220V, nous observons un changement dans la fréquence des vibrations après l'application du défaut, où les valeurs des fréquences de 0 Hz, 200 Hz et 350 Hz augmentent lors du fonctionnement sans charge (figure II.15). Après l'application d'une charge de 0,5 Nm, le comportement des fréquences change ; la figure II.16 montre une diminution des fréquences de 100Hz, 150Hz et 350 Hz, tandis qu'en même temps la fréquence de 550 Hz augmente après l'apparition de la panne, ce qui contraste avec le comportement des vibrations dans les expériences précédentes.

La figure II.17 montre les résultats de l'analyse spectrale de la fréquence du courant d'alimentation, qui se compose de deux composantes: un courant continu et un courant alternatif

avec une fréquence de 10Hz. De manière générale, nous remarquons que le courant continu est relativement plus élevé que le courant alternatif dans la plupart des expériences, avec une augmentation proportionnelle à la tension d'alimentation et à l'intensité de la charge appliquée sur le moteur. En comparant les expériences du moteur dans son état normal et en présence d'un défaut, il apparaît que le courant diminue après l'apparition du défaut dans les deux composantes, continue et alternative.

II.6 Conclusion

Ce chapitre est consacré à la présentation de procédures expérimentales suivies, et l'interprétation de différents résultats obtenus des essais d'analyse vibratoire réalisés au sein de laboratoire des machines électriques au département électrotechnique.

Les résultats obtenus montrent clairement l'effet de défaut d'alignement sur les spectres vibratoires du moteur à courant continu, dans ses différentes conditions de fonctionnements.

Les fréquences caractéristiques de ce type de défaut extraites de résultats expérimentaux peuvent être utilisées pour construire un système de prédiction et de localisation de défauts, basé sur une des techniques de l'intelligence artificielle. Une idée générale sur cette technique ainsi que ses resultats sont présentés en détail dans le chapitre suivant.

Chapitre III :

Caractérisation de défaut de désalignement par IA

III.1. INTRODUCTION :

L'une des caractéristiques d'un expert humain, en traitant une question, est son jugement avec des données imprécises, inachevées et incertaines. Etudier un tel problème par des méthodes classiques exige la connaissance des différents paramètres qui peuvent influer sur celui-ci. Cette étude est souvent entachée d'erreurs et d'imprécisions qui accompagnent toute modélisation de processus. [11].

Il est possible de résoudre ce problème en utilisant des méthodes dites robustes et la logique floue en est une. Son idée est de capturer l'imprécision de la pensée humaine et de l'exprimer avec des outils mathématiques appropriés. [11] La théorie des ensembles flous a donné naissance à un traitement original de l'incertitude, fondé sur l'idée d'ordre, et qui permet de formaliser le traitement de l'ignorance partielle et de l'inconsistance dans les systèmes d'informations.

Son intérêt réside dans sa capacité de traiter l'imprécis, l'incertain et le vague, elle est issue de la capacité de l'homme à décider et agir de façon pertinente malgré le flou des connaissances disponibles, elle est appliquée dans les systèmes de réglage ainsi que dans les systèmes expert; dans les systèmes de décision et pour la reconnaissance de formes etc..

Dans ce chapitre nous allons présenter les éléments de bases de la logique floue ainsi que les étapes de conception d'un système de diagnostic basé sur la logique floue. Les résultats de l'application de cette méthode pour la détection et la caractérisation de défaut de désalignement dans les moteurs à courant continu, ainsi que leurs interprétations sont exposés a la fin du chapitre.

III.2 Généralités sur la logique floue

III.2.1 Concepts et définitions

Les systèmes flous peuvent être considérés comme des systèmes logiques qui utilisent des règles linguistiques pour établir des relations entre leurs variables d'entrée et de sortie. Ils sont apparus pour la première fois dans les années soixante-dix avec des applications dans le domaine du contrôle des processus1. Aujourd'hui, les applications des systèmes flous sont très nombreuses outre la commande, ils sont largement utilisés pour la modélisation, le diagnostic et la reconnaissance de formes. Pour une meilleure compréhension de leur fonctionnement, nous présentons brièvement quelques notions de base de ces systèmes, notamment les variables linguistiques [12].

III.2.2 Structure générale d'un système flou.

Chaque système basé sur la logique floue est composé de quatre blocs principaux

- Base de connaissances (paramètres des fonctions d'appartenance) Elle est composée de :

  - Une base de données qui fournit les définitions des concepts nécessaires utilisées pour définir les règles linguistiques et la manipulation des données floues. Ces concepts sont subjectivement définis et basés sur l'expérience et le jugement de l'expert.

  - Une base de règles qui est l'ensemble d'expressions linguistiques basé sur la connaissance d'un expert ou bien la logique de fonctionnement du processus. Cette connaissance et d'habitude formulée sous forme de règles « SI-ALORS ». Chacune de ces règles est composée d'une ou plusieurs permises reliées entre elles généralement par l'opérateur flou « ET » ou « OU » ; et une conclusion précédée par l'opérateur « ALORS ». L'ensemble des règles floues sont reliées entre elles généralement par l'opérateur flou «OU ». **[12,3]**

    - Fuzzification (transformation des entrées précises en degrés d'appartenance)
    - Defuzzification (transformation des résultats flous en sorties précises)

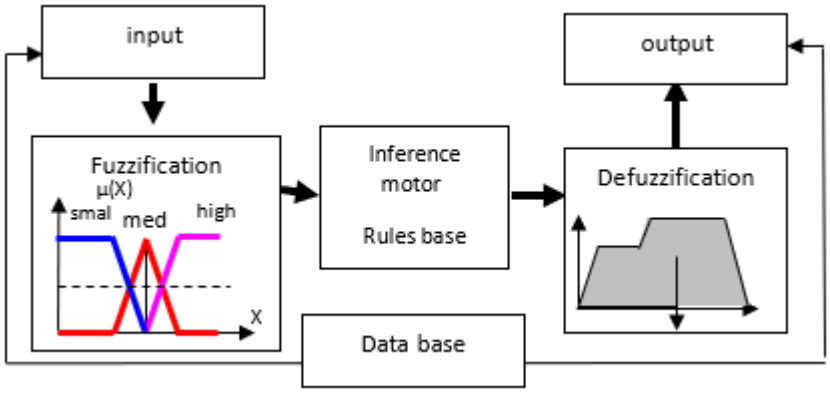


Figure III. 1 : Schéma général d'un système flou [12,3]

III.3 Conception d'un système flou

III.3.1 Univers de discours

Un des premiers pas dans la conception d'un système floue est de définir l'ensemble de référence ou univers du discours pour chaque variable linguistique. Pour ces variables x on définit un ensemble i sur un univers de discours X par une fonction « degré d'appartenance »

Par exemple : $\mu : X \rightarrow [0,100]$

$x \rightarrow \mu_i(x)$

L'univers de discours est l'ensemble des valeurs réelles que peut prendre la variable floue x et $\mu_i(x)$ est le degré d'appartenance de l'élément x à l'ensemble floue i.

Le pas suivant, est le choix des variables linguistiques qui déterminent son état, puis des règles linguistiques qui établissent les relations d'inférence entre ces variables. En général, les règles sont proposées par un expert. On partitionne ensuite le domaine de chaque variable linguistique en un ensemble de fonctions d'appartenance, qui expriment les valeurs de façon approximative : petit, moyen, grand, énorme par exemple.[13]

Les notions de valeurs « moyen » ou « faible » par exemple, sont relativement difficile a spécifier de manière précise. On peut fixer des seuils et considérer que l'on attribue tel ou tel qualitatif en fonction de la valeur de la variable par rapport à ces seuils.

On peut définir le degré d'appartenance de la variable A par exemple à l'ensemble «faible» comme le degré de vérité de la proposition « A est faible »

En logique booléenne, le degré d'appartenance μ ne peut prendre que deux valeurs (0 ou 1). La valeur A peut être :

Faible : $\mu_{faible}(A) = 1 ; \mu_{moyen}(A) = 0 ; \mu_{élevé}(A) = 0$

Moyen : $\mu_{faible}(A) = 0 ; \mu_{moyen}(A) = 1 ; \mu_{élevé}(A) = 0$

Elevé : $\mu_{faible}(A) = 0 ; \mu_{moyen}(A) = 0 ; \mu_{élevé}(A) = 1$

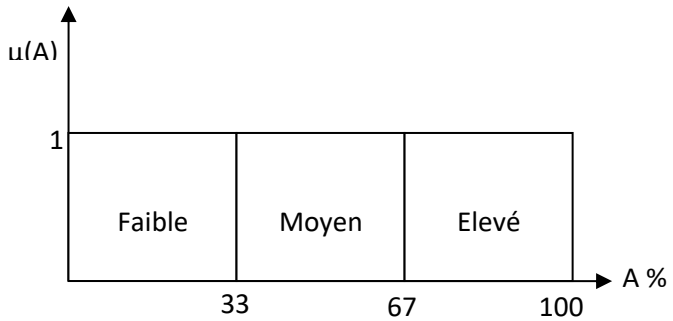


Figure III. 2 : Degré d'appartenance aux ensembles considérés en logique booléenne

Il ne peut pas prendre deux quantitatifs à la fois : [11-3]

En logique floue, le degré d'appartenance devient une fonction qui peut prendre une valeur réelle comprise entre 0 et 1 inclus, c'est la fuzzification.

III.3.2 Fuzzification

La fuzzification des variables d'entrée est une phase délicate du processus mis en oeuvre par la logique floue. Elle est souvent réalisée de manière itérative et requiert de l'expérience. La fuzzification comprend :

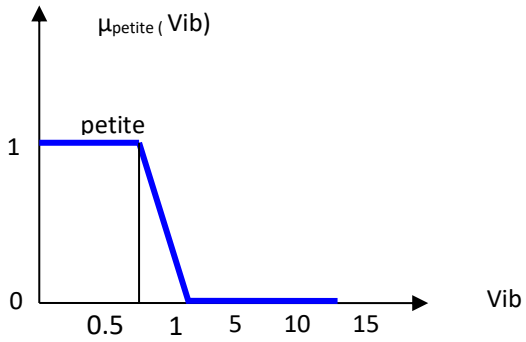
- Les mesures des variables d'entrées : En pratiques, les valeurs des variables d'entrées sont en général obtenus à l'aide de divers capteurs, organes de mesures, ou grâce à l'avis de différents opérateurs qui sont le plus souvent de type analogique.
- La conversion analogique digitale A/D (numérique/symbolique) ainsi que le traitement des grandeurs mesurées
- L'attribution de degrés d'appartenance à chaque valeur d'entrée est un passage des grandeurs physiques aux variables linguistiques (variables floues) qui peuvent être alors traitées par les inférences. [13]

Prenant l'exemple d'une valeur A = Valeur de pic vibratoire

La vibration est petite au dessous de 0.5.

A 1 elle est mentionnée qu'a mottée petite

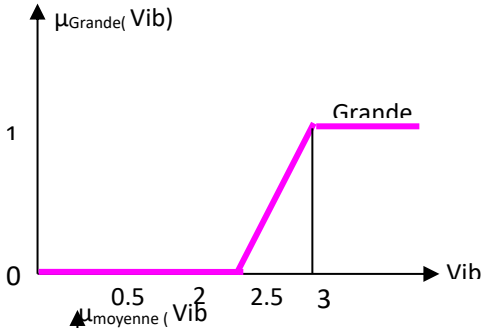
Il ne l'est plus du tout au delà de 1.



La concentration est grande au dessus de 3.

A 2.5, elle n'est "qu'à moitié" grande.

Il ne l'est plus du tout au dessous de 2.

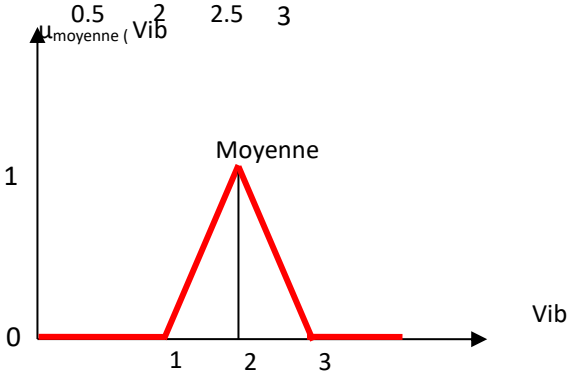


La vibration est tout à fait moyenne à 1

En dessous de 1, elle n'est pas assez grande

pour être moyenne.

Au delà de 3, elle ne l'est plus non plus.



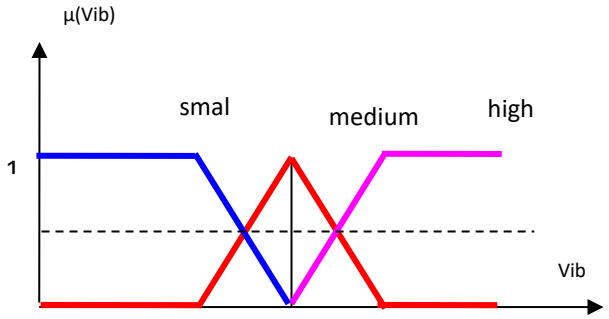


Figure III. 3 : Exemple de fonction d'appartenance de Vib

-Les fonctions d'appartenance

Le choix correct des fonctions d'appartenance d'un ensemble de termes joue un rôle essentiel dans la réussite d'une application. En ce qui concerne l'univers de discours, on peut ramener les grandeurs d'entrées dans l'intervalle [-1 +1], on parle donc d'une **normalisation** de l'univers de discours. Ainsi, la normalisation d'un univers de discours nécessite une connaissance antérieure de l'espace d'entrées/sorties. **[12,4].** Il n' y a pas de règles précises pour la définition de fonctions d'appartenance. On peut introduire pour une variable x trois, cinq ou sept valeurs linguistiques. Un nombre de valeurs linguistiques supérieur à sept n'apporte en général aucune amélioration au comportement du système. Par contre, un tel choix compliquerait la formulation des règles d'inférences. **[12]**

Les fonctions d'appartenance peuvent être symétriques, régulièrement distribuées ou avoir une distribution non uniforme. Il est important d'éviter le vide (lacunes) ou grand chevauchement de deux ensembles voisins. **[12,4]**

Pour les formes de fonction d'appartenance, le plus souvent, on utilise des formes trapézoïdales ou triangulaires. Il s'agit des formes les plus simples, composées par morceaux de droites. Dans la plupart des cas, ces deux formes sont suffisantes pour délimiter des ensembles flous.

Figure III. 4 : a)Fonctions d'appartenance de forme trapézoïdale ; b) Fonctions d'appartenance de forme triangulaire; c) Fonctions d'appartenance de forme de cloche [12,3]

Il ne faut pas oublier qu'il est indispensable de créer les fonctions d'appartenance pour les variables de sortie. D'habitude, on les crée de la même manière que les fonctions des entrées, c'est à dire en forme de triangle, de trapèze ou de cloche.

III.3.3 inférences floues

Les inférences lient les grandeurs mesurées et les variables de sortie par des règles linguistiques. Ces règles sont combinées en utilisant les connections ***et*** et ***ou*.** Les règles d'inférences peuvent être décrites de plusieurs façons. Linguistiquement, on écrit les règles de façon explicite comme dans l'exemple suivant :

- *Si (**la tension est grande**) ET (**La fréquence est moyenne**) ET **(le couple est grand)** , ET **(la vibration est Grande)**, ALORS on a un **défaut de désalignement Grand**.*

- *Si (**la tension est grande**) ET (**La fréquence est grande**) ET **(le couple est Moyen)** ET **(la vibration est moyenne),** ALORS **le moteur est Sain***

Symboliquement, il s'agit au fait d'une description linguistique où l'on remplace la désignation des ensembles flous par des abréviations. Dans ce cas nous allons considérer par exemple un système flou avec n règles linguistiques

Si $x = A_1$ et $y = B_1$ alors $z = C_1$

Si $x = A_2$ et $y = B_2$ alors $z = C_2$

… Si $x = A_n$ et $y = B_n$ alors $z = C_n$

Ou x, y et z sont des variables linguistiques qui représentent les variables d'état du processus et les variables A_i, B_i et C_i (i=1,n) sont les sous ensembles flous définis dans les ensembles de références pour x, y , z respectivement. [12]

III.3.4 Opérateurs de la logique floue

Il existe plusieurs lois de composition des conditions dans les systèmes flous; les plus couramment utilisés sont les suivantes :

• Quand des conditions sont liées par une logique **"ou"**, on considère le degré d'appartenance **maximum** parmi les conditions d'entrée.

• Quand des conditions sont liées par une logique **"et"**, on considère le degré d'appartenance **minimum** parmi les conditions d'entrée.

Alors, les opérateurs flous « OU » , « ET » et « ALORS » appliqués aux deux ensembles flous sont définis à l'aide de leurs fonctions d'appartenance de la manière suivante :

- Opérateur ET : il est réalisé par plusieurs méthodes. On se limite à celle du produit des deux degrés d'appartenance $\mu(x_1)$ et $\mu(x_2)$ des deux ensembles flous en question soit :

$$\mu(x_1, x_2) = \mu(x_1).\ \mu(x_2)$$

- Opérateur OU : La réalisation de cet opérateur se fait par exemple par la formation de la moyenne arithmétique des deux degrés d'appartenance $\mu_{1i}(x_1)$ et $\mu_{2j}(x_2)$ des deux ensembles flous i et j de x_1 et x_2 respectivement, c'est-à-dire :

$$\mu(x_1, x_2) = [\mu(x_1)+ \mu(x_2)]/2$$

- Opérateur ALORS : Elle permet d'évaluer le degré de vérité des propositions floues, elle est réalisée par plusieurs méthodes telles que le produit des deux fonctions d'appartenance $\mu_{1i}(x_1)$, et $\mu_{2j}(x_2)$ des deux ensembles flous i et j de x_1 et x_2 respectivement, c'est-à-dire :

$$\mu(x_1, x_2) = \mu(x_1).\ \mu(x_2)$$

III.3.5 méthodes d'inférences floues

Il existe plusieurs possibilités pour réaliser les opérateurs qui s'appliquent aux fonctions d'appartenances. On introduit la notion de méthode d'inférence, qui dépend des relations utilisées pour réaliser les différents opérateurs dans une inférence, permettant ainsi un traitement numérique de cette dernière. On cite les trois méthodes d'inférences les plus usuelles : Max-Min, Max-Produit et Somme Produit et on se limite à définir cette dernière qui est la plus utilisée.

-Méthode de somme produit

La méthode d'inférence somme-produit réalise, au niveau de la condition, l'opérateur « ou » par la formation de la somme, plus précisément par la valeur moyenne, tandis que l'opérateur « ET » est réalisé par la formation du produit.

La conclusion de chaque règle, précédée par « ALORS », liant le facteur d'appartenance de la condition avec la fonction d'appartenance de la variable de sortie par l'opérateur « ET », est réalisée par la formation du produit. L'opérateur « OU » qui lie les différentes règles est réalisé de nouveau par la formation de la moyenne arithmétique. Pour mieux comprendre on va traiter l'exemple suivant [12]**.**

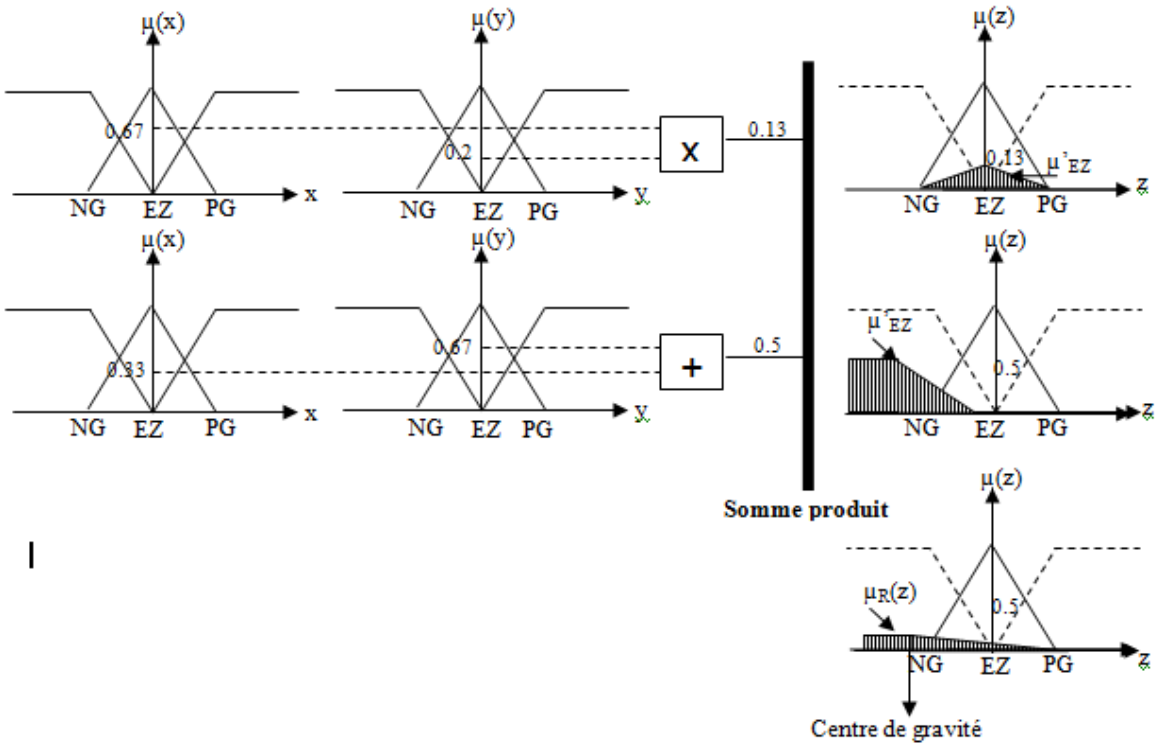


Figure III. 5 : Méthode d'inférence Somme-produit [12,3]

III.3.6. Defuzzification

La transformation d'une information floue en une information déterminée est la défuzzification (concrétisation). Pendant cette étape se fait la déduction de la grandeur de sortie numérique à partir de l'inférence floue,. Parmi les stratégies de défuzzification, nous citons la méthode de valeur maximale et la méthode de moyenne pondérée et la méthode de centre de gravité. **[12]**

La **technique du centre de gravité** est plus performante : il s'agit de calculer le centre de gravité de la fonction d'appartenance de la variable de sortie.

Le calcul du centre de gravité permet bien d'obtenir une seule valeur pour la grandeur de sortie. [11,14]

$$z^* = \frac{\int_{Z_0}^{Z_1} z\mu(z)dz}{\int_{Z_0}^{Z_1} \mu(z)dz}$$

III.4 Application de la logique floue

III.4.1 Fonctions d'appartenance

La base de données est représentée comme suit :

Le vecteur d'entrées E= [e_1, e_2, e_3, e_4] et le vecteur de sortie présenté comme S= [S, Dm.Dg.

Les vecteurs sont : E= [f, V, T, Vib] (fréquence de défaut, Tension d'alimentation, couple de charge, Valeur de pic vibratoire)

S= [Sain, Défaut moyen, Défaut grave] (les défauts correspondants)

A) Présentation de fonctions d'appartenance pour les entrées et la sortie

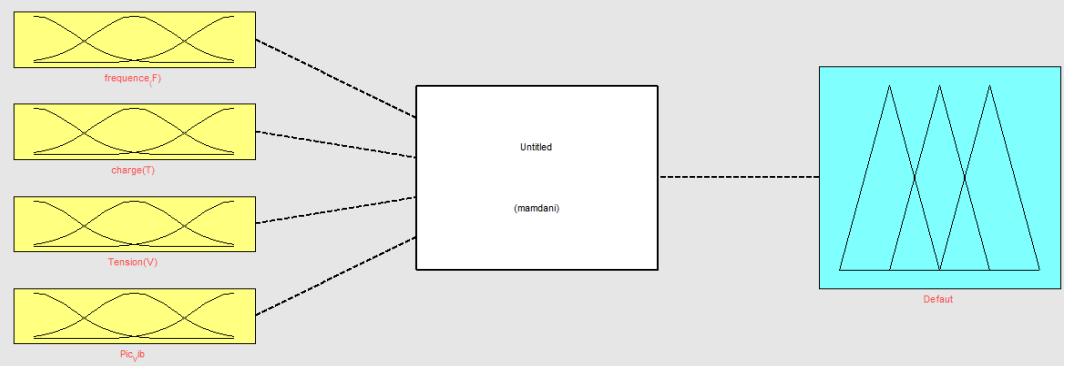


Figure III. 6 : Le système flou conçu

1) Fuzzification des variables d'entrée :

- Fréquence (F)

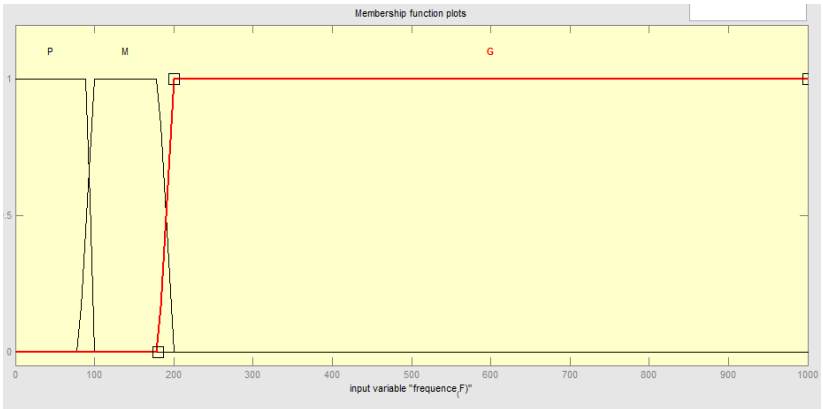


Figure III. 7 : Fonction d'appartenance de l'entrée (fréquence de défaut)

- **Charge(T)**

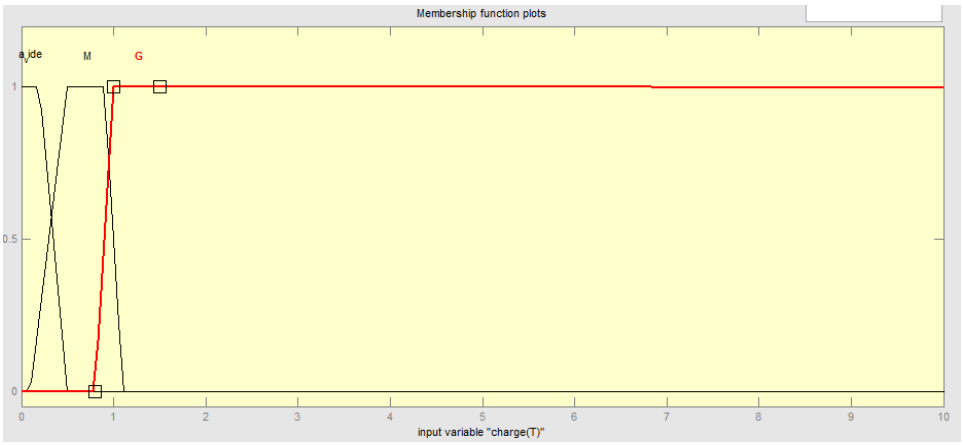


Figure III. 8 : Fonction d'appartenance de l'entrée (Couple de charge)

Tension d'alimentation (V)

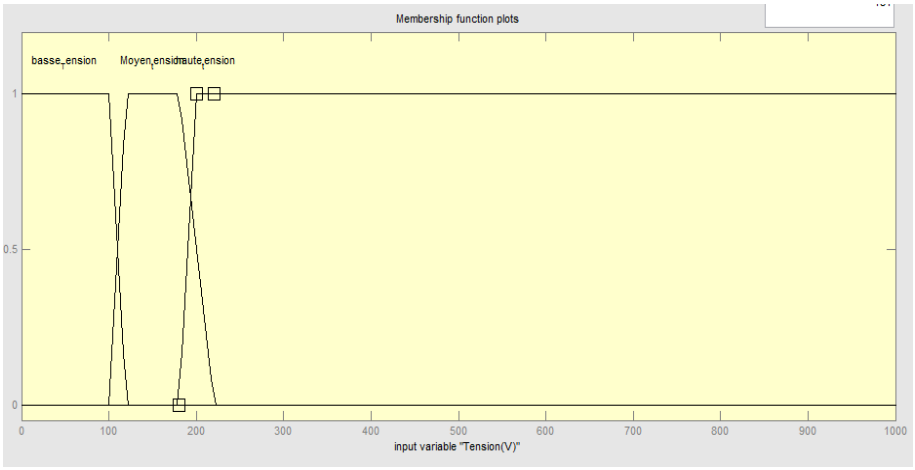


Figure III. 9 : Fonction d'appartenance de l'entrée (tension d'alimentation)

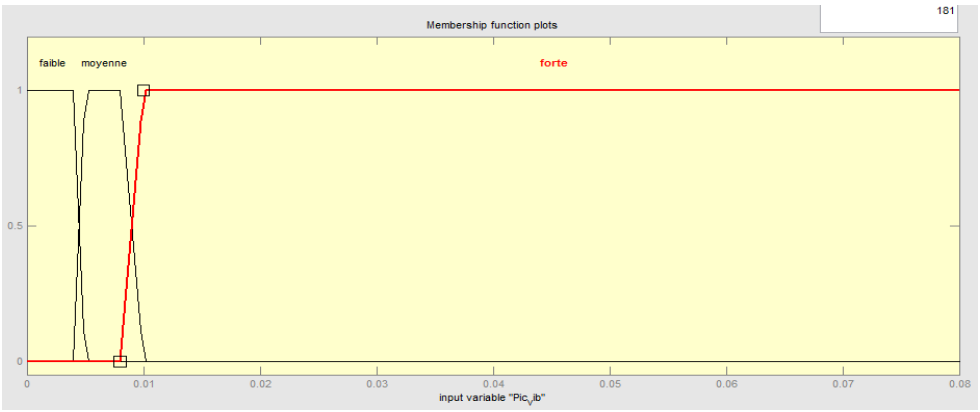


Figure III. 10 : Fonction d'appartenance de l'entrée (vibration)

2) Fuzzification du variable de sortie

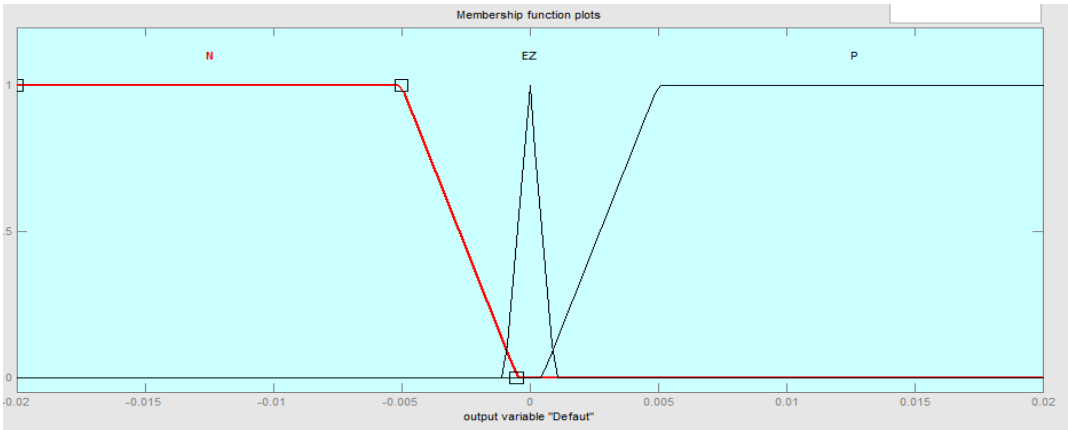


Figure III. 11 : Fonction d'appartenance de la sortie

III.4.2 Règles d'inférences :

Les règles d'inférences sont élaborées, la méthode utilisée pour les entrées des règles est la méthode somme-produit et la méthode du centre de gravité pour les sorties.

Par exemple : Si le moteur est a vide T est petit ***(P)*** *ET la tension basse, ET F est Petite est Petite Vib est grande* ***(M)*** *ET T est Haute* ***(H)*** *ET Vib est Forte* ***(G)*** *Alors on a un grand defayt de* ***désalignement important***

III.5 Résultats et discussions

Quinze(15) cas, ont été simulés par le système flou, et les résultats obtenus ont montrés que le système flou conçu est fiable pour la détection et l'évaluation de défaut dans le moteur à courant continu, dans différentes conditions de services.

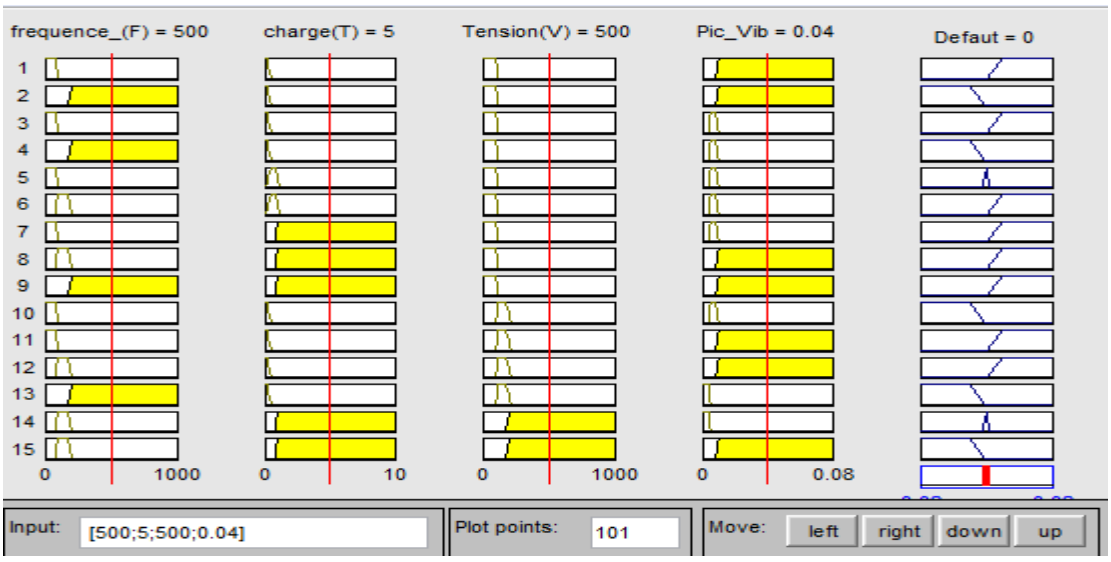


Figure III. 12 : Les règles d'inférences du système conçu

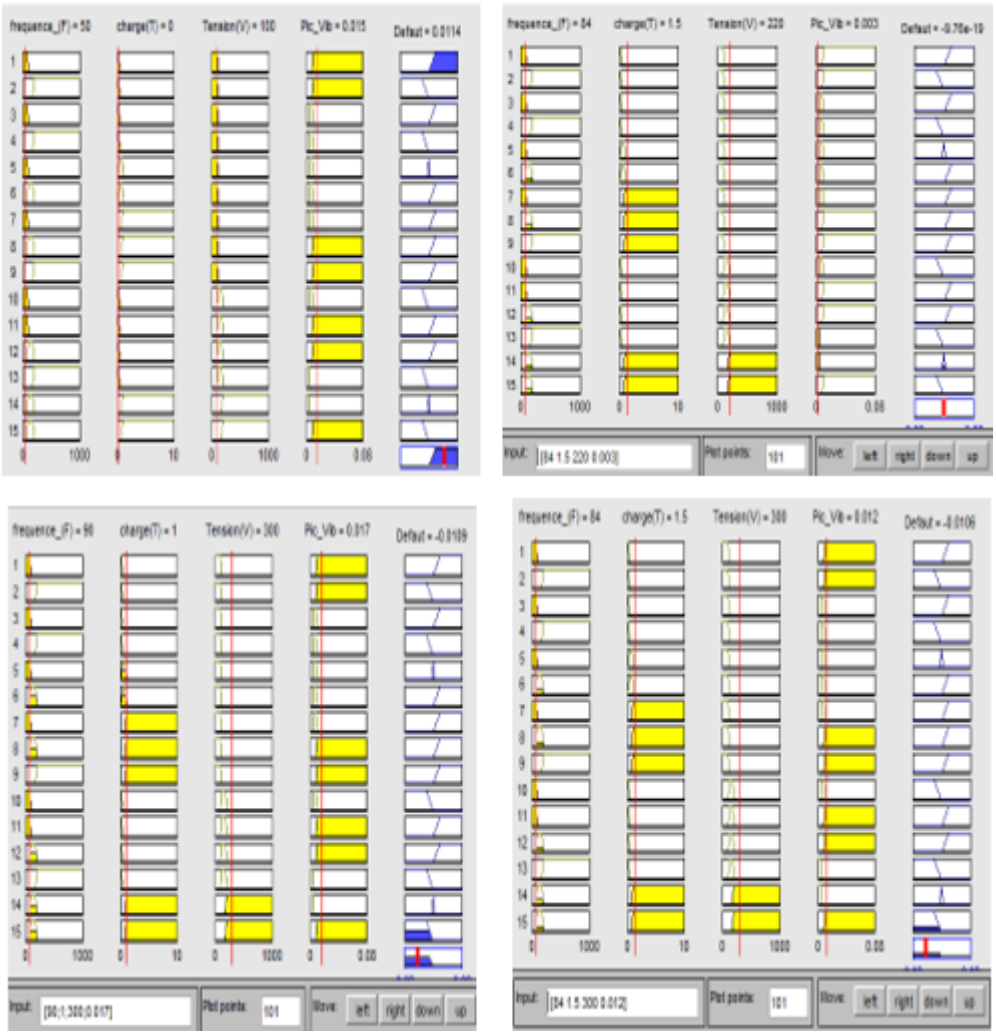


Figure III. 13 : Quelques exemples de résultats obtenu

III.5. Conclusion

Les résultats montrent l'excellent accord avec les défauts réels dans le moteur mis dans différents conditions de services, l'exactitude de diagnostic on utilisant la logique floue dépasse 85 %. Cette fiabilité du système floue se voit clairement dans l'évaluation précise du défaut. Il devrait être mentionné que le système intelligent (flou) conçu et appliqué dans le diagnostic pour les différentes machines asynchrones a été conçu dans l'environnement MATLAB.

Conclusion générale et perspectives

Le moteur à courant continu est le plus utilisable dans les différents domaines et dans l'industrie a cause de leur performances et le faible cout par rapports aux autres types moteurs, ces machines peuvent être affectées par des défaillances potentielles qui se répercutent sur la continuité et la qualité de service.

Le conflit de données rend le diagnostic de défauts dans le moteur à courant continu par un expert humain imprécis, incertain, et exige beaucoup de savoir faire et rapidité de décision.

Etudier un tel problème par des méthodes classiques exige la connaissance des différents paramètres qui peuvent influer sur celui-ci. Cette étude est souvent entachée d'erreurs et d'imprécisions, surtout que les défauts dans les machines tournantes n'apparaitre pas visuellement.,

Notre étude été pour objectif de donner aide d'évaluation, de diagnostic et de prise de décision rapide, surtouts pour les techniciens et les ingénieurs inexpérimentées, et ce pour le diagnostic correct et à temps, avant qu'il ne sera des conséquences graves.

L'applicabilité de l'intelligence artificielle dans cet objectif a donné des résultats satisfaisants, l'amélioration des techniques et méthodes classiques de surveillance et le diagnostic des défauts moteur à courant continu été claire surtouts dans les cas de diagnostic et de la localisation de défauts de désalignement sous la haute tension.

Il est nécessaire de mentionner que cette application nécessite une base de données variée et riches. Et vu que le service de maintenance de la compagnie SONATRACH n'a pas pu nous fournir les données nécessaires, à cause de la strict politique de confidentialité interne appliqué par ce dernier, nous avons compléter notre base de données expérimentales par les résultats d'analyse vibratoires faites pas des autres chercheurs et publiées récemment.

Il devrait être mentionné que le système intelligent (flou) conçu et appliqué dans le diagnostic pour les différentes machines asynchrones a été conçu dans l'environnement MATLAB.

Références Bibliographique

[1] M. Rezgui, A. Zelghi ; « Commande adaptative d'un moteur à Courant continu», Mémoire Master ; Option commande electrique ; Université de Biskra ; 2022

[2] TALBI Sali, DJEDDI Rania ; « Diagnostic de défaut d'un moteur à courant continu par observateur » ; mémoire master automatique et système ; Université costantine ; 2020.

[3] GAZZAM Abdelhak, SAFSAFA Chouaib ; « Diagnostic des défauts rotorique des machines asynchrones à cage par différentes techniques de traitement de signal», Mémoire de Master en Electromécanique, Université de Laghouat 2018.

[4] Hakima CHERIF, « Détection de défaut statoriques et rotoriques dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondulettes», Mémoire Magister, option commande et motorisation des vehicule electriques, Université Biskra 2014.

[5] BENLAHBIB Abderrahmane, BENLEKHDIM Mouhammed Amar, « Revue sur les méthodes de diagnostic des défauts dans les machines asynchrone », Mémoire de Master en Electromécanique, Université de Laghouat 2020.

[6] BOUGHAGHA Fouzi, « Diagnostic et détection des défauts mécaniques affectant les systèmes électromécaniques », mémoire Master, Université Badji Mokhtar Annaba , 2019.

[7] HACHEMI Mohammed, «Application de l'ODS à l'analyse des problèmes de vibration des machines tournantes» , mémoire master, 2012 .

[8] M. HORIMEK, « Apport de techniques de l'intelligence artificielle sur le diagnostic des defauts dans les machines asynchrones » ; Mémoire Master, Option Electromecanique ; Université Laghouat, 2021.

[9] Service de maintenance « Sonatrach du site Hassi R'mel ».

[10] GUERGUER Mounir, « Diagnostic de la machine asynchrone par analyse vibratoire », mémoire master, Université Constantine I, 2013

[11]] Jelena Godjevac, *« Idées nettes sur la logique floue »*, première édition polytechniques et universitaires, romandes, Lausane, Suisse.1996.

[12] Saliha Boudraa, *Analyse des gaz dissous dans les huiles de transformateurs en utilisant la technique de l'intelligence artificielle, mémoire magistère, Universite Batna, Algérie 2005*

[13] Saliha Boudraa, « *Maintenance des transformateurs de puissance par l'analyse de l'huile - Applications de l'IA-*», Thèse doctorat en sciences, Université de Batna, Janvier 2017.

[14] ABDELHAK OULMANE, « *Surveillance et diagnostic des défauts des machines tournantes dans le domaine temps-fréquences utilisant les réseaux de neurones et la logique floue* », thèse Doctorat, Ecole Polytechnique De Montréal, 2014.