الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université EchahidCheikh Larbi Tébessi–Tébessa Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de d'Électronique et Télécommunications

قسم الالكترونيك والاتصالات

Le 23/06/2025

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master**

Filière : Électroniques

Spécialité: Instrumentation

THEME

Utilisation de traitement du signal pour le diagnostic des moteurs électriques

Présenté par le binôme:

Tahar amel

Djellab nourhene

Présenté et évalué, le 10/ 06/ 2025, par le jury composé de

Nom et prénom	Grade	Qualité
M . Guiza Dhaouadi	MCA	Président
M . GATTAL Azzeddine	MCB	Encadreur
M . BOUABIDA Sedik	MCB	Examinateur

2024/2025

بسم الله الرحمن الرحيم



2025

Remerciements

Je souhaite ici exprimer mes remerciements les plus sincères à l'attention du Professeur GattalAzzeddine pour son aide, ses conseils d'une grande disponibilité et le fait d'être présent lors de ma remise de diplôme, sa bienveillanceet sonencadrement bienveillant ont eu un impact positif sur ma formation.

Je voudrais également exprimer toute ma reconnaissance et ma gratitude au DrJamelOunnes pour sa mise à disposition et ses précieux conseilstechniques

Dansl'établissement et le succès de notre circuit imprimé(PCB)qui ont

Directementcontribué à faire de notre projet une réussite.

Nous exprimons également nos plus vifs remerciements aux membres du jury et à ceux quiauront accepté de lire et de corriger cette recherche.

Merci enfin à tous ceux qui ont bienvoulu nous aider, de près ou de loin;

à faire aboutir ce mémoire.

Je remercie de tout cœur chères et chères proches pour l'amour, les sacrifices et lesoutien dont ils m'ont entouré au long de cette aventureCe diplôme est le leurautant qu'il est le mien.

Dédicace

Nous avons avec beaucoup d'affection dédiéce ethumble travail de fin d'étudeà nos chers proches à nos parents,

A nos chères mamans,

Au reste de notre famille qui a fait de nous ce que nous sommes aujourd'hui et quis'est assuré de nous

guider dans nos démarches tout au long de notre vie avec leur aide, leurs grandes passions et leurs sacrifices.Atousnos amis

les mots ne manquent pas pour décrire mon amitié, alors merci pour vos sacrifices à mes côtés, je demande à Dieu

de perpétuer notre amitié.

À tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à mener à bien ce travail, même par leur humble présence



Résumé

Le diagnostic des moteurs électriques est une priorité dans l'industrie moderne pour garantir la fiabilité, la sécurité et le fonctionnement continu des équipements. Ce travail vise à exploiter des techniques avancées de traitement du signal pour détecter, analyser et prédire les défauts pouvant affecter les moteurs électriques, en particulier les moteurs asynchrones.

Dans ce contexte, nous avons conçu et réalisé un circuit électronique sur PCB dédié à la surveillance et au diagnostic en temps réel. Ce circuit est capable de capter les signaux son ore émis par le moteur , de les traiter localement, puis de détecter les défauts pour utilisé de traitement du signal intégrés

L'objectif principal de ce projet est de développer un système intelligent basé sur des techniques de traitement du signal acoustique pour diagnostiquer les défauts des moteurs asynchrones, en analysant les sons du moteur dans différents modes de fonctionnement, dans le but de détecter précocement les défauts et d'améliorer l'efficacité de la maintenance prédictive à l'aide de solutions électroniques intégrées

ملخص.

يعد تشخيص المحرك الكهربائي من الأولويات في الصناعة الحديثة لضمان موثوقية وسلامة والتشغيل المستمر للمعدات. يهدف هذا العمل إلى استغلال تقنيات معالجة الإشارات المتقدمة لاكتشاف وتحليل والتنبؤ بالأعطال التي قد تؤثر على المحركات الكهربائية، وخاصة المحركات غير المتزامنة.

وفي هذا السياق، قمنا بتصميم وإنتاج دائرة إلكترونية على لوحة الدوائر المطبوعة مخصصة للمراقبة والتشخيص في الوقت الفعلي. تتمتع هذه الدائرة بالقدرة على التقاط الإشارات الصوتية الصادرة عن المحرك ومعالجتها محليًا ثم اكتشاف الأعطال باستخدام عيوب في معالجة الإشارة المتكاملة المستخدمة.

يتمثل الهدف الأساسي من هذا المشروع في تطوير نظام ذكي قائم على تقنيات معالجة الإشارات الصوتية لتشخيص أعطال المحركات غير المتزامنة، وذلك من خلال تحليل أصوات المحرك في أوضاع تشغيل مختلفة، بهدف الكشف المبكر عن الأعطال وتحسين فعالية الصيانة التنبؤية باستخدام حلول إلكترونية مدمجة..

Abstract

Electric motor diagnosis is a priority in the modern industry to guarantee the reliability, the security and the functions that continue with the equipment. This allows you to use various techniques to detect the signal in order to detect, analyze and prevent defects that affect the electric motors, especially the motors asynchronous.

In this context, we have been able to detect and detect an electronic circuit on the PCB for surveillance and diagnostic testing at real time. This circuit is capable of detecting sonorous signals from the motor, the local traitor, defects for used integrated signal processing..

The main objective of this project is to develop an intelligent system based on acoustic signal processing techniques to diagnose asynchronous motor faults, by analyzing motor sounds in different operating modes, with the aim of early detection of faults and improving the effectiveness of predictive maintenance using integrated electronic solutions..

sommaire

Introduction générale…… 01

Chapitre 01:Généralités sur les moteurs asynchrones

1.1 Introduction…… 04
1.2 Le moteur électrique …… 04
1.2.1 Définition …… 04
1.2.2 Constitution …… 05
1.2.3 Les différentes types des moteur électrique…… 05
1.2.3.1 Moteur à courant continu(CC)…… 06
1.2.3.2 Moteur à courant Alternatifs (AC) …… 06
1.3 Moteur asynchrones triphasée …… 07
1.3.1 Définition …… 07
1.3.2 Elément de constitution de la moteur asynchrones triphasée…… 07
1.3.2.1 Le stator…… 08
1.3.2.2 Le rotor …… 09
1.3.2.3 Les palies …… 10
1.4 Principe de fonctionnement…… 11
1.5 Les différents types de moteur asynchrones triphasée…… 12
1.5.1 Moteur Asynchrone à Cage d'Écureuil…… 12
1.5.2 Moteur Asynchrone à Rotor Bobiné (ou à bagues)…… 12
1.5.3 Moteur Asynchrone à Double Cage…… 13
1.5.4 Moteur Asynchrone à Pôles Bobinés…… 13
1.6 Comparaison des types de moteur asynchrones triphasée)…… 13
1. 7 Principaux défauts électrique de la moteur asynchrone triphasée…… 14
1.7.1 Défauts d'ordre mécanique…… 14
1.7.1.1 Défauts des roulements…… 14
1.7.1.2 Défauts du flasque…… 16
1.7.1.3 Défauts de l'arbre…… 16
1.7.1.4 Défauts d'excentricité…… 17
1.7.2 Défauts d'ordre électrique…… 18
1.7.2.1 Défauts des circuits électriques statoriques…… 18
1.7.2.2 Défauts des circuits électriques rotoriques…… 19
1.8 Classification des défauts…… 20
1. 9 Conclusion…… 21

Chapitre 02: Méthodes de diagnostic des moteurs asynchrones

2.1 Introduction…… 24
2.2 Terminologie technique du diagnostic…… 24
2.3 La Différentes techniques de diagnostic moteur asynchrone …… 25
2.3.1 Diagnostique des défauts par estimation paramétrique…… 26
2.3.2 Diagnostic des défauts par reconnaissance des formes…… 27
2.4 Mesure du bruit moteur…… 27
2.4.1 Description du stand de mesure …… 27
2.4.2 moteur asynchrone triphasé…… 27
2.4.3 Microphone…… 28
2.4.3 Ordinateur…… 28
2.5 Création base de données…… 30
2.6 Prétraitement…… 30
2.6.1 Numérisation…… 32
2.7.Traitement…… 32

2.7.1 La Méthode du nombre de passages par zéro…… 32
2.8 Conclusion…….. 39

Chapitre 03 :Conception d'une Carte Électronique pour le Diagnostic des Moteurs Asynchrones

3.1 Introduction…… 41
3.2 Les outillesutiliser …… 41
3.2.1 ARDUINO UNO…… 42
3.2.2 Le logiciel OrCAD …… 42
3.3 système de diagnostic..... 43
3.3.1 La pré-amplification…..... 43
3.3.1.1 Gain du préamplificateur…… 44
3.3.1.2 Simulations du pré amplificateur …… 45
3.3.2 Amplification …… 46
3.3.2.1 Calcul du gain …… 46
3.3.2.2 Description et explication des ondes …… 48
3.3.3 Circuit de mise en forme…… 49
3.3.1 Description et explication des ondes 50
3.4 Schéma générale..... 51
3.5 Conception et réalisation de PCB de diagnostic des moteurs..... 51
3.6 Composants utilisés dans le circuit..... 52
3.7 Fonctionnement de la carte de surveillance des moteurs asynchrones..... 52
3.8 Conclusion 54
Conclusion général…… 56
Liste des référence..... 58
59

LISTE DES FIGURES

Chapitre 01

Figure 1.1: Moteur électrique…… 4
Figure 1.2:Composition d'un moteur électrique…… 5
Figure 1.3: Moteur asynchrone …….. 8
Figure 1.4:Paquet statorique et stator bobiné…….. 8
Figure 1.5: Rotor à cage d'écureuil…… 9
Figure1.6: Rotor bobiné …… 10
Figure 1.7:Les Paliers……10
Figure 1.8:règle de la main droite…… 11
Figure 1.9: Vue éclatée des éléments constitutifs d'un roulement à billes…… 15
Figure1.10: Représentation des différents défauts d'excentricité…… 18
Figure1.11:Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée…… 20
Figure1.13 : Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasé…… 21

Chapitre02

Figure 2.1: Moteur asynchrone triphasé…… 28
Figure 2.2: stand de mesure…… 29
Figure2.3: Bruit du moteur normal…… 31
Figure 2.4: Bruits du moteur sur aliment…… 31
Figure 2.5 Bruit du moteur sous-alimenté …… 32
Figure 2.6:Bruit du moteur avec une phase manquante…… 32
Figure 2.7:Nombre de passage par zéro du moteur normal…… 33
Figure2.8:Nombre de passage par zéro du moteur suralimenté…… 34
Figure2.9: Nombre de passage par zéro du moteur sous-alimenté…… 34
Figure 2.10:Nombre de passage par zérodu moteur avec une phase manquante…… 35
Figure 2.11:Nombre de passage par zéro du moteur normal…… 35
Figure 2.12:Nombre de passage par zéro du moteur suralimenté…… 36
Figure2.13: Nombre de passage par zéro du moteur sous-alimenté…… 36
Figure 2.14:Nombre de passage par zérodu moteur avec une phase manquante…… 37
Figure 2.15:Nombre de passage par zéro du moteur normal…… 37
Figure 2.16:Nombre de passage par zéro du moteur suralimenté…… 38
Figure2.17: Nombre de passage par zéro du moteur sous-alimenté…… 38
Figure 2.18:Nombre de passage par zérodu moteur avec une phase manquante……39

Chapitre 03

Figure 3.1: Schéma bloc du système de diagnostic …… 42
Figure 3.2: Schéma électrique du pré amplification ……42
Figure 3.3: forme d'onde de la tension d'entrée du pré amplification …… 45
Figure 3.4: Schéma électrique de l' Amplification…… 46
Figure 2.5: forme d'ondes de l'entrée/sortie d'amplificateur …… 48
Figure 2.6: Schéma électrique de circuit de mise en forme …… 49

Figure 2.7:forme d'onde de mise en forme…….. 50

Figure 2.8:Schéma générale du système de diagnostic……51
Figure 2.9 :la carte imprimé PCB……54

Introduction Générale

Introduction Générale

La surveillance et le diagnostic des machines électriques représentent un enjeu scientifique et économique motivé par les objectifs de sûreté de fonctionnement et de continuité de service des entraînements électriques. Les défauts susceptibles de se produire sur ces dispositifs sont d'origines diverses : court-circuit d'enroulement, rupture de barre de rotor à cage d'écureuil, défaut de roulement, échauffement anormal de la machine, défaut de composant de l'onduleur, mais aussi décharge imprévue d'un accumulateur. Le diagnostic s'appuie sur un large éventail de techniques issues de plusieurs domaines : méthodes d'identification et d'observation d'état, analyse spectrale, filtre de Kalman, réseaux de neurones, logique floue. De plus, la modélisation des machines électriques en situation de défaut constitue un outil essentiel pour la simulation de ces défauts et leur détection grâce à des macro-modèles adaptés aux algorithmes d'identification ou d'observation d'état. Les moteurs asynchrones triphasés, très répandus dans l'industrie, sont soumis à diverses défaillances pouvant engendrer des arrêts imprévus et des coûts élevés. La détection précoce et fiable de ces défauts demeure un défi majeur. Il s'agit de développer des méthodes de diagnostic non invasives, précises et adaptées à un fonctionnement en temps réel, capables d'analyser les signaux moteur et d'identifier les signatures spécifiques des défauts, tout en intégrant ces méthodes dans un système pratique pour améliorer la maintenance prédictive **[1].**

Ce travail vise à contribuer à l'amélioration des techniques de diagnostic des moteurs asynchrones triphasés en s'appuyant sur des méthodes avancées telles que l'inférence paramétrique et la reconnaissance des formes. L'étude s'attache à développer un système de surveillance capable de détecter les anomalies de manière fiable et non invasive, validé expérimentalement par la conception d'une carte électronique dédiée. Pour ce faire, l'étude est organisée en trois chapitres **[2].**

Le premier présente le moteur asynchrone triphasé, ses composants principaux, ses différents types et une analyse détaillée des défauts mécaniques et électriques qui peuvent l'affecter **[3].**

Le deuxième chapitre aborde les méthodes de diagnostic, en détaillant les techniques d'estimation paramétrique et de reconnaissance des formes, ainsi que la mise en place

d'un banc d'essai pour la mesure et le traitement des signaux acoustiques du moteur **[4].**

Le troisième chapitre est consacré à la partie expérimentale, présentant la réalisation de simulations pour valider les méthodes proposées, ainsi que la conception et la fabrication d'une carte PCB pour l'acquisition et le traitement des données, permettant de tester et d'évaluer les algorithmes dans des conditions réelles en vue d'optimiser la maintenance prédictive **[5].**

Chapitre 01:

Généralité sur les moteurs asynchrones

1.1 Introduction

La diagnostic des défauts des moteurs asynchrones est crucial pour garantir leur fonctionnement continu et pour réduire les coûts liés à la maintenance et à la réparation [1], Ces défauts peuvent être classés en plusieurs catégories principales [2]. et peuvent être détectés à l'aide de diverses techniques, telles que l'analyse des vibrations, l'analyse de la signature spectrale [3], ainsi que l'inspection électrique et thermique [4].

Dans ce chapitre, nous présentons le système étudié, qui, dans notre cas, se limite à une machine asynchrone triphasée [5]. Après avoir examiné les composants de cette machine, nous aborderons son principe de fonctionnement [6]. Nous analyserons ensuite les différents défauts susceptibles de survenir dans les composants de l'appareil [5]. Enfin, nous discuterons de la classification des défauts internes et externes du moteur asynchrone [7].

1.2 Le moteur électrique

1.2.1 Définition

Le moteur électrique est un dispositif qui transforme l'énergie électrique en énergie mécanique à l'aide d'un champ magnétique. Il est largement utilisé dans de nombreuses applications industrielles, domestiques et dans le secteur du transport, notamment dans les appareils électroménagers **[8, 9]**. **La figure1.1** illustre un example simple d'un moteur électrique



Figure1.1: Moteur électrique

1.2.2 Constitution

Le moteur électrique asynchrone est composé de deux éléments principaux : le stator et le rotor. Le stator, alimenté par un courant alternatif, génère un champ magnétique tournant. Le rotor, situé à l'intérieur du stator, est mis en mouvement par l' interaction avec ce champ magnétique [10].

La différence de vitesse entre le champ tournant produit par le stator et la vitesse réelle du rotor engendre le phénomène d'asynchronisme, qui donne son nom à ce type de moteur.

La figure 1.2 ci-dessous illustre un moteur asynchrone simple, mettant en évidence ses composants principaux : le stator, le rotor, ainsi que les bobines responsables de la génération du champ magnétique nécessaire à son fonctionnement.

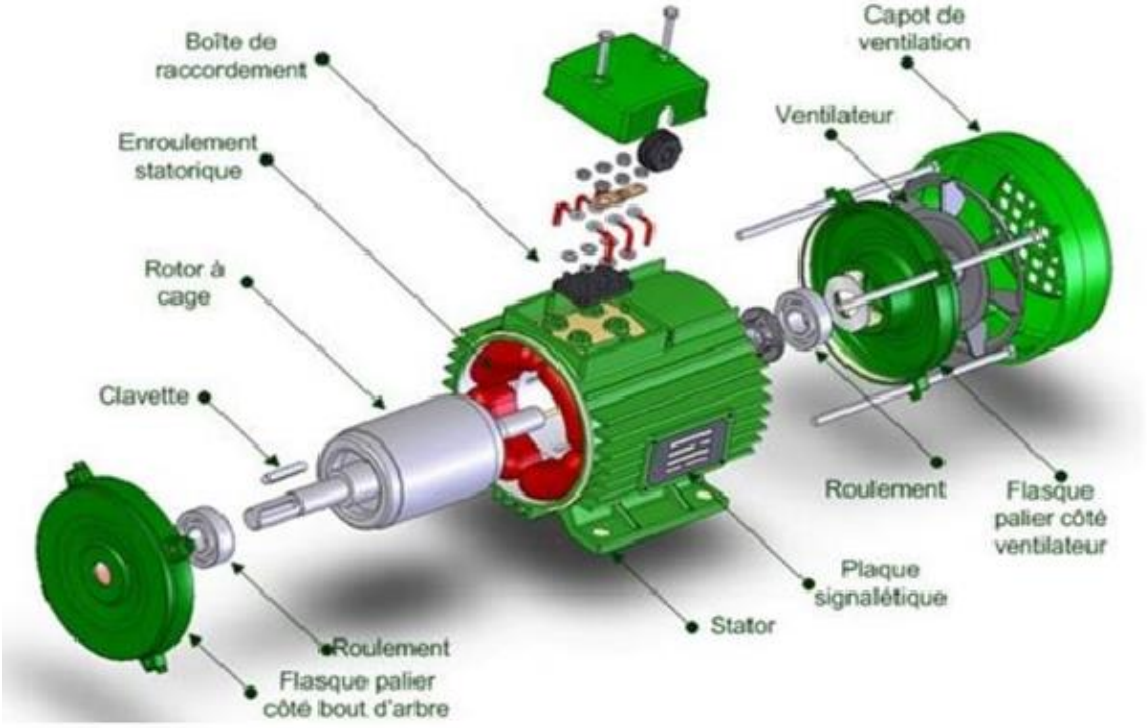


Figure 1.2: composition d'un moteur électrique

1.2.3 Les différents types des moteur

Les moteurs peuvent être classés selon plusieurs critères, notamment leur source d'énergie et leur principe de fonctionnement. Voici les principaux types de moteurs :

1.2 .3.1 Moteur à courant continu (CC)

- **Moteur à excitation indépendante** : L'inducteur et l'induit ont des sources d'alimentation séparées [11].
- **Moteur à excitation série** : Le courant traverse successivement l'inducteur et l'induit, ce qui permet un couple élevé au démarrage [11].
- **Moteur à excitation shunt**: L'inducteur est en parallèle avec l'induit, offrant une vitesse plus stable [11].
- **Moteur sans balais (Brushless)**: Plus efficace et durable, utilisé dans l'électronique et l'aéronautique [11].

1.2.3.2 Moteur à courant alternatif (AC)

- **Moteur synchrone**: avec rotor à aimants permanents ou à rotor bobiné [12].
- **Moteur asynchrone (ou à induction):**monophasé ou triphasé [12].
- **Moteur pas à pas:** utilisé en automatisation robotique [13].

Parmi les différents types de moteurs électriques évoqués, le moteur asynchrone triphasé se distingue comme l'un des plus importants et les plus utilisés dans divers domaines et applications industrielles .

Il représente à lui seul environ 80 % des moteurs électriques utilisés à travers le monde, ce qui témoigne de son omniprésence dans le secteur industriel. Il est couramment employé dans les pompes, compresseurs, monte-charges, ventilateurs, et machines-outils, entre autres.

Lorsqu'une adaptation de la vitesse de rotation est nécessaire, des réducteurs de vitesse peuvent être montés sur l'arbre du moteur afin d'ajuster la vitesse en fonction de la charge de travail .

La simplicité de construction, la robustesse, le faible besoin en entretien, ainsi que le coût relativement bas du moteur asynchrone contribuent à sa fiabilité et à sa large adoption dans le domaine industriel [12].

1.3 Moteur asynchrone triphasé

1.3.1 Définition

Transformant l'énergie électrique en énergie mécanique grâce aux phénomènes électromagnétiques, les moteurs asynchrones triphasés, également appelés moteurs à induction triphasés, occupent une place prépondérante dans le parc mondial des moteurs électriques, représentant environ 80 % de l'ensemble [12].

Ces moteurs assurent un échange d'énergie bidirectionnel entre un réseau électrique alimenté en courant alternatif et un système mécanique. Ils peuvent être alimentés par un réseau monophasé ou triphasé, ce qui leur confère une grande flexibilité d'utilisation.

Leur succès s'explique notamment par des performances jusqu'à 50 % supérieures à celles des moteurs monophasés, ce qui les rend particulièrement adaptés aux applications industrielles exigeantes [12].

1.3.2 Elément de constitution de la moteur asynchrone triphasé

Le moteur asynchrone triphasé,qualifié également de moteur d'induction triphasé,est composé de deux parties qui sont le stator (fixe) et le rotor (tournant)[13].

- **Le rotor (partie tournant)** est formé de disques de l'enroulement magnétique empilés sur l'arbre de la machine sous le support d'un enroulement bobiné ou injecté.[13].
- **Le stator (partie fixe)** est constitué de disques d'enroulement magnétique porteursdes enroulements pris en charge par le circuit magnétiquedestiné à magnétiser l'entrefer [13].
- **Les palier**s permettent la rotation du rotor, en supportant les parties(rotor,stator) ensemble.**la figure1.3** ci-dessous illustre un moteur asynchrone

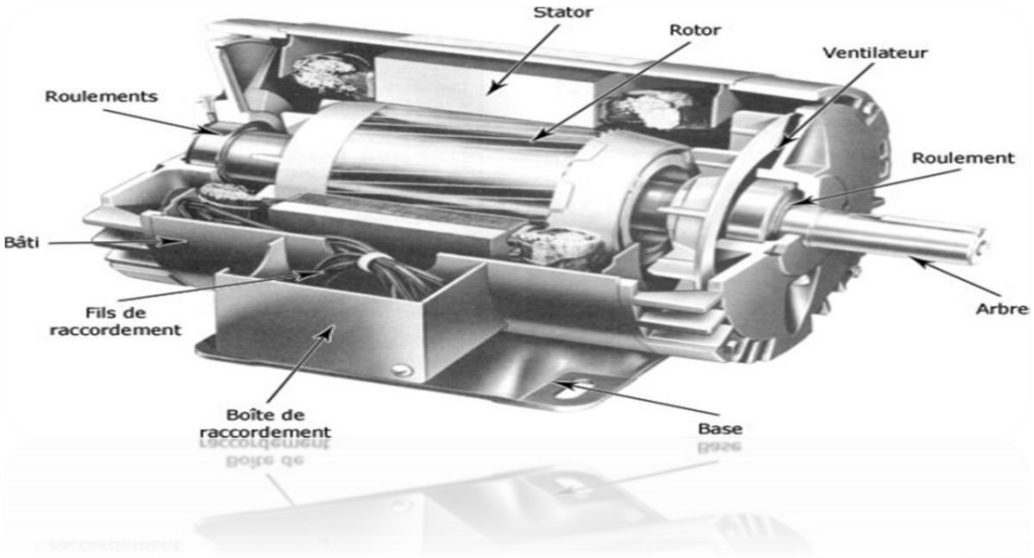


Figure 1.3:moteur asynchrone

1.3.2.1 Le stator

Il se compose d'une structure en acier, la quelle renferme un empilage de tôles identiques qui constituent un cylindre creux ; celles-ci sont percées de trous au niveau de leur périphérie intérieure. Selon les trous, des encoches sont alignées par les quelles passe un bobinage triphasé. Entre ces tôles ,une isolation par oxydation pour les moteurs de petites et moyennes puissances, et un vernis isolant, pour les moteurs de grande puissance [14].comme le montre **la figure1.4** suivante :



Figure 1.4:paquet statorique et stator bobiné

1.3.2.2 Le rotor

Le rotor est constitué d'un cylindre formé de tôles empilées, présentant des perforations sur leur périphérie extérieure afin de former des encoches destinées à recevoir les conducteurs.

L'entrefer, c'est-à-dire l'espace qui sépare le rotor du stator, est très réduit, généralement compris entre 0,4 mm et 2 mm. On distingue deux types de rotors : le rotor à cage d'écureuil et le rotor bobiné [15].

- **Rotor à cage d'écureuil :** l'**e**nroulement en cage d'écureuil est constitué de barres conductrices nues**,** généralement en cuivre**,** insérées dans les encoches du rotor**.** Ces barres sont court-circuitées à leurs extrémités par deux anneauxqui les relient électriquement, formant ainsi une structure rappelant la forme d'une cage d'écureuil.

  Dans les moteurs de petite et moyenne puissance, les barres et les anneaux sont souvent réalisés d'un seul tenant, ce qui simplifie la fabrication et améliore la robustesse de l'ensemble [16**]. la figure 1.5** illustre clairement cette configuration.

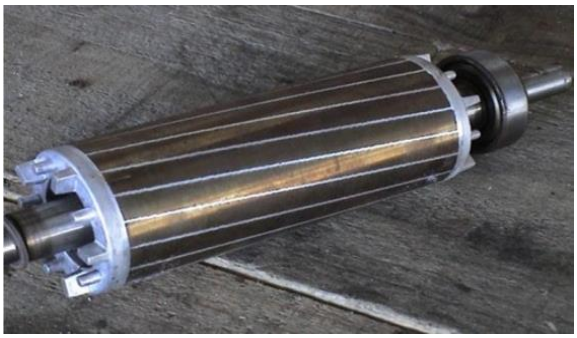


Figure 1.5: Rotor à cage d'écureuil

- **Rotor bobiné:** Le rotor à bobines est équipé d'un bobinage triphasé, similaire à celui du stator, placé dans les encoches du rotor.

  Il est constitué de trois enroulements reliés en étoile, dont les extrémités libres sont connectées à des bagues tournantes fixées sur l'arbre.

Ces bagues permettent, via trois balais, de connecter lors du démarrage une résistance extérieure en série avec chacun des enroulements, facilitant ainsi la limitation ducourant de démarrage et l'amélioration des performances du moteur [17]. **la figure 1.6** ci-dessous illustre cette configuration

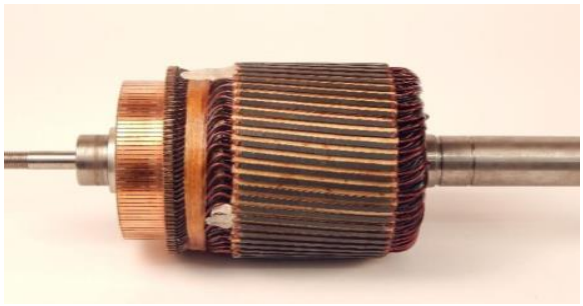


Figure 1.6: Rotor bobiné

1.3.2.3 Paliers

Les paliers assurent le support de l'arbre rotorique et garantissent sa rotation fluide. Ils sont constitués de flasques à billes, montés à chaud sur l'arbre.

Ces flasques, moulés en fonte, sont fixés au carter statorique à l'aide de boulons ou de tiges de serrage. L'ensemble ainsi assemblé forme la machine asynchrone à cage d'écureuil [18]. Comme le montre **la figure 1.7**



Figure 1.7:les Paliers

1.4 Principe de fonctionnement

Les trois bobines du stator, décalées de 120° les unes par rapport aux autres, sont alimentées par une tension alternative triphasée. Elles génèrent un champ magnétique variable qui tourne autour du stator à une vitesse proportionnelle à la fréquence de la tension d'alimentation. Ce champ est appelé champ tournant statorique.

Ce champ tournant induit un courant dans le rotor, ce qui justifie l'appellation de moteur triphasé à induction.

Les courants induits circulent dans les anneaux formés par la cage du rotor, et les forces de Laplace qui en résultent exercent un couple sur le rotor, provoquant ainsi la rotation de l'arbre moteur.

L'interaction des bobines entraîne la rotation du rotor à une vitesse légèrement inférieure à celle du champ tournant, phénomène connu sous le nom de glissement.

Selon la loi de Lenz, les courants induits s'opposent à la cause qui les a engendrés, d'où cette différence de vitesse.

Le rotor tourne donc dans le même sens que le champ tournant, mais avec une vitesse (en tours par minute, rpm) légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme [19].**la figure 1.8** ci-dessous montre.

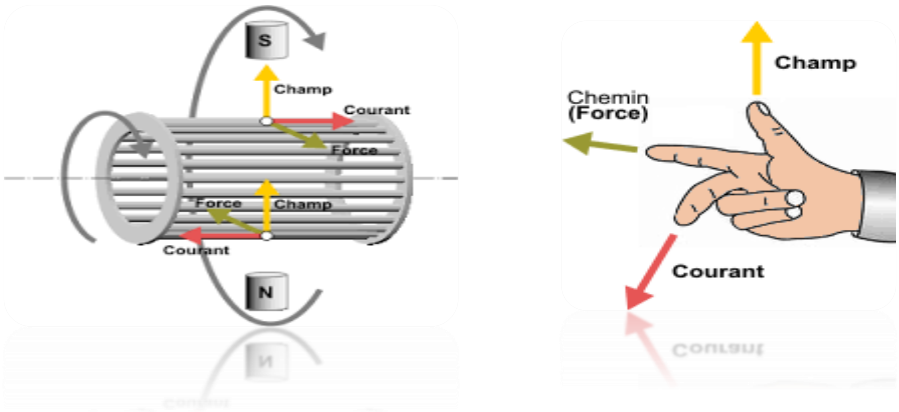


Figure 1.8: Règle de la main droite

1.5 Les différents types de moteur asynchrones triphasée

1.5.1 Moteur Asynchrone à Cage d'Écureuil

➢ **Structure :**

- Le rotor est constitué de barres conductrices en aluminium ou en cuivre, reliées par des anneaux à chaque extrémité, formant une structure en "cage d'écureuil".
- Le stator est bobiné et alimenté en courant alternatif triphasé.

➢ **Caractéristiques :**

- Simple, robuste et peu coûteux.
- Peu d'entretien (absence de balais ou de collecteurs).
- Démarrage direct possible, mais peut nécessiter un dispositif de limitation de courant (résistance de démarrage ou variateur de fréquence).
- Rendement élevé et couple de démarrage faible à moyen.

➢ **Applications :**

- Pompes, ventilateurs, compresseurs, machines-outils, convoyeurs [20]

1.5.2 Moteur Asynchrone à Rotor Bobiné (ou à bagues)

➢ **Structure :**

- Le rotor est constitué d'un enroulement triphasé similaire à celui du stator.
- Il est relié à des résistances externes via des bagues et des balais.

➢ **Caractéristiques :**

- Permet un démarrage progressif grâce aux résistances rotorique ajustables.
- Couple de démmrage élevé.
- Plus coûteux et nécessite un entretien (présence de balais).
- Utilisé lorsque des variations de charge importantes sont présentes.

➢ **Applications :**

- Treuils, grues, ascenseurs, laminoirs, applications à forte inertie [21].

1.5.3 Moteur Asynchrone à Double Cage

➢ **Structure :**

Comporte deux cages superposées :

- **Cage extérieure** : résistive, utilisée au démarrage pour fournir un couple élevé.
- **Cage intérieure** : inductive, prend le relais en régime permanent pour améliorer le rendement.

➢ **Caractéristiques :**

- Améliore le couple de démarrage sans sacrifier le rendement.
- Convient aux applications nécessitant un démarrage sous forte charge.

➢ **Applications :**

- Machines-outils lourdes, broyeurs, convoyeurs, compresseurs [22].

1.5.4 Moteur Asynchrone à Pôles Bobinés

➢ **Structure :**

- Le nombre de pôles du stator est modifiable grâce à des enroulements spéciaux.

➢ **Caractéristiques :**

- Permet de varier la vitesse sans variateur électronique.
- Moins efficace que les moteurs à fréquence variable.

➢ **Applications :**

- Ventilateurs industriels, pompes, ascenseurs [23].

1.6 Comparaison des types de moteur asynchrones triphasée

Type de moteur	A vantage	Inconvenient	Application
Cage d'écureuil	Faible économique Peu d'entretien	Couple de démarrage Faible à moyen	Pompes Ventilateurs Machines outils
Rotor bobiné	Couple de démarrage élevé Adaptable aux charges variables	Cout élevé Entretien nécessaire	Treuils Grues Ascenseurs
Double cage	Bon couple de démarrage et rendement amélioré	Plus complexe et charge simple	Machines-outils lourdes broyeurs
Pôles bobines	Variation de vitesse sans variateur	Moins efficace que les variateurs de fréquence	Ventilateurs Pompes Ascenseurs

1.7 Principaux défauts électrique de la moteur asynchrone triphasée

On sait, bien que la machine asynchrone soit considérée suffisamment robuste, qu'elle présente parfois divers défauts qu'ils soient dus à l'origine électrique ou à la mécanique : il s'agit d'un petit défaut à la fabrication de la machine, d'une défaillance d'usage des machines et éventuellement de défauts parfoisliés au milieu dans lequel la machine a été mise en œuvre, c'est ce que nous développons dans ce qui suit :

1.7.1 Défauts d'ordre mécanique

Ce type de défaut d'ordre mécanique est, en général, le plus rencontré des défauts affectant la machine asynchrone. Ils peuvent apparaître sur les roulements (à billes), les flasques, ou l'arbre moteur…

1.7.1.1 Défauts des roulements

Tous les types de machines électriques sont équipés de roulements à billes qui garantissent leur bon fonctionnement.

Cependant, un défaut de fabrication, souvent lié à une mauvaise sélection des matériaux lors de la fabrication des roulements, peut provoquer des anomalies.

Un roulement défectueux, ébréché ou fissuré peut engendrer des problèmes de rotation au niveau du stator, perturbant ainsi le fonctionnement global de la machine.

Dans une machine asynchrone, la circulation de courant au niveau des roulements, particulièrement à haute vitesse de rotation, peut entraîner une dégradation prématurée des roulements.

De plus, la graisse utilisée pour la lubrification et la bonne rotation des roulements peut, dans certains cas, durcir, augmentant la résistance à la rotation.

Pour diagnostiquer ce type de défaillance, plusieurs techniques sont utilisées, notamment :

L'analyse vibratoire de la machine en service,

L'analyse harmonique des courants statoriques.

Ces méthodes permettent de détecter précocement les défauts liés aux roulements, évitant ainsi des pannes plus graves [25],[28].

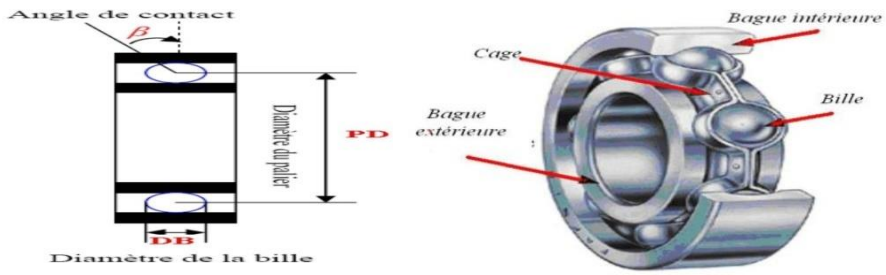


Figure 1.9: Vue éclatée des éléments constitutifs d'un roulement à billes

Le roulement se compose d'un ensemble constitué de deux bagues en acier, appelée bague intérieure et bague extérieure, et d'éléments roulants, souvent des billes en acier qui permettent aux deux bagues de tourner avec un frottement minimal, le tout étant séparé et guidé par une cage[25].

Le roulement peut être abîmé par des agressions extérieures telles que :

- Contamination par des particules extérieures : poussières, grains de sable,…[26].
- Corrosion due à l'eau, aux acides,…[27]
- Lubrification inadaptée qui occasionne un échauffement et une usure du roulement [28]
- Mauvais alignement du rotor [29].

1.7.1.2 Défauts du flasque

Généralement, les défauts sont de fabrication, liés à un défaut de positionnement des flasques et donc de désalignement des roulements à billes, d'où il résulte une excentricité de l'arbre moteur [30]. Ils peuvent être repérés par analyse vibratoire ou par analyse harmonique descourants absorbés par la machine [31].

1.7.1.3 Défauts de l'arbre

Des défauts tels qu'une fissure apparaissant sur l'arbre de la machine liées à l'utilisation d'un matériau inadapté de construction peuvent, à court ou par cours selon l'importance de la fissure, amener à la rupture franche de l'arbre rendant ainsi la machine asynchrone inutilisable. Les environnements corrosifs peuvent être à l'origine de défaillances de l'arbre en l'affaiblissant. L'humidité rencontrée dans un milieu peut entraîner l'apparition d'un réseau de microfissures jusqu'à la destruction de l'engin. Conséquence d'une excentricité statique, dynamique ou mixte des efforts indus sont appliqués au moteur, amenant ainsi un phénomène de fatigue. On peut détecter ce type de défaillance au moyen d'une analyse vibratoire, d'ultrason, fréquentielle des courants absorbés ou simplement par une inspection visuelle de l'arbre de la machine, entre autres [32],[33].

1.7.1.4 Défauts d'excentricité

Les effets liés aux défauts mécaniques sont en général localisés au niveau de l'entrefer par des défauts d'excentricité. L'excentricité d'un moteur électrique, phénomène évolutif au cours du temps et déjà présente à la sortie de fabrication, est en effet induite tout au long des opérations d'usinage et d'assemblage qui engendrent la mise en excentricité du rotor par rapport à son stator. Pendant le service, deux phénomènes majeurs aggravent cette excentricité. Le premier est inhérent à la chaine cinétique dans laquelle s'intègre la machine et qui va entrainer une force radiale dans l'arbre de la machine qui va induire une usure des roulements et donc une amplification de l'excentricité. L'autre phénomène, qui intervient pendant le fonctionnement même de la machine est toujours en lien avec l'excentricité qui va engendrer un déséquilibre des efforts radiaux entre le stator et le rotor. L'effort radial est maximal là où l'effort est au minimum dans l'entrefer et va donc contribuer à diminuer encore plus la valeur de l'entrefer minimum d'une part, et de l'autre à accentuer le déséquilibre des efforts radiaux entre stator et rotor. Le seuil de l'excentricité est atteint lorsque le rotor vient en contact avec le stator.Trois catégories d'excentricité sont généralement distinguées :

- **L'excentrisité statique:** elle provient en règle générale du fait que l'arbre de rotation du rotor n'est pas aligné sur l'axe géométrique du stator. Le défaut principal est un mauvais centrage des flasques.

- **L'excentricité dynamique :**elle correspond au fait que le centre de rotation du rotor n'est pas le centre géométrique du stator mais que, en plus, ce centre du rotor tourne autour du centre géométrique de celui du stator. Elle provient d'un froissement du cylindre rotor, d'un fasciement du cylindre statorique ou d'un défaut des roulements à billes.

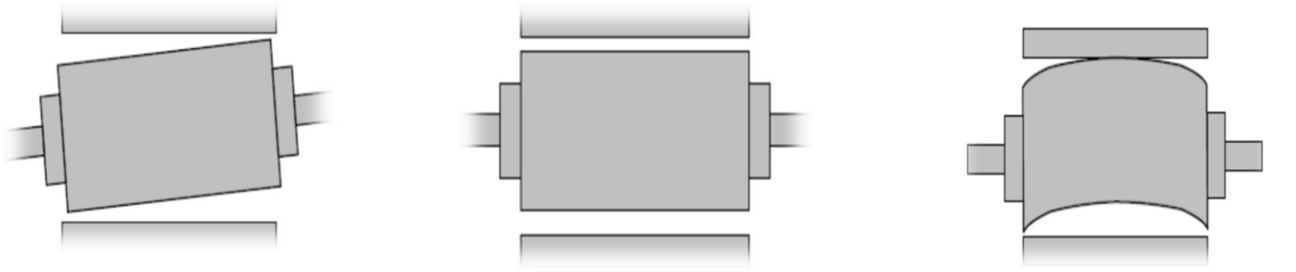
- **L'excentricité mixte :** somme des deux cas précédents.

Celle-ci sur la machine accroît le développement des composantes supplémentaires dans le spectre du courant, dont les fréquences sont données par la relation suivante **:**

fech= fs (1± k (1−g)), avec k = 1,2,3, … … ..

(p : nombre de paires de pôles)

Une analyse harmonique des courants absorbés ou tout simplement un contrôle visuel de la machine permet de diagnostiquer ce type de défaillance[34],[35].



a) Excentricité statique **b) Excentricité dynamique** **c) Excentricité mixte**

Figure 1.10: Représentation des différents défauts d'excentricité

1.7.2 Défauts d'ordre électrique

Les défauts d'origine électrique peuvent, dans certains cas, être vecteurs d'un arrêt de la machine, autant que les défauts d'origine mécanique. Ils se répartissent en deux catégories : ceux qui concernent les circuits électriques statoriques et ceux qui affectent les circuits électriques rotoriques.

1.7.2.1 Défauts des circuits électriques statoriques

La survenance d'un défaut au niveau des circuits électriques statoriques de la machine asynchrone peut provenir de plusieurs causes. Citons, par exemple, les défauts du type court-circuit inter-spires qui se forment dans les encoches statoriques, et qui sont généralement dus à une défaillance d'isolement des spires dans le bobinage statorique. Mais on mentionnera encore les courts-circuits entre phase et neutre, entre phase et carcasse métallique de la machine, ou entre phases statoriques qui sont, dans ces deux derniers cas, mécaniques, à savoir que l'on peut être amené à considérer qu'un desserrement de boulons de plaque à bornes de la machine provoque un court-circuit, ou que la phase ouverte serait due à la cosse mal serrée à l'interface entre le câble d'alimentation et la borne de celle-ci. Le défaut le plus courant tout de même reste la fusion du fusible de protection. Ces défauts peuvent bien entendu être détectés par le traitement harmonique des courants absorbés par la machine [34],[35]

1.7.2.2 Défauts des circuits électriques rotoriques

Au rotor d'une machine asynchrone à cage d'écureuil, on peut rencontrer deux types de défaillances. Étant composés de barres et d'anneaux de court-circuit d'aluminium ou de cuivre, la rupture partielle ou complète de l'un de ces composants peut être considéréecomme un défaut électrique rotorique. Son apparition peut avoir

diverses origines puisque la rupture d'une barre ou d'un segment d'anneau de court-circuit peut être causée par plusieurs phénomènes qui peuvent être indépendants. Ainsi peut-on penser à la mauvaise utilisation de la machine asynchrone (en cas de sur-charge), à l'environnement hostile (particules abrasives) dans lequel la machine évolue.

- Parmi les causes premières, on peut entendre :
- des contraintes mécaniques dues à des efforts électromagnétiques ou des vibrations mécaniques en provenance des anneaux ;
- des démarrages trop fréquents avec des sous-régimes trop élevés et des courants élevés dans les barres ou les segments des anneaux ;
- des contraintes de l'environnement dues à la contamination ou l'abrasion de la cage rotorique (cas industrie chimique) [31],[33].

La défaillance de la cage rotorique se fait le plus souvent au niveau du raccord entre une barre et un anneau de court-circuit. En effet, dans la conception des cages rotoriques, celle des barres rotoriques et celle des anneaux de court-circuit ne pouvant pas en général être construits d'une seule pièce (utilisant des techniques de fonderie) – ce cas est exceptionnel à des puissances relativement basses –, une soudure est établie au niveau de l'extrémité de chaque barre par rapport aux deux anneaux de court-circuit de la cage. La fragilité de la cage d'écureuilengendre des risques accrus derupture [36].Comme pour les défauts statoriques, les défauts rotoriques peuvent être détectés par l'analyse harmonique des courants statoriques. On peut également les mettre en évidence en effectuant une analyse vibratoire de la machine asynchrone [33].

1.8 Classification des défauts

Il existe deux types de défauts principaux: internes et externes. Les causes de ces défauts sont brièvement et respectivement décrites dans les organigrammes des figures:

La Figure 1.11: Organigramme à l'origine des déficiences internes :

Cet organisme affiche les principales causes de défaillances d'internet

des moteurs électriques, en indiquant les circuits électriques dans les enroulements, l'utilisation du routeur ou les défauts d'isolement [29].

La Figure 1.12 : Organigramme des causes des défauts externes :

Ce diagramme illustre les causes externes qui peuvent affecter le fonctionnement du moteur [40].

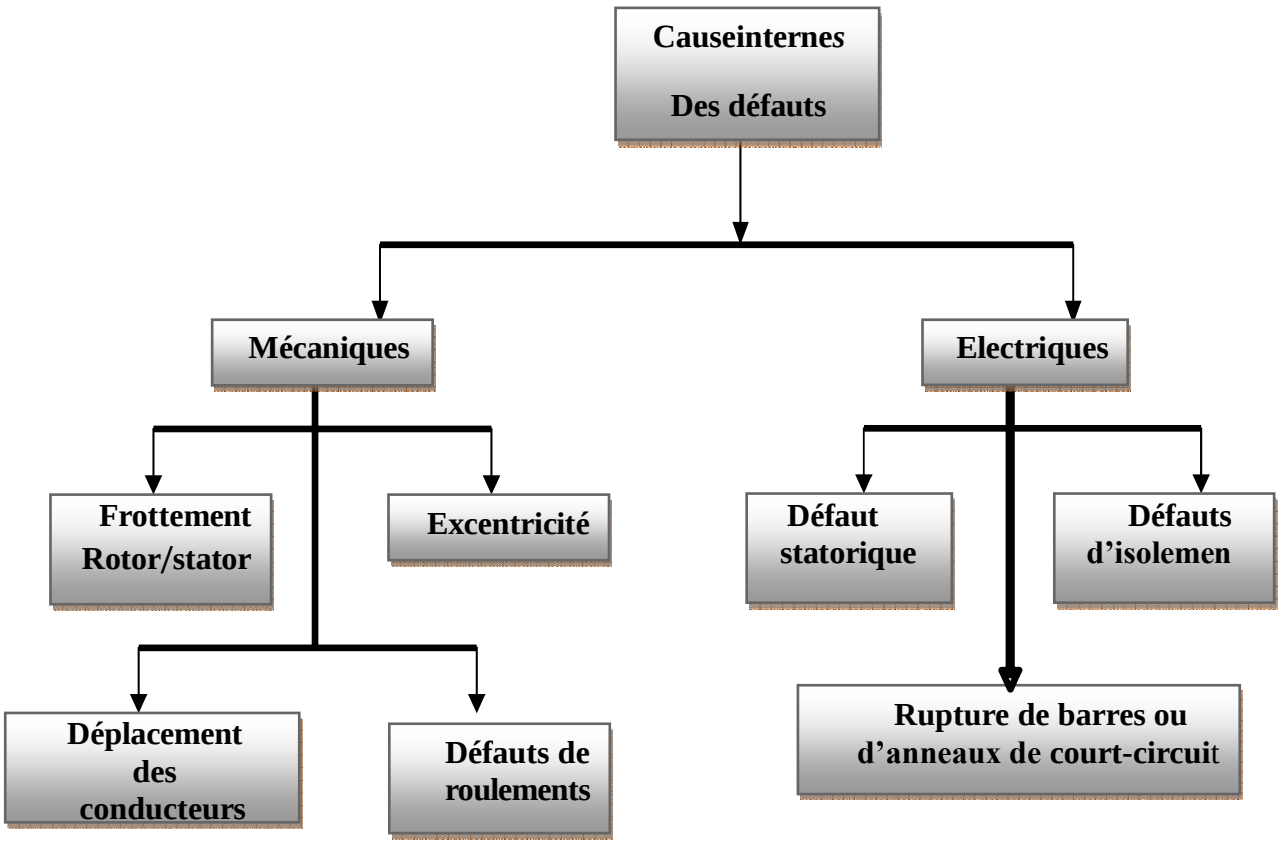


Figure1.11: Causes internes de defaults de la machine asynchrone triphasé

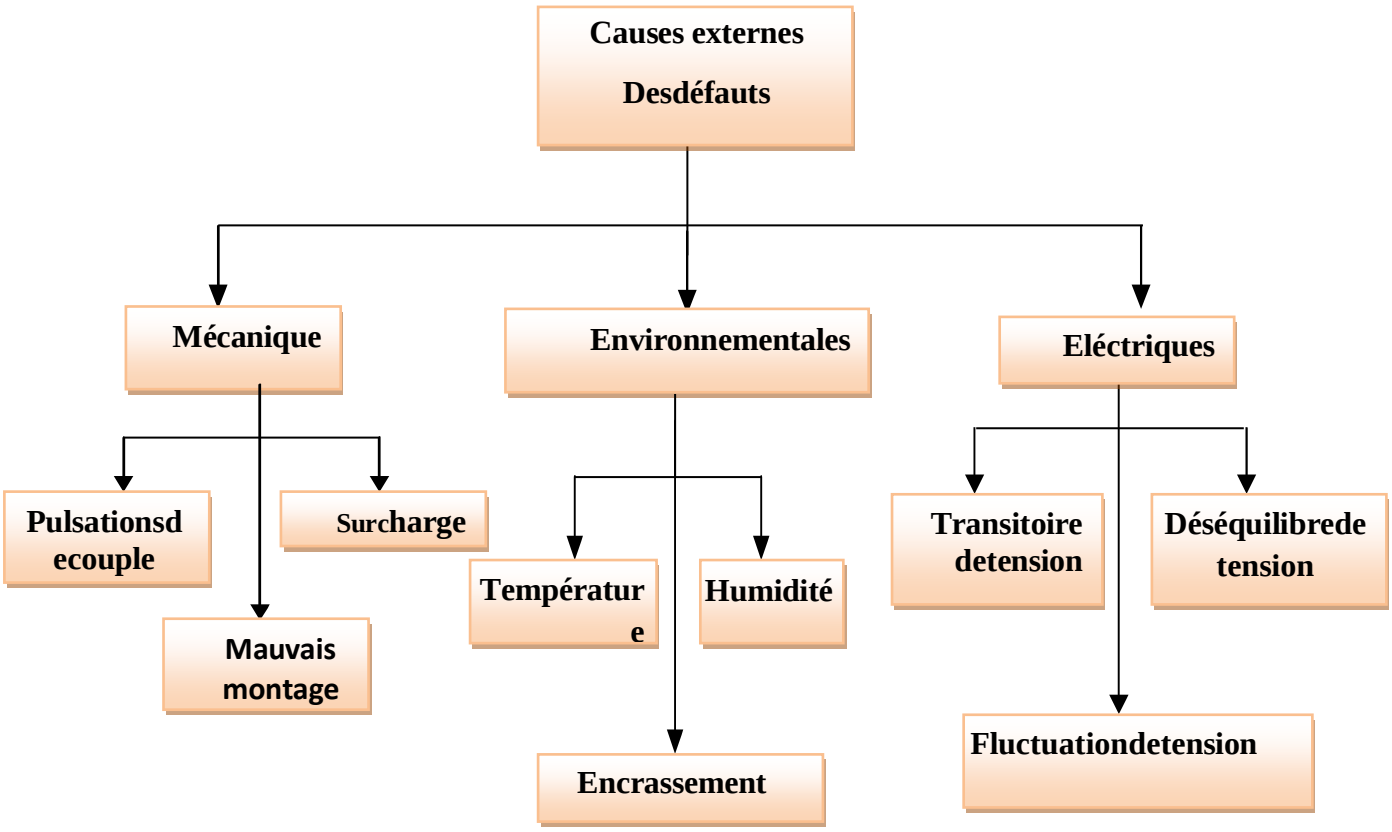


Figure1.12: Causes externes de defaults de la machine asynchrone triphasée.

1.9 Conclusion

En somme, le moteur asynchrone triphasé, bien qu'il soit largement utilisé pour sa robustesse et sa simplicité, n'est pas à l'abri de divers types de défauts pouvant compromettre son rendement et sa durée de vie. Ces défauts, qu'ils soient d'origine interne comme les courts-circuits dans les enroulements, les défauts de rotor ou les problèmes d'isolation [14]. ou d'origine externe comme les déséquilibres de tension, les surcharges mécaniques ou la perte de phase [24]. peuvent engendrer des défaillances majeures s'ils ne sont pas détectés à temps.

L'identification précoce de ces anomalies représente donc un enjeu majeur pour la maintenance prédictive et la réduction des arrêts non planifiés [43]. Grâce à une compréhension approfondie du fonctionnement du moteur et des symptômes associés à chaque type de défaut, il devient possible d'orienter efficacement le processus de diagnostic.

Ainsi, la compréhension des défauts constitue une étape fondamentale vers la

mise en place d'un système de surveillance fiable, capable non seulement de détecter les anomalies, mais aussi de prédire leur apparition afin d'optimiser la fiabilité et la performance des moteurs asynchrones [1].

Chapitre 02:

méthodes de diagnostic des moteurs asynchrones

2.1 Introduction

Assurer la performance et la durabilité des moteurs électriques est crucial pour de nombreux secteurs industriels et commerciaux. Ces moteurs constituent un élément central dans diverses applications, allant de la production manufacturière à l'automatisation des bâtiments [25]. Dans ce contexte, la mise en place de diagnostics réguliers et précis n'est pas simplement une bonne pratique, mais une nécessité pour éviter les pannes imprévues et prolonger la durée de vie des équipements [26].

La maîtrise des techniques de diagnostic permet aux ingénieurs et techniciens de détecter et de traiter les anomalies avant qu'elles ne s'aggravent, réduisant ainsi les temps d'arrêt et les coûts de maintenance [27].

L'objectif principal de ce travail est de développer un programme intégrant un ensemble complet de techniques de traitement du signal audio, couvrant plusieurs étapes d'analyse, depuis le filtrage initial jusqu'à l'analyse temporelle du signal.

Le processus commence par l'application de la technique de passage par **zéro** aux signaux acquis afin d'éliminer les composantes fréquentielles indésirables, améliorant ainsi la qualité et la clarté des signaux traités [48]. Ensuite, le signal est normalisé pour garantir l'uniformité de son amplitude, ce qui facilite les étapes suivantes de traitement. Enfin, il est segmenté en fenêtres temporelles courtes (environ 20 millisecondes) pour permettre une analyse rapide et plus précise [29].

2.2 Terminologie technique du diagnostic

Le passage présente plusieurs définitions des concepts clés du diagnostic des systèmes, il explique des termes utilisés pour désigner divers types de problèmes générateurs d'événements problématiques au sein d'un système [50],[52].

- **Défaut :** Il s'agit d'une dérive anormale à une propriété ou à un paramètre important du système par rapport à son état normal de fonctionnement.
- **Panne ou défaillance:** Il s'agit d'une interruption définitive de la capacité du système à traiter une fonction attendue dans les spécifications**.**
- **Dysfonctionnement:** Il s'agit d'une exécution d'une fonction du système demandée mais ne rendant pas le service attendu, ou le rendant partiellement**.**

- **Symptôme:** le changement constaté dans un paramètre par rapport à son fonctionnement normal, signalant éventuellement la présence d'un problème**.**
- **Perturbation:** signal d'entrée non contrôlé, qui est non désiré mais considéré comme normal en fonction du contexte.
- **Suivi :** fonctionnalité de conservation de l'historique de traitements réalisés par le système de commande et de traçage des événements reçus par ce dernier
- **Détection de défauts :** une fois que l'on a décelé dans le système s'il y a lieu la présence de défauts, la détection détermine le moment d'apparition de tels défauts.
- **Localisation de défauts :** déterminer le type et la date d'un défaut détecté est la localisation. Par suite, à partir d'une classe figurant la pair symptomatique les des symptômes révélateurs de la présence du défaut mesuré, l'étape de localisation permet de remonter à un ensemble de composants défaillants**.**
- **Identification de défauts :**Il s'agit de déterminer la taille et le comportement temporel d'un défaut, qui, suivant la localisation, rend possible de caractériser le défaut plus finement, en suivant son évolution dans le temps.
- **Diagnostic :**Définir un type, une taille, une localisation et un moment d'occurrence de défauts est le diagnostic qui inclut la détection et, par suite, des traitements de localisation et d'identification de défauts**.**
- **Surveillance :**Des fonctions en temps réel pour reconstituer l'état réel du procédé à partir des modèles du système de conduite ainsi que le stockage d'informations et la reconnaissance des comportements anormaux**.**
- **Supervision :** Surveiller un système physique actif [20],[22].

2.3 La Différentes techniques de diagnostic moteur asynchrone

Les techniques de diagnostic sont généralement liées aux types de défauts. Certaines techniques sont plus adaptées pour un type particulier de défaut, d'autres peuvent être utilisé pour n'importe quel type de défaut. L'intérêt de la technique réside dans l'instrumentation employée, la facilité de la mise en œuvre ainsi que la richesse de l'information fournit sur l'existence ou non du défaut et de sa sévérité [10], [11].

2.3.1 Diagnostique des défauts par estimation paramétrique

Cette méthode de diagnostic repose sur l'exploitation des paramètres structurels d'un modèle de connaissance, à partir duquel sont extraits les paramètres du système grâce aux lois physiques qui le régissent, afin de détecter et localiser les défaillances. Le facteur clé de l'efficacité de cette méthode réside dans le choix du modèle de connaissance. En effet, le type de défaut détectable dépend directement du modèle retenu [22].

Les premières études sur l'estimation des paramètres utilisaient des modèles simples, tels que les modèles de Park, largement employés depuis longtemps dans la commande des machines électriques. Ces modèles nécessitent seulement quatre paramètres pour le diagnostic, ce qui peut limiter la précision dans la localisation des défaillances.

Il devient alors nécessaire de passer à des modèles plus détaillés, tout en conservant la capacité d'identifier les paramètres pertinents. Ces modèles plus fins peuvent être des modèles triphasésqui ne supposent plus une machine magnétique équilibrée, ou encore des modèles à n phases, capables de représenter le fonctionnement de la machine sur une large bande de fréquences [23].

Pour l'estimation séquentielle des paramètres, des algorithmes spécifiques ont été développés, parmi lesquels le filtre de Kalman est l'un des plus adaptés, bien que son implémentation soit complexe.

En tant qu'algorithme d'identification en temps réel, le filtre de Kalman est unique par sa capacité à fournir un modèle adaptatif, capable de prendre en compte les évolutions normales des paramètres de la machine, telles que la variation des résistances liée à la température ou la variation des inductances en fonction du niveau de saturation magnétique.

Par ailleurs, les paramètres estimés permettent d'effectuer une première analyse des conditions de fonctionnement de la machine. Par exemple, une augmentation anormale de la résistance statorique peut être un indicateur d'échauffement excessif et de la dégradation progressive des enroulements [24], [25].

2.3.2 Diagnostic des défauts par reconnaissance des formes

Actuellement, peu de méthodes diagnostiques exploitent la reconnaissance des formes.

Cette approche consiste à extraire un vecteur de paramètres, appelé vecteur de forme, à partir de plusieurs mesures. Les règles de décision appliquées permettent de classer les observations décrites par ce vecteur de forme selon les différents modes de fonctionnement connus, qu'ils soient normaux ou affectés par un défaut [16].

Pour effectuer ce classement, il est indispensable de disposer de données associées à chaque mode de fonctionnement considéré, par exemple un rotor sain à 0 % de charge ou un défaut de barre cassée à 100 % de charge.

Cela nécessite l'existence d'une base de données expérimentale, ce qui est faisable pour les machines de petite ou moyenne puissance.

Pour les moteurs de forte puissance, il est souvent nécessaire de calculer ces paramètres par simulation numérique de la machine étudiée [17].

Dans cette dernière configuration, un modèle comportemental précis de la machine est indispensable afin d'obtenir des paramètres aussi proches que possible de la réalité.

Le choix de la classe à laquelle appartient un vecteur de forme mesuré peut être réalisé à l'aide d'algorithmes tels que le k-plus proches voisins (k-NN) ou via une approche fondée sur les frontières de décision (ou partitions) [19], [22].

2.4 Mesure du bruit moteur

La mesure du bruit représente une étape clé dans le processus de diagnostic acoustique des moteurs électriques. Dans ce travail, elle consiste à enregistrer les signaux acoustiques émis par un moteur asynchrone triphasé sous différentes conditions de fonctionnement, en vue d'extraire des informations exploitables sur son état opérationnel [21].

2.4.1 Description du stand de mesure

2.4.1.1 moteur asynchrone triphasé

Le moteur asynchrone triphasé utilisé constitue le composant central du banc d'essai. Il présente les caractéristiques suivantes : tension nominale de 380 V, courant nominal de **0,85 A**, puissance de **0,3 kW,** fréquence de **50 Hz** et **facteur de puissance** de **0,84.** indiquant un bon rendement énergétique.

Sa vitesse nominale est de **2800tr/min**, ce qui le rend adapté aux applications nécessitant une vitesse élevée. Ces spécifications techniques en font un choix pertinent pour l'étude du comportement acoustique en conditions variables.**La figure 2.1** ci-dessous montre un moteurasynchrone triphasé [33.]



Figure 2.1: Moteur asynchrone triphasé

2.4 .1.2 Microphone

Un microphone est positionné à proximité du moteur pour capter les bruits émis durant son fonctionnement. Ce capteur acoustique assure la conversion des ondes sonores générées par le moteur en signaux analogiques, qui peuvent ensuite être traités et analysés [23].

2.4.1.3 Ordinateur

Dans le cadre de l'expérimentation, un ordinateur a été utilisé pour exécuter le programme développé, permettant l'affichage des résultats sous forme de courbes représentant le comportement acoustique du moteur. Cette visualisation a facilité l'analyse des signaux et la détection des éventuels défauts de fonctionnement [15].

La figure 1.1 ci-dessous montre unstand de mesure

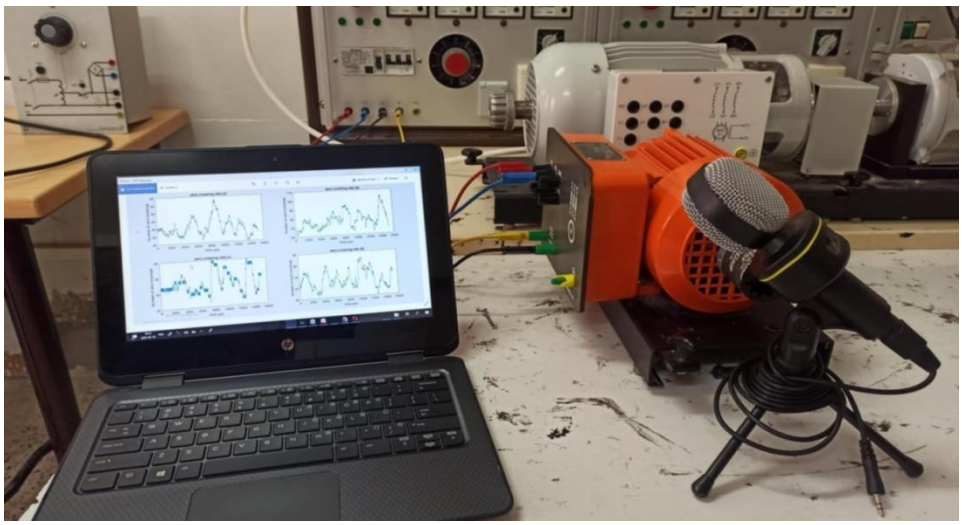


Figure 2.2:Stand de mesure

2.5 Création base de données:

Dans le cadre d'un projet universitaire, nous avons mené une étude sur le comportement acoustique d'un moteur synchrone triphasé, avec pour objectif d'analyser l'influence de différentes conditions de fonctionnement sur les émissions sonores, en vue de la détection précoce de défauts. Après mise sous tension du moteur, quatre expériences distinctes ont été conduites : fonctionnement nominal, réduction de la tension d'alimentation (moteur sous-alimenté), augmentation de la tension d'alimentation (moteur sur alimenté), et absence d'une phase d'alimentation. Ces configurations expérimentales ont permis d'enregistrer et de comparer les signatures acoustiques associées à chaque état..

Les signaux acoustiques enregistrés ont été traités à l'aide du logiciel MATLAB, en utilisant notamment la méthode du comptage des passages par zéro. Cette approche, à la fois simple et efficace, permet de détecter les variations du comportement du moteur, en suivant les changements de fréquence ou d'intensité sonore associés à des défauts (manque de phase, moteurs suralimenté, moteur sous alimenté. ..). L'analyse a révélé que toute modification de la vitesse ou des conditions d'alimentation génère une signature acoustique distincte, avec des irrégularités particulièrement marquées en cas de perte de phase, traduisant un déséquilibre du courant. Cette méthode d'analyse acoustique constitue ainsi un outil pertinent de surveillance et de détection précoce des pannes [19].

Le programme développé sous MATLAB a pour objectif l'analyse acoustique de quatre fichiers audio (format WAV), chacun correspondant à une condition spécifique de fonctionnement du moteur : fonctionnement normal, sous-alimentation, suralimentation et perte de phase. Après lecture et normalisation des signaux, un comptage du nombre de passages par zéro des signaux est effectué sur une fenêtre glissante de taille L, ce qui permet d'identifier les variations temporelles du signal. Les courbes ainsi obtenues sont ensuite lissées à l'aide d'une moyenne mobile (fenêtre $=6\times L$) afin de rendre plus lisible l'évolution des taux de passages par zéro. Les résultats sont présentés sous forme de graphiques comparatifs, facilitant l'analyse des différences entre les scénarios de fonctionnement.

Des observations complémentaires ont mis en évidence que, dans certaines situations, les courbes peuvent se chevaucher visuellement, notamment lorsque les différences entre signaux sont faibles. Cela concerne particulièrement les cas de perte de phase et de chute de tension, dont les signatures acoustiques sont proches. Pour atténuer ce chevauchement, l'introduction d'une valeur empirique sur la valeur de L, permettant de décaler les fenêtres d'analyse, s'est avérée utile pour mieux distinguer les signaux [18].

2.6 Prétraitement

Dans un contexte où la numérisation et l'application des techniques d'analyse se succèdent, le prétraitement des signaux représente une étape importante, car elle assure la bonne préparation des signaux aux traitements ultérieurs, en éliminant les bruits indésirables ainsi qu'en normalisant les amplitudes, pour que l'analyse en soit de plus haute qualité**.**

2.6.1 Numérisation:

La numérisation du signal est une étape essentielle qui consiste à convertir le signal analogique capté par le microphone en un signal numérique discret. Cette opération est réalisée à l'aide d'un convertisseur analogique-numérique (CAN), et non pas CNA. Le choix du taux d'échantillonnage est crucial : il doit être suffisamment élevé pour préserver les détails pertinents du signal sonore. Dans notre cas, les enregistrements ont été réalisés à l'aide d'un microphone relié à un système d'acquisition avec un taux d'échantillonnage de **44,1 kHz,** ce qui permet une analyse fine du bruit émis par le moteur.

1. Une base de données des défauts moteurs a été constituée à cette étape. Quatre signaux représentant les bruits émis par un moteur asynchrone ont été enregistrés. Ces signaux ont été numérisés à l'aide d'un convertisseur analogique-numérique de 16 bits, avec une fréquence d'échantillonnage de 44,1 kHz. La **Figure 2.3** illustre l'évolution de l'amplitude du bruit d'un moteur en bon état de fonctionnement au cours du temps

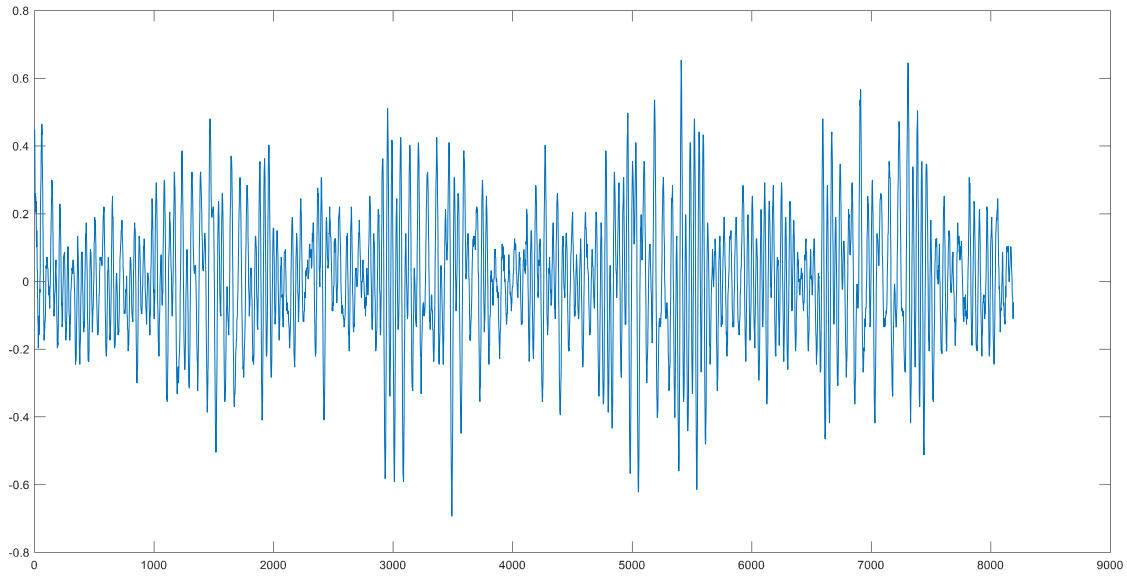


Figure 2.3: Bruit du moteur normal

2. **La Figure 2.4** illustre l'évolution de l'amplitude et du bruit d'un moteur alimenté

En fonction du temps

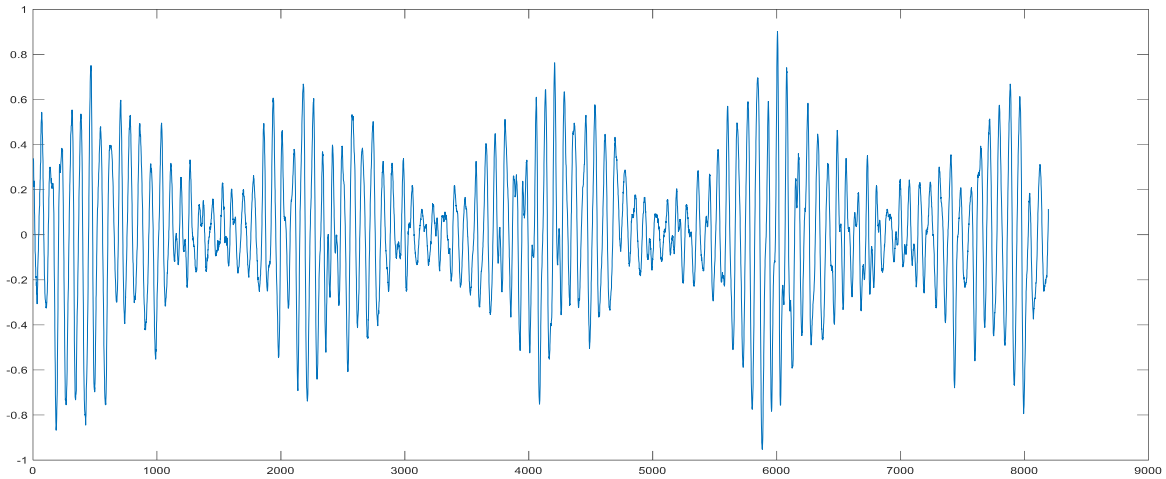


Figure 2.4: Bruits du moteur suralimenté

3. **La Figure 2.5** illustre l'évolution de l'amplitude et du bruit d'un moteur sous-alimenté au cours du temps

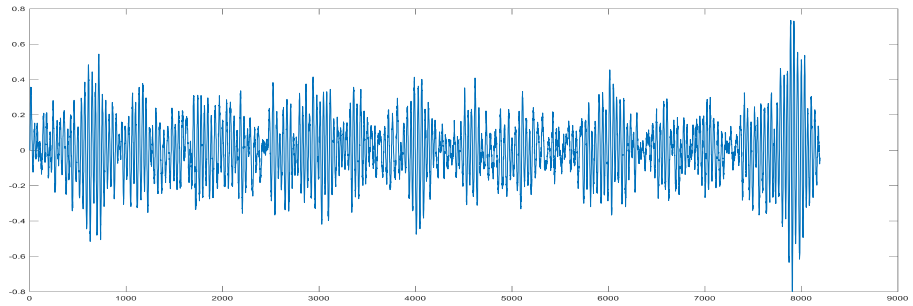


Figure 2.5: Bruit du moteur sous-alimenté

4. **La Figure 2.6** représente l'évolution de l'amplitude et du bruit d'un moteur présentant une phase manquante, en fonction du temps.

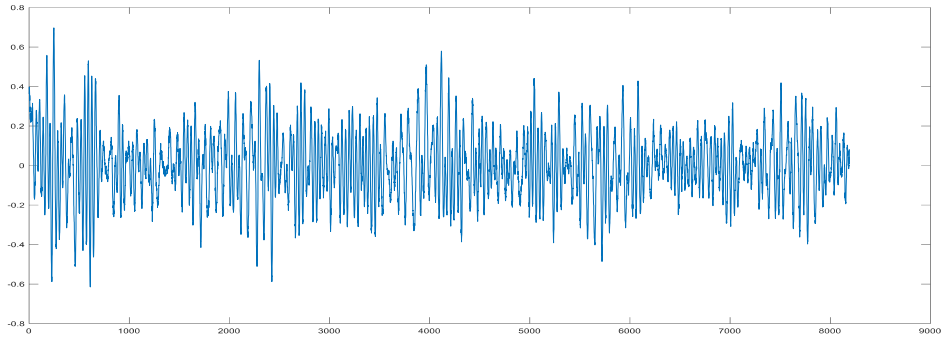


Figure 2.6: Bruit du moteur avec une phase manquante

2.7 Traitement

Nous avons procédé à un traitement des courbes dont nous disposions, notamment en analysant le passage par zéro, ce qui a permis d'extraire un certain nombre d'informations notamment sur le comportement des signaux acoustiques. Cette méthode nous a permis d'identifier les différents états de fonctionnement du moteur ainsi que des défauts du type sous-alimentation ou suralimentation.

2.7.1 La Méthode du nombre de passages par zéro

La méthode du nombre de passages par zéro est une technique utilisée pour analyser les signaux audio ou temporels en comptabilisant le nombre de fois où le signal traverse la valeur zéro (c'est-à-dire les points où le signal change de positif à négatif ou vice versa).

Cette méthode est particulièrement utile pour analyser les signaux instables ou irréguliers, tels que les sons produits par les moteurs, où elle peut être utilisée pour détecter des variations de fréquence ou de forme du signal.

1. Au départ, nous avons choisi **L=18.5 ms** comme taille de fenêtre pour l'analyse des signaux audio, mais nous avons remarqué qu'il y avait un chevauchement dans les courbes résultantes, ce qui rendait difficile la distinction des différences entre les différents cas. Les résultats ont été présentés comme suit

a) Une taille de fenêtre fixe, variant entre **15 et 40**, a été choisie pour l'analyse des signaux audio. Cependant, nous avons constaté un chevauchement important dans les courbes obtenues, ce qui a rendu difficile la distinction entre les différents états de fonctionnement du moteur. Les résultats sont illustrés dans **la figure 2.7**

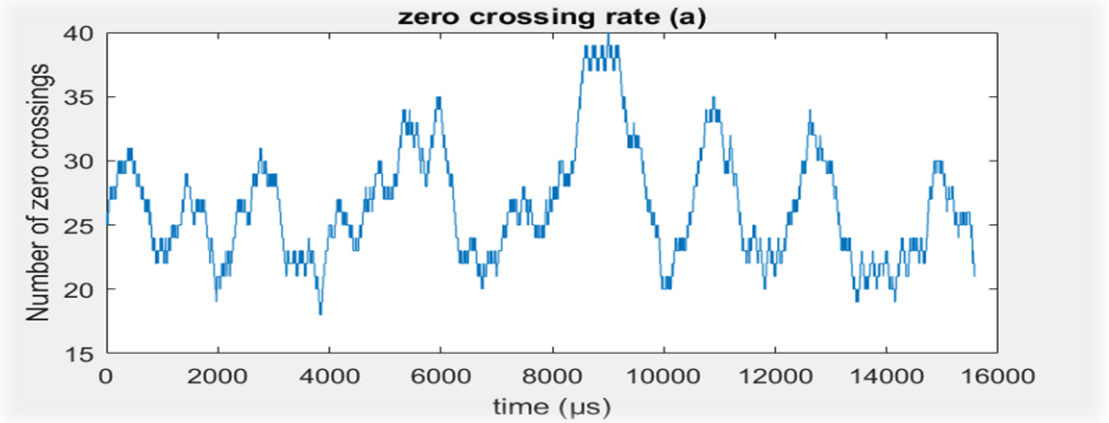


Figure 2.7: Nombre de passage par zéro du moteur normal

b) Une taille de fenêtre fixe, variant entre **30 et 80**, a été choisie pour l'analyse des signaux audio. Cependant, nous avons constaté un chevauchement important dans les courbes obtenues, ce qui a rendu difficile la distinction entre les différents états de fonctionnement du moteur. Les résultats sont illustrés dans **la figure 2.8**

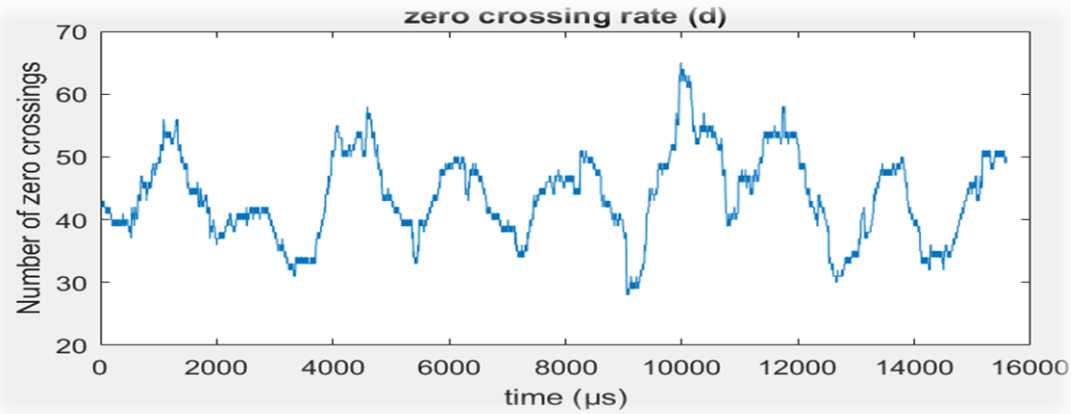


Figure 2.8 : Nombre de passage par zéro du moteur suralimenté

c) Une taille de fenêtre fixe, variant entre **15 et 30**, a été choisie pour l'analyse des signaux audio. Cependant, nous avons constaté un chevauchement important dans les courbes obtenues, ce qui a rendu difficile la distinction entre les différents états de fonctionnement du moteur. Les résultats sont illustrés dans **la figure 2.9**

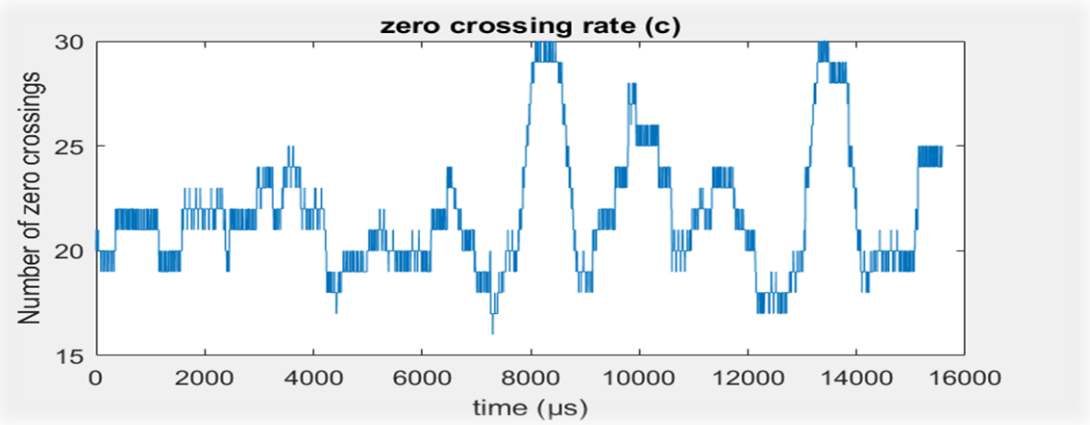


Figure 2.9 : nombre de passage par zéro du moteur sous-alimenté

d) Une taille de fenêtre fixe, variant entre **20 et 70**, a été choisie pour l'analyse des signaux audio. Cependant, nous avons constaté un chevauchement important dans les courbes obtenues, ce qui a rendu difficile la distinction entre les différents états de fonctionnement du moteur. Les résultats sont illustrés dans **la figure2.10**

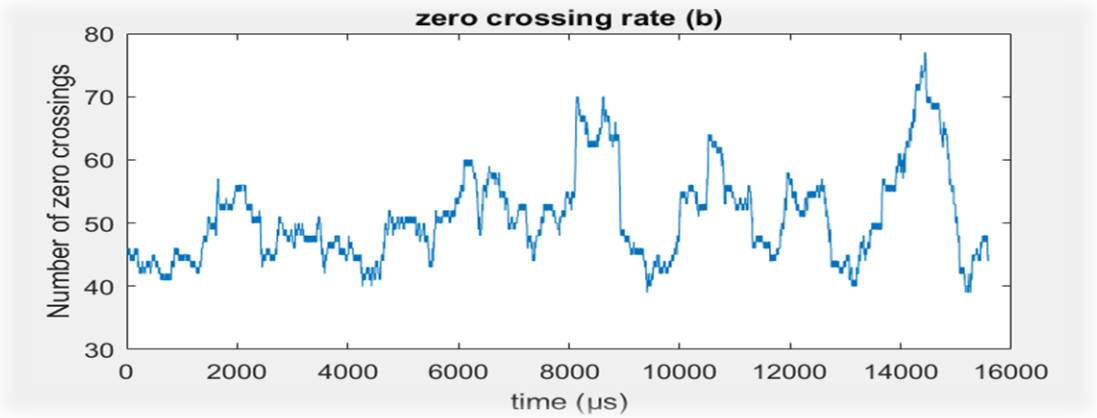


Figure 2.10 : Nombre de passage par zéro du moteur avec une phase manquante

2. Tout d'abord, nous définissons **L=32s** comme taille de fenêtre, mais nous remarquons qu'il existe toujours un chevauchement entre les courbes résultantes. Cette interférence rendait difficile la détermination des différences subtiles entre les signaux audio associés aux différentes conditions de fonctionnement. Les résultats ont été les suivants :

a) Une taille de fenêtre fixe, variant entre **30 et 70**, a été choisie pour l'analyse des signaux audio. Dépendant, nous avons constaté un chevauchement important dans les courbes obtenues, ce qui a rendu difficile la distinction entre les différents états de fonctionnement du moteur. Les résultats sont illustrés dans **la figure 2.11**

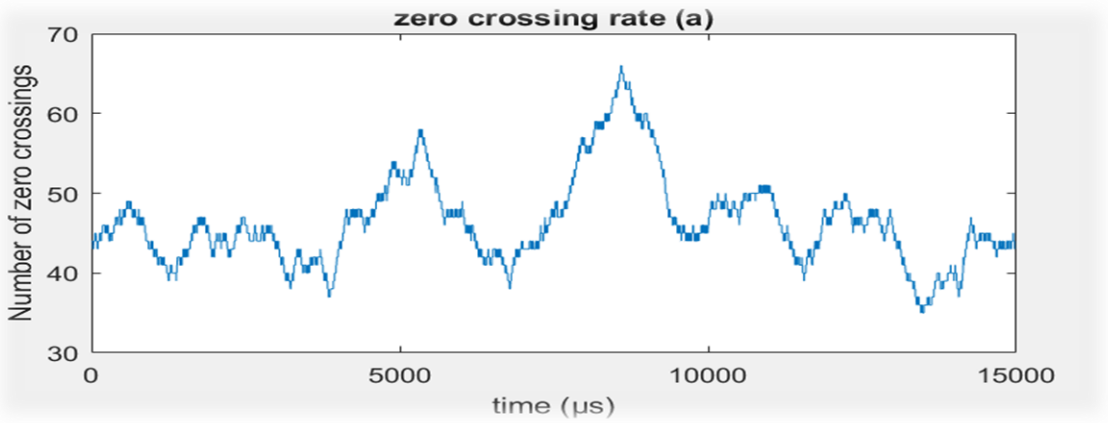


Figure 2.11: Nombre de passage par zéro du moteur normal

b) Une taille de fenêtre fixe, variant entre **70 et 120**, a été choisie pour l'analyse des signaux audio. Cependant, nous avons constaté un chevauchement important dans les courbes obtenues, ce qui a rendu difficile la distinction entre les différents états de fonctionnement du moteur. Les résultats sont illustrés dans **la figure2.12**

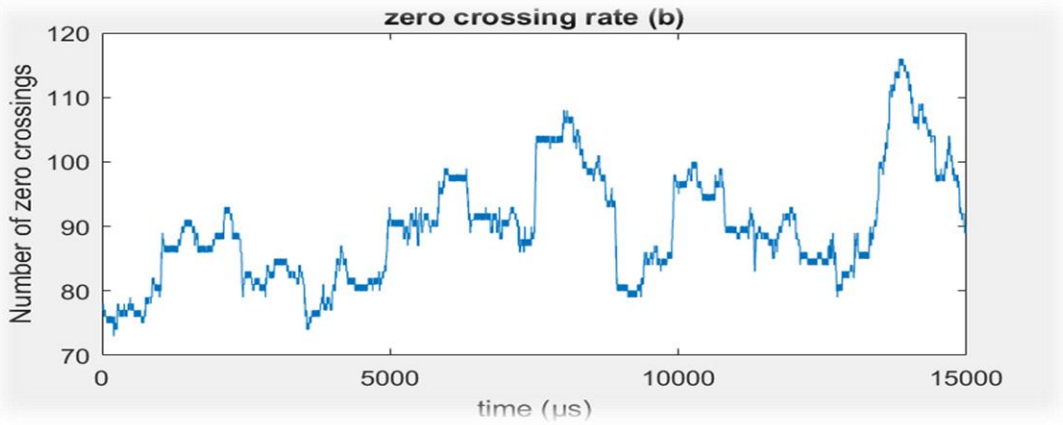


Figure 2.12 : Nombre de passage par zéro du moteur suralimenté

C) Une taille de fenêtre fixe, variant entre **30 et 45**, a été choisie pour l'analyse des signaux audio. Cependant, nous avons constaté un chevauchement important dans les courbes obtenues, ce qui a rendu difficile la distinction entre les différents états de fonctionnement du moteur. Les résultats sont illustrés dans **la figure2.13**

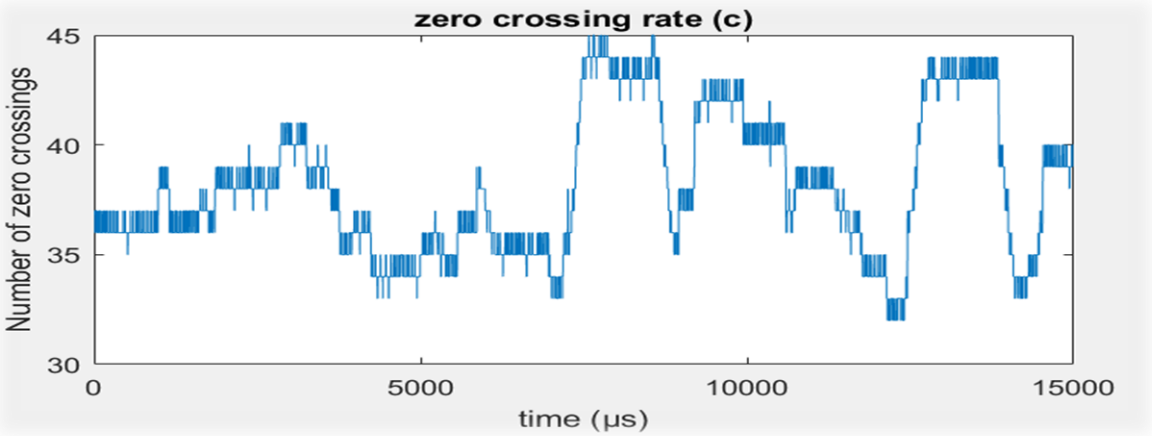


Figure 2.13 : Nombre de passage par zéro du moteur sous-alimenté

d) Une taille de fenêtre fixe, variant entre **60 et 100**, a été choisie pour l'analyse des signaux audio. Cependant, nous avons constaté un chevauchement important dans les courbes obtenues, ce qui a rendu difficile la distinction entre les différents états de fonctionnement du moteur. Les résultats sont illustrés dans **la figure2.14**

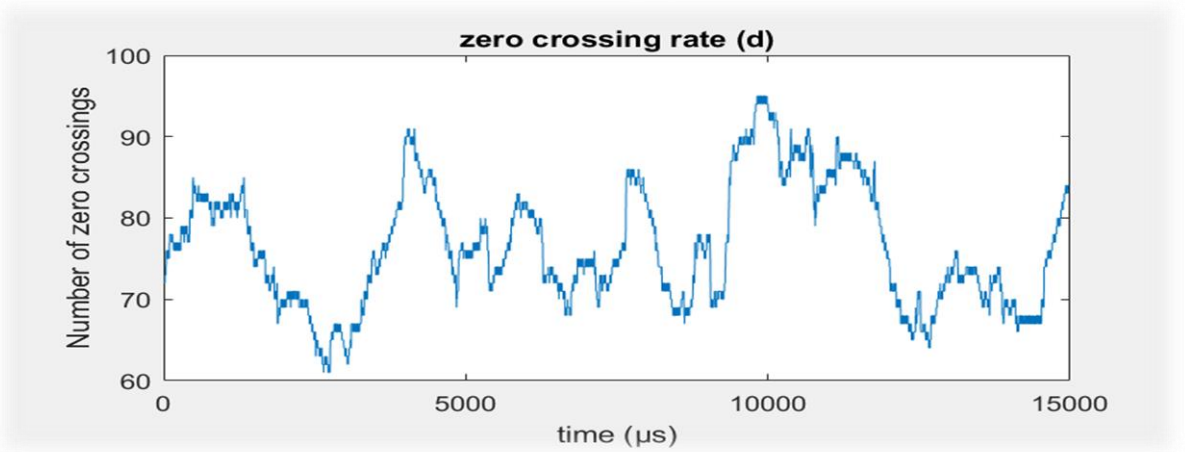


Figure 2.14 : Nombre de passage par zéro du moteur avec une phase manquante

3. Finalement, nous avons choisi une valeur de **L = 27,21 ms**, et il a été constaté qu'iln'y avait plus de chevauchement entre les courbes, ce qui a facilité l'analyse des résultats et permis une identification plus précise du type de défaillance. Il est à noter que la fréquence du signal était de **44,1 kHz** et que la périoded'échantillonnage **Ts** était de **22,675 ms**, ce qui a contribué à améliorer la clarté desgraphiqueset à rendre le processus de distinction entre les différents cas plus précis.

a) Une taille de fenêtre fixe, variant entre **30**et **60,** a été choisie pour l'analyse des signaux audio. Il a été constaté qu'il n'y avait pas de chevauchement significatif entre les courbes obtenues, ce qui a facilité la distinction entre les différents états de fonctionnement du moteur ainsi que l'identification précise du type de défaillance.

Les résultats sont présentés dans la figure 2.15

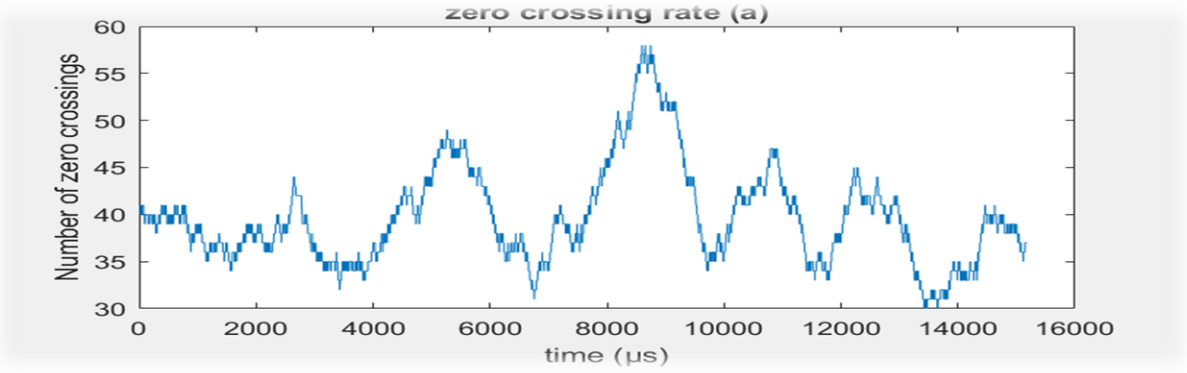


Figure2.15: Nombre de passage par zéro du moteur normal

b) Une taille de fenêtre fixe, variant entre**60 et 110,** a été choisie pour l'analyse dessignaux audio. Il a été constaté qu'il n'y avait pas de chevauchement significatif entre les courbes obtenues, ce qui a facilitéla distinction entre les différents états de fonctionnement du moteurainsi quel'identification précise du type de défaillance**.** Les résultants sont présentés dans **la figure 2.16**

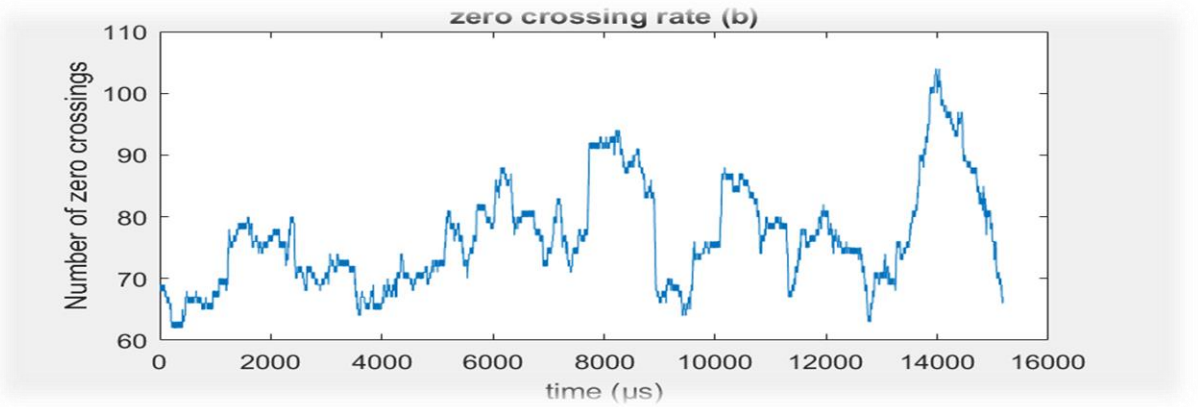


Figure 2.16 : Nombre de passage par zéro du moteur suralimenté

c) Une taille de fenêtre fixe, variant entre **25 et 40,** a été choisie pour l'analyse dessignaux audio. Il a été constaté qu'il n'y avait pas de chevauchement significatif entre les courbes obtenues, ce qui a facilitéla distinction entre les différents états de fonctionnement du moteurainsi quel'identification précise du type de défaillance**.** Les résultats sont présentés dans **la figure 2.17**

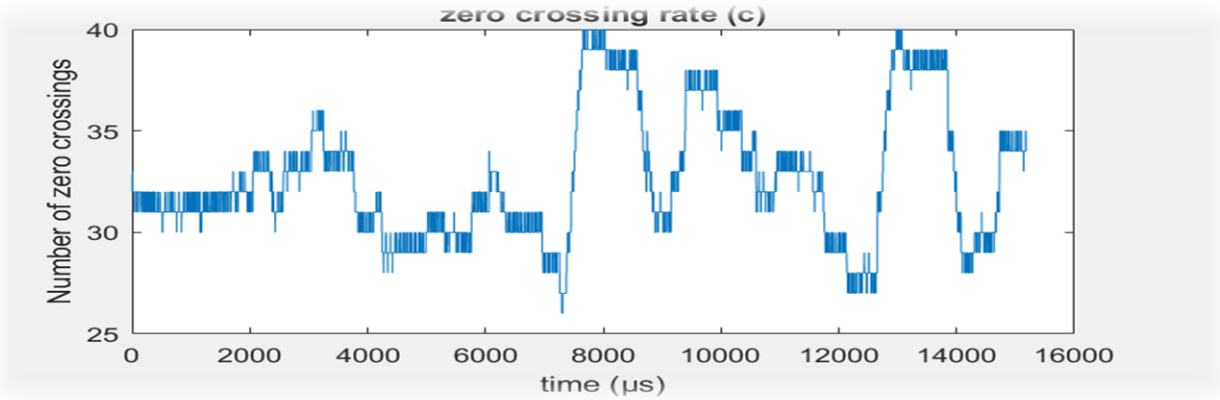


Figure 2.17 : Nombre de passage par zéro du moteur sous-alimenté

d) Une taille de fenêtre fixe, variant entre **50 et 90,** a été choisie pour l'analyse dessignaux audio. Il a été constaté qu'il n'y avait pas de chevauchement significatif entre les courbes obtenues, ce qui a facilitéla distinction entre les différents états de fonctionnement du moteurainsi quel'identification précise du type de défaillance**.** Les résultats sont présentés dans **la figure 2.18**

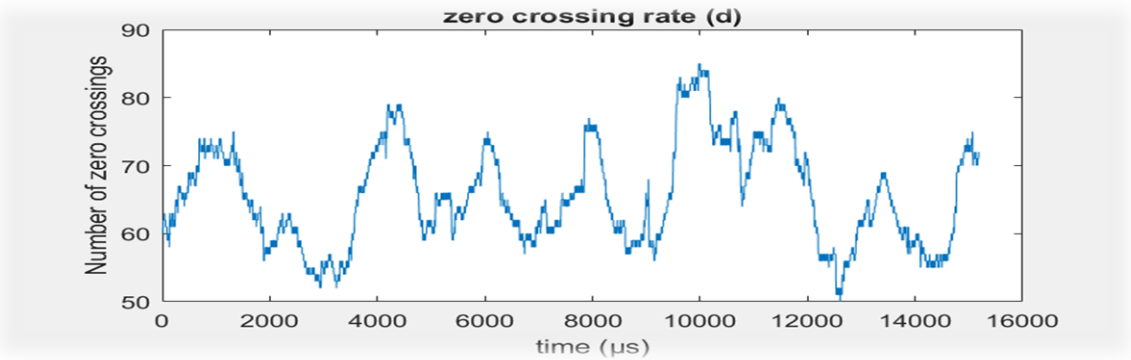


Figure 2.18: Nombre de passage par zéro du moteur avec une phase manquante

2.8 Conclusion

ce travail vise à fournir une solution efficace pour l'analyse des signaux acoustiques des moteurs électriques en utilisant des techniques avancées de traitement du signal. En appliquant des méthodes de filtrage et de traitement adaptées, nous sommes en mesure d'améliorer la qualité des signaux et de détecter de manière proactive les anomalies ou défaillances potentielles des moteurs. Cela contribue non seulement à optimiser les performances des moteurs, mais aussi à réduire les coûts de maintenance et à prolonger la durée de vie des équipements. Grâce à l'implémentation de ce programme, les ingénieurs et techniciens pourront effectuer des diagnostics plus précis et plus rapides, renforçant ainsi la fiabilité des systèmes industriels et commerciaux.

Chapitre 03:

Conception d'une Carte Électronique pour le Diagnostic des Moteurs Asynchrones

3.1 Introduction

Dans de nombreux dispositifs électroniques, le traitement des signaux analogiques joue un rôle fondamental, notamment pour la détection, l'amplification et la mise en forme de signaux de faible intensité. Le circuit étudié dans ce projet comprend trois étages principaux : un préamplificateur, un amplificateur et un étage de mise en forme. Le préamplificateur a pour but d'amplifier les signaux de très faible amplitude issus d'un capteur ou d'une source analogique, tout en limitant le bruit. Ce signal est ensuite transmis à l'amplificateur, qui l'élève à une amplitude adaptée aux exigences du système de traitement. Enfin, l'étage de mise en forme compare le signal amplifié à un seuil de référence afin de générer un signal logique (niveau haut ou bas), ce qui est essentiel dans les applications de détection ou de commande. Ce type d'architecture est largement utilisé dans les systèmes de mesure, les capteurs intelligents et les interfaces analogiques-numériques [25].

3.2 Les outilles utiliser

La dynamique de développement rapide des technologies électroniques et des systèmes embarqués impose l'utilisation d'outils performants pour garantir la réussite des projets, tant en termes de productivité que de précision fonctionnelleDans le cadre de notre projet, nous avons déployé deux outils majeurs :

- **La carte Arduino Uno**, une plateforme de prototypage open-source largement utilisée pour le développement de systèmes embarqués simples et flexibles.
- **Le logiciel de CAO OrCAD**, un environnement professionnel dédié à la conception, la simulation et le routage de circuits électroniques.

Ces outils, reconnus pour leur efficacité et leur accessibilité, sont couramment utilisés par les ingénieurs, les étudiants et les passionnés d'électronique pour concevoir, simuler et implémenter des systèmes électroniques robustes et fiables [26].

3.2.1 ARDUINO UNO

La carte Arduino Uno est un dispositif de développement électronique proposé en open-source, fondé sur un microcontrôleur ATmega328P, largement utilisé dans l'éducation en électronique, en robotique et dans la mise au point de prototypes ludiques. Souvent considéré comme le « premier » produit d'un projet né en 2005 en Italie, destiné à offrir aux étudiants, artistes et amateurs un moyen aisé de développer des projets électroniques sansqu'une connaissance approfondie de l'électronique ou de

la programmation soit nécessaire, Arduino est devenu depuis un standard dans le domaine du prototypage rapide [26].

3.2.2 Le logiciel OrCAD

OrCAD est un logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) dédié à l'électronique, utilisé pour la réalisation de schémas électroniques, la simulation de circuits (via l'environnement PSpice) et la conception de circuits imprimés (PCB). Développé depuis les années 1980, OrCAD s'est imposé comme une solution de référence dans les milieux industriels, académiques et de recherche.Grâce à ses outils puissants, à ses bibliothèques de composants très riches et à son interface modulaire, OrCAD permet aux ingénieurs de concevoir, simuler, tester et optimiser des circuits électroniques complexes avec un haut niveau de précision, avant leur implémentation physique. Ce processus de validation virtuelle contribue à réduire les erreurs, à améliorer la fiabilité des systèmes conçus et à accélérer les phases de prototypage [27].

3.3 Système de diagnostic

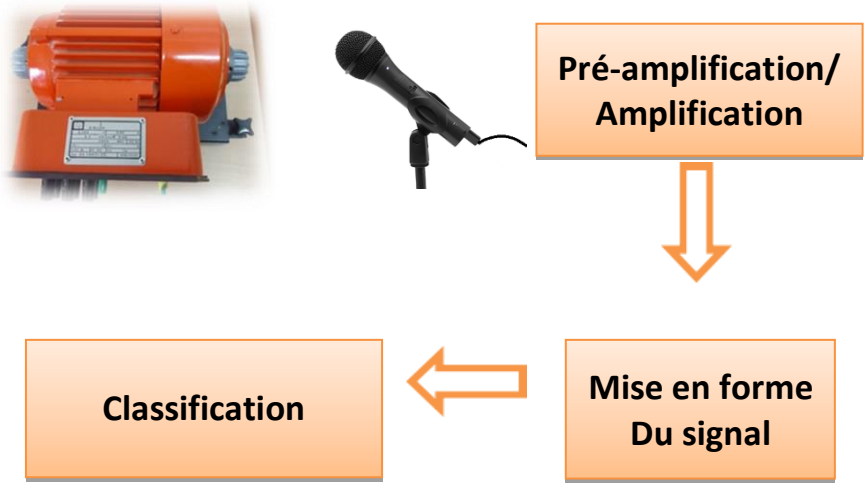


Figure 3.1 : Schéma bloc du système de diagnostic

Le schéma bloc, **la Figure 3.1**,Il ustre les principales étapes du traitement d'un signal analogique dans un système électronique. Il est composé de trois blocs fonctionnels : le préamplificateur et l'amplificateur, le circuit de mise en forme du signal et le classificateur.

- Le préamplificateur a pour fonction d'adapter l'impudence du microphone à celle de l'amplificateur pour s'assurer le transfert maximum de l'énergie électrique produite par le microphone [27].
- L'amplificateur élève ensuite le niveau du signal pour le rendre compatible avec les circuits de mise en forme [27].
- Le circuit de mise en forme, quant à lui, compare le signal amplifié à une valeur de référence afin de générer un signal carré. Ce signal binaire facilite la classification du bruit du moteur [27].

Le signal carré est ensuite envoyé à une carte Arduino, qui se charge de compter le nombre de passages par zéro du signal d'entrée. Cette information permet de prendre une décision ou de déclencher une action, en fonction des besoins de l'application [27].

Ce type d'architecture est largement utilisé dans les systèmes de détection, de mesure, ou plus généralement dans le traitement des signaux analogiques, en raison de sa simplicité, de sa robustesse et de sa précision [27].

3.3.1 La pré-amplification :

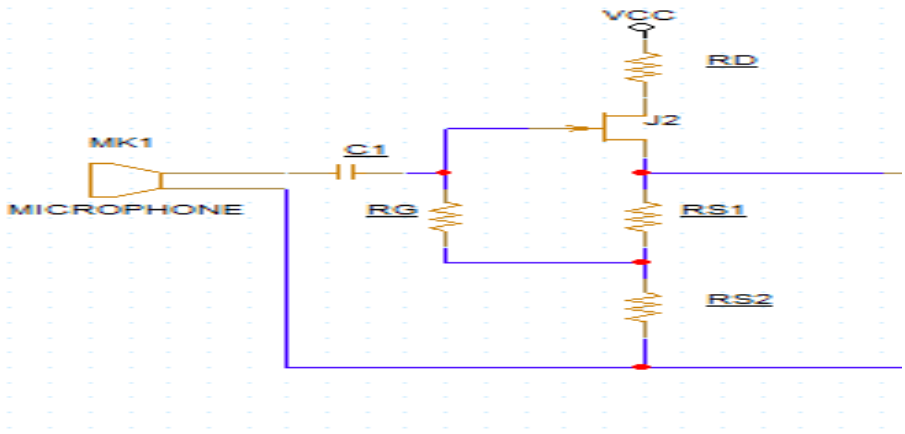


Figure 3.2 : Schéma électrique du pré- amplification

La figure 3.2 illustre un montage de pré amplification conçu pour capter les sons émis par un moteur asynchrone triphasé. Le microphone transforme les ondes sonores en un signal électrique de faible intensité. Ce dernier est ensuite transmis, via le condensateur de couplage **C1** qui supprime la composante continue, à la grille du transistor **JFET.** Nous avons déployé le transistor à effet de champ 2N3819 en raison de sa très haute impédance d'entrée. Ce transistor permet un transfert maximal de puissance entre le microphone et l'étage suivant. Les résistances RG, RS1 et RS2 assurent une polarisation correcte du transistor, garantissant son fonctionnement dans une zone linéaire. L'alimentation VCC fournit l'énergie nécessaire au bon fonctionnement de l'ensemble du circuit. Ce dispositif permet ainsi d'amplifier le signal acoustique produit par le moteur, le rendant apte à être traité dans les étages suivants [27].

3.3.2 Gain du préamplificateur

Le schéma électrique fourni représente un montage de pré amplification à base de transistor àeffet de champ (JFET). Le microphone électret (MK1) capte les ondes sonores et les convertiten un signal électrique alternatif de faible amplitude. Ce signal est ensuite transmis, via lecondensateur de liaison, à la grille du transistor JFET (désigné par J2) [27].

Le rôle du condensateur est de bloquer toute composante continue provenant du microphone, ne laissantpasser que le signal alternatif

Le transistor JFET est polarisé grâce à une résistance de grille, et le courant de drain estlimité par la résistance, reliée à la tension d'alimentation. Les résistances sont placées dans lecircuit de la source du transistor. Dans ce montage spécifique, on remarque que la tension desortie est prélevée au niveau de la source, et non pas au niveau du drain. Cela signifie que le montage est de type; Drain commun

Dans une configuration drain commun, le gain en tension est généralement positif etlégèrement inférieur à 1. Cette propriété est très utile pour l'adaptation d'impédance le montage présente une impédance d'entrée élevée (grâce à la grille du JFET) et une impédance de sortie faible, ce qui permet de transférer efficacement le signal vers les étages suivants. L'absence d'inversion de phase explique pourquoi le gain est positif.

Mathématiquement, le gain en tension d'un tel montage peut être approximé par la formule suivantes [27].

$$AV = \frac{gm.Rs}{1 + gm.RS}$$

- **gm** est la transconductance du transistor JFET, exprimée en siemens (S)
- **Rs** est la résistance totale de la source, donc Rs1+Rs2

Lorsque **gm .Rs››1 ,** le gain tend vers un, mais reste toujours légèrement inférieur à un

Par exemple, si gm = 2ms (ce qui est typique pour de nombreux JFET) et , on obtien

$$= \frac{2}{3} = 0.67 AV = \frac{2}{1+2}$$

En résumé, ce montage ne cherche pas à amplifier fortement la tension, mais à suivre lesignal d'entrée avec fidélité, tout en assurant une bonne adaptation d'impédance.

Le signal de sortie est donc une copie du signal d'entrée, sans inversion, avec une amplitude légèrement

réduite. C'est pourquoi on parle d'un gain positif inférieur à un dans ce contexte [27].

3.3.3 Simulations du pré amplificateur

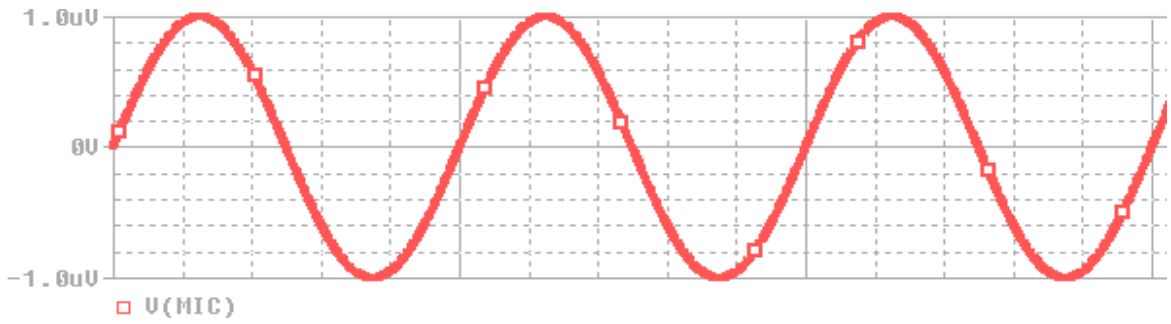


Figure 3.3 :forme d'onde de la tension d'entrée du pré amplification

La Figure 3.3 présente les résultats de la simulation, en affichant la forme d'onde de la tension obtenue en sortie du microphone. Le signal présente une amplitude extrêmement faible, de l'ordre de microvolts (µV). L'analyse de la forme d'onde met en évidence une amplitude insuffisante pour un traitement direct, ce qui justifie la nécessité d'un étage d'amplification en aval. Cette étape est indispensable pour adapter le niveau du signal aux exigences des circuits de conditionnement et de traitement analogique ou numérique qui suivent [28].

3.3.2 Amplification

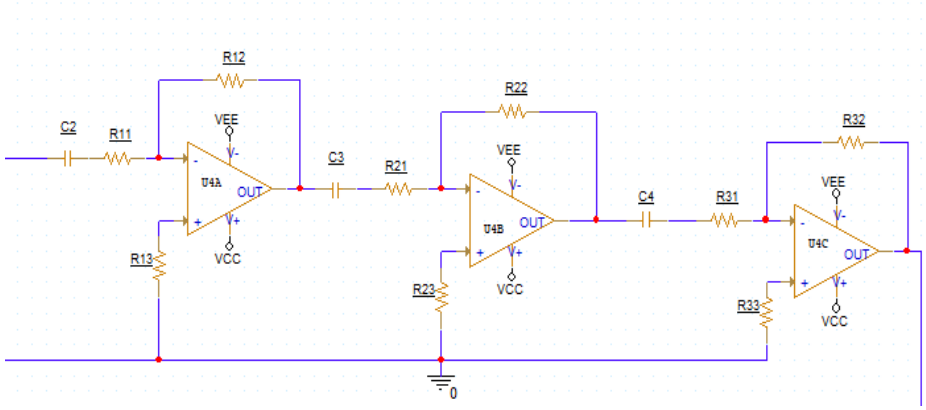


Figure 3.4: Schéma électrique de l'Amplification

La figure 3.4 présente une chaîne constituée de trois étages d'amplificateurs opérationnels, destinée à renforcer davantage le signal issu du préamplificateur. Chaque amplificateur **(U4A, U4B, U4C)** est configuré en mode inverseur, tout en en augmentant l'amplitude. Le parcours du signal débute par le condensateur C2, qui élimine les composantes continues, avant d'être amplifié une première fois par l'amplificateur U4A, dont le gain est déterminé par les résistances R**12** et **R13**Le signal passe ensuite au second étage d'amplification **(U4B)** via le condensateur C3, puis au troisième étage (U4C) à travers le condensateur C4. Cette architecture en cascade permet d'obtenir un gain total important, tout en garantissant une bonne stabilité du signal traité [28].

3.3.3 Calcul du gain

Présente une chaîne de trios amplificateurs opérationnels (U4A ,U4B,U4C) montés en mode inverseur .pour ce type de montage, le gain en tension de chaque étage est donné la formule :

$$G_i = -\frac{Ri2}{Ri1}$$

Ou :

Ri2 est la résistance de rétroaction (entre la sortie et l'entré inverseur).

Ri1 est la résistance entre l'entrée non-inverseurs et la masse.

On utilise les valeurs suivantes :

R12=200 KΩ, R13=10KΩ
R22=500 KΩ, R23=10KΩ
R32=1 MΩ, R33=10KΩ

1. **Premier étage (U4A) :**

$$G1=-\frac{R12}{R13}=-\frac{200000}{10000}=-20$$

2. **Deuxième étage (U4B) :**

$$G2=-\frac{R22}{R23}=-\frac{500000}{10000}=-50$$

3. **Dernier étage (U4C) :**

$$G3=-\frac{R32}{R33}=-\frac{1000000}{10000}=-100$$

Etant donné que le trois étages sont en cascade, le gain totale du montage est le produit des gains individuels :

$$G\ (totale) = G1*G2*G3= 20*50*100=10000$$

Pour exprimer ce gain en décibels (dB) , on applique la formule suivante :

G_{dB} =20.log (G)

G_{dB} =20.log (100000)=20x5=100 dB

Le gain total de la chaine d'amplification est donc 100000 en valeur linéaire, ce qui correspond à environ 100 dB. Ce niveau d'amplification est adapté à des signaux faibles, comme ceux issus d'un microphone, et permet d'obtenir un signal suffisamment fort pour les étapes suivantes du traitement.

3.3.4 Description et explication des ondes

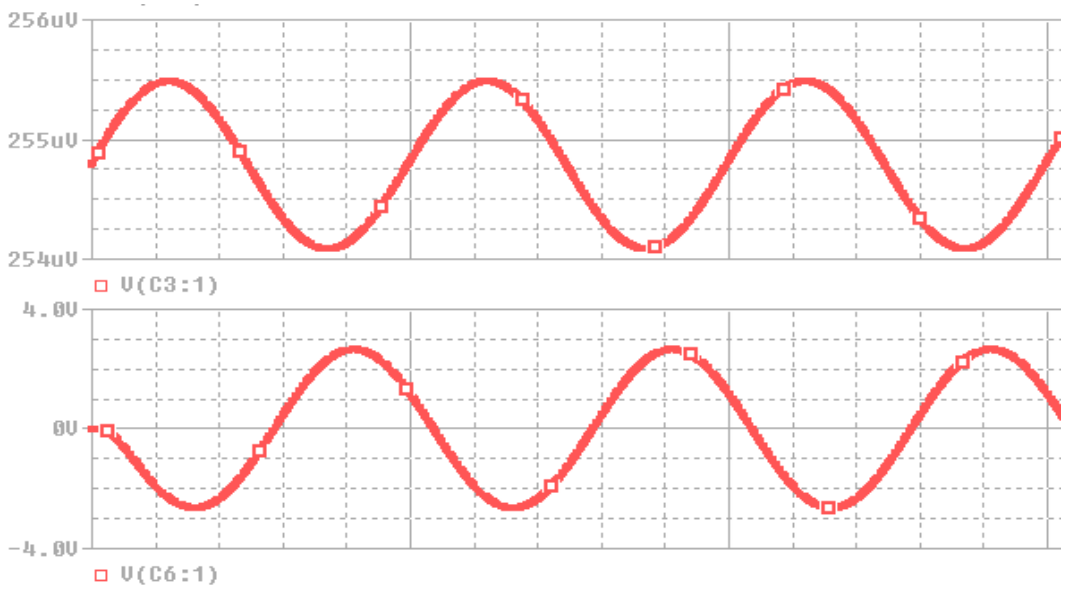


Figure 3.5 : forme d'ondes de l'entrée/sortie d'amplificateur

Les deux signaux de la simulation représentent des étapes successives de l'amplification du signal audio.

Le signal en haut, noté **V(C3:1),** montre une onde sinusoïdale de moyenne amplitude, autour de **1µV.** Il s'agit du signal après une première phase de préamplifiassions. Par rapport au signal du microphone, ce signal est déjà renforcé, mais reste encore dans la plage des microvolts. Il conserve parfaitement sa forme sinusoïdale, ce qui indique que l'amplification est fidèle, sans distorsion.

Le signal du bas, noté **V(C6:1),** représente la sortie finale du circuit d'amplification. On observe ici une onde sinusoïdale de grande amplitude, avoisinant **±4 V**. Cela montre que le signal a été fortement amplifié. La forme de l'onde reste propre et régulière, preuve que l'amplification a été linéaire. Ce signal est maintenant suffisamment puissant pour être exploité par des circuits de mise en forme.

En résumé, ces deux signaux démontrent l'effet progressif de l'amplification : d'un signal intermédiaire à faible puissance, on obtient en sortie un signal audio fort, clair et exploitable [29].

3.3.3 Circuit de mise en forme

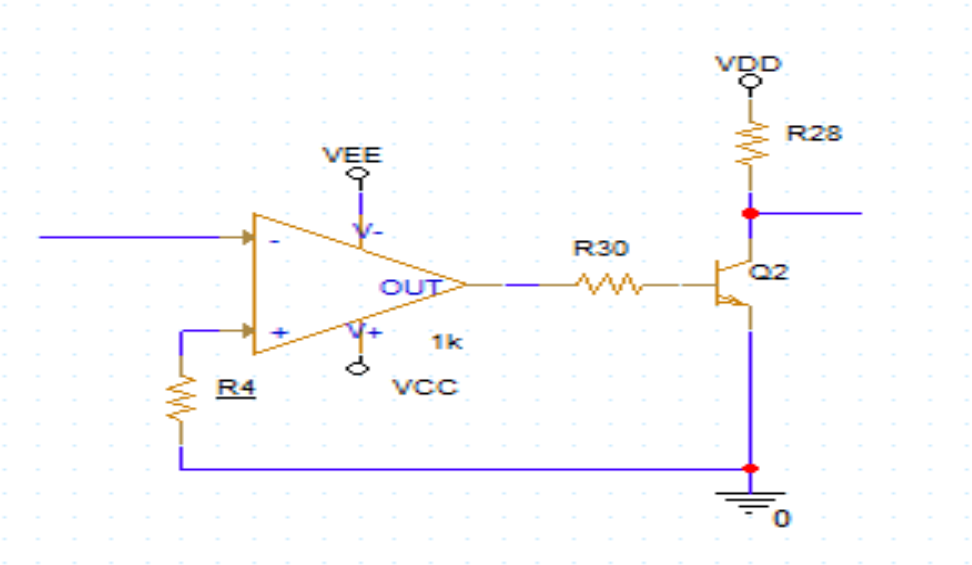


Figure 3.6 : Schéma électrique de circuit de mise en forme

La figure 3.6 représente le schéma électrique de circuit de mise en forme, dont le rôle est de convertir un signal analogique issu de l'amplificateur en un signal carre à deux niveaux (0v ou 5v). Le cœur du circuit est un amplificateur opérationnel (AOP) utilisé en mode comparateur. Celui-ci compare la tension d'entrée appliquée à sa borne inverseurs (–) avec une tension de référence fixée via une résistance R4 connectée à la borne non-inverseurs (+). Lorsque la tension d'entrée dépasse la tension de référence, la sortie de l'AOP passe à un niveau haut. Cette sortie est reliée, à travers la résistance R30, à la base d'un transistor NPN (Q2). Si la tension est suffisante, le transistor entre en conduction : il relie alors son collecteur à la masse, ce qui provoque une chute de tension à ce point, traduite par une sortie à l'état bas. À l'inverse, lorsque la sortie de l'AOP est à un niveau bas, le transistor est bloqué et le collecteur est tiré vers la tension par la résistance R28, ce qui donne une sortie à l'état haut. Ainsi, le circuit agit comme un comparateur suivi d'un étage de mise en forme à transistor, permettant d'obtenir une sortie logique nette, idéale pour les applications numériques [29].

3.3.1 Description et explication des ondes

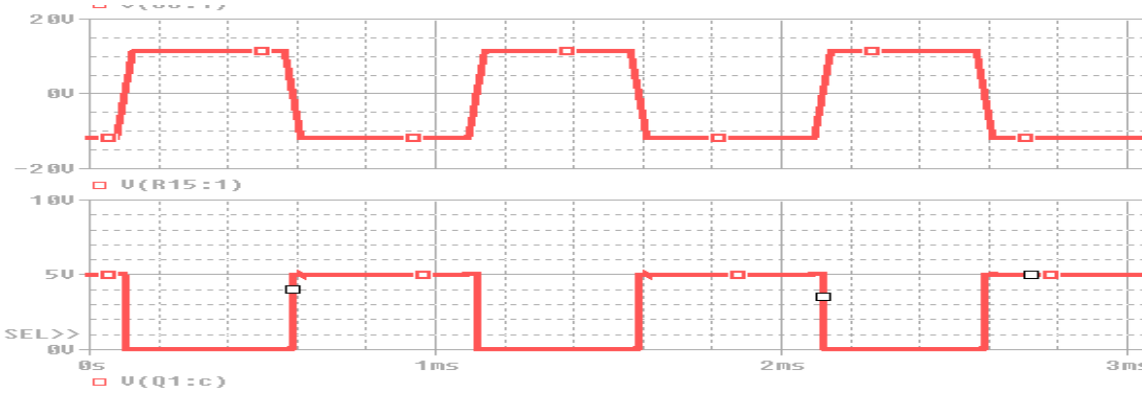


Figure 3.7 : forme d'onde de mise en forme

Dans cette image de simulation, nous observons deux signaux importants situés aux sorties de deux étages différents du circuit, tous deux présentant une forme d'onde carrée.

Le premier signal, noté **V(C6:1),** représente la sortie d'un étage de mise en forme du signal. On remarque que le signal est devenu carré, avec des transitions nettes entre des niveaux logiques bas et hauts. Cela indique que le signal sinusoïdal d'origine (amplifié auparavant) a été transformé en signal tout-ou-rien, ce qui est typique d'un comparateur ou d'un étage de mise en forme numérique. Ce type de signal est essentiel pour rendre l'information compatible avec les circuits logiques ou numériques.

Le second signal, noté **U(R15:1),** montre également un signal carré, mais avec une amplitude plus faible (de 0 à environ 5V). Ce signal semble être une version traitée ou adaptée du précédent, probablement pour alimenter un microcontrôleur, un compteur ou un système de détection logique. Le timing (temps de montée/descente et fréquence) reste similaire au premier, ce qui montre que l'information est conservée, mais l'amplitude est adaptée à une nouvelle interface.

En résumé, ces deux signaux montrent la transition du traitement analogique vers le traitement numérique : le signal sinusoïdal a été amplifié, puis converti en un signal carré adapté aux circuits numériques [28].

3.4 Schéma générale

Ce schéma représente un système structuré en trois modules : un préamplificateur, un amplificateur basé sur le circuit LM324, et un circuit de mise en forme. Le rôle du préamplificateur est de rehausser légèrement un signal de faible intensité. Ensuite, ce signal est amplifié davantage par le LM324. Enfin, la mise en forme adapte le signal amplifié en le comparant à une valeur de référence afin de générer une sortie logique. Ce type de montage permet de détecter ou de traiter des signaux analogiques [28].

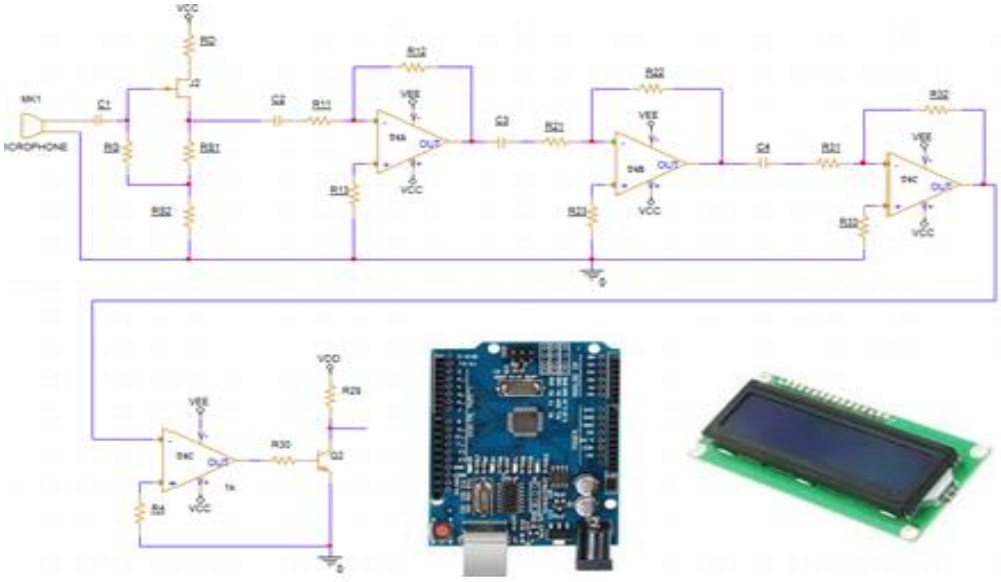


Figure 3.8 : Schéma générale du système de diagnostic

3.5 Conception et réalisation de PCB de diagnostic des moteurs

Dans le cadre de notre projet, un circuit électrique a été conçu à l'aide d'une carte PCB (Printed Circuit Board), ayant pour objectif principal la détection des anomalies dans un moteur asynchrone triphasé. Ce type de moteur est couramment utilisé dans les environnements industriels en raison de sa fiabilité et de sa simplicité de fonctionnement. Néanmoins, il reste vulnérable à certains types de défaillances pouvant affecter ses performances ou entraîner des dommages importants.

Le système de détection mis en place prend en charge les défauts suivants :

- La perte de phase (absence de l'une des trois phases d'alimentation)
- La sous-tension (tension en dessous de la valeur nominale)
- La surtension (tension au-dessus de la valeur nominale)

Ce montage permet une surveillance en temps réel de l'alimentation du moteur et signale toute irrégularité, favorisant ainsi une intervention rapide et une maintenance préventive efficace [30].

3.6 Composants utilisés dans le circuit :

Pour la réalisation de ce système destiné à la détection des défauts dans un moteur asynchrone à trois phases, nous avons utilisé les composants ci-après :

- **Arduino Uno :** microcontrôleur du circuit. Il est programmé pour compter le nombre d'impulsions électriques injectées à chaque phase pendant un délai pré-établi. Il dénombre aussi l'absence de signal (absence de phase) ou les irrégularités dans la fréquence des impulsions (sous/surtension).
- **Afficheur LCD :** il permet de visualiser en permanence le nombre d'impulsions mesurées pour chaque cas, et sert ainsi indirectement à un diagnostic visuel de l'état du moteur.
- **J2N2819 :** transistor de puissance permettant le conditionnement ou la commutation des signaux faible tension.
- **Le transistor BC107A :** utilisé dans les parties de détection ou de commutation de signaux faibles.
- **Résistances :** pour ajuster les niveaux de tension et protéger les entrées de l'Arduino.
- **Les bornes de connexion :**permettent de relier les trois phases du moteur et l'alimentation du circuit.
- **Carte PCB :** permet de regrouper tous les composants de manière compacte, ordonnée et durable.

Ce montage permet de surveiller avec précision les signaux électriques, affichage direct et peut-on l'affirmer, une information claire, et une mesure que l'on diagnostic en un clin d'œil ici par un LCD [30].

3.7 Fonctionnement de la carte de surveillance des moteurs asynchrones

La carte électronique développée dans le cadre de ce projet a pour fonction principale de détecter et d'afficher les défauts électriques touchant les moteurs asynchrones triphasés. Elle est destinée à surveiller en permanence le moteur électrique, en identifiant trois anomalies majeures :

la perte de phase, la surtension et la sous-tension. Pour remplir cette mission, la carte utilise des circuits de détection construits autour de comparateurs de tension et de transistors comme les J2N2819 et BC107A, capables de réagir aux fluctuations anormales des tensions d'entrée. Lorsqu'un défaut est identifié, un message explicite s'affiche sur un écran LCD, permettant une interprétation simple et rapide de la nature du problème.
Cette approche permet une intervention rapide de la part des équipes de maintenance, réduisant ainsi les risques de défaillances graves du moteur ou du système dans son ensemble.[27].

Chacun des défauts détectés a une influence particulière sur le comportement du moteur asynchrone. La perte de phase, qui correspond à la disparition de l'une des trois phases d'alimentation, provoque un déséquilibre du courant pouvant entraîner une surchauffe rapide du moteur et ainsi diminuer sa durée de vie. La surtension, quant à elle, résulte d'une tension supérieure à la valeur nominale, ce qui peut détériorer les isolations internes du moteur et générer des défaillances électriques. À l'opposé, la sous-tension correspond à une alimentation insuffisante, réduisant le couple développé par le moteur et pouvant provoquer un arrêt ou un fonctionnement instable. Grâce à la capacité de détection anticipée offerte par cette carte, il est possible de prévenir des pannes coûteuses tout en garantissant un fonctionnement sécurisé et optimal de l'installation.

Dans le but d'assurer un suivi plus précis du fonctionnement du moteur, une carte Arduino UNO a été intégrée au système. Sa mission consiste à comptabiliser les impulsions électriques émises par les capteurs associés à chaque type de défaut détecté. Chaque impulsion représente une manifestation précise d'un dysfonctionnement particulier. Le microcontrôleur traite ces signaux instantanément et effectue le comptage de manière automatique.

Le nombre total d'impulsions est ensuite affiché de façon lisible sur un écran LCD relié à l'Arduino. Ce dispositif permet non seulement de reconnaître la nature du défaut grâce à un message affiché, mais également d'en mesurer la fréquence d'apparition. Ainsi, les techniciens disposent d'un outil de diagnostic efficace, leur permettant de réaliser une maintenance préventive et d'intervenir rapidement en cas de besoin [27].

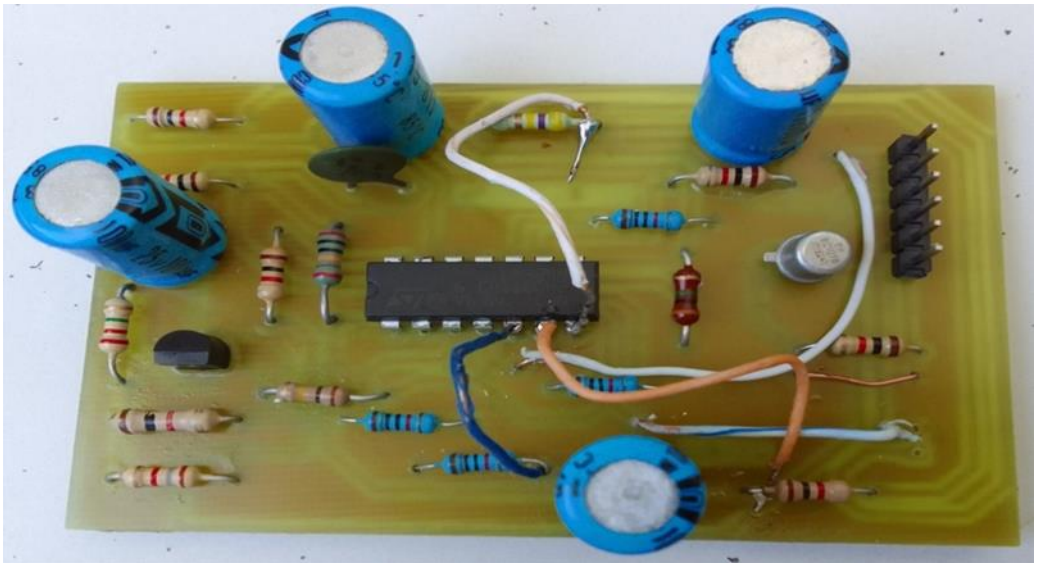


Figure 3.9 : Carte PCB

3.8 Conclusion

La chaîne de traitement des signaux analogiques de faible amplitude, incluant la pré amplification, l'amplification et la mise en forme ,joue un rôle clé dans la fiabilité et la précision des systèmes électroniques modernes. Elle permet d'extraire l'information utile d'un signal faible et bruité, puis de la convertir en une forme exploitable par les dispositifs logiques et numériques. La maîtrise de ces étapes ouvre la voie à de nombreuses applications concrètes, telles que la lecture de capteurs, le déclenchement d'alarmes ou l'automatisation de systèmes. Ce projet constitue ainsi une étape essentielle dans l'apprentissage de l'électronique analogique appliquée, alliant rigueur théorique et mise en œuvre pratique au sein d'une architecture représentative des usages industriels.

Conclusion général

Conclusion Générale

Les moteurs asynchrones triphasés jouent un rôle fondamental dans les systèmes industriels, notamment dans les contextes où la continuité du service et la prévention des pannes sont cruciales. Bien qu'ils soient réputés pour leur robustesse et leur fiabilité, ces moteurs restent vulnérables à divers types de défauts, d'origine électrique ou mécanique, pouvant entraîner une baisse de performance, voire un arrêt complet de l'installation.

Dans ce travail, nous avons d'abord présenté en détail la constitution et le principe de fonctionnement de ces machines, en mettant en évidence leurs différents types, chacun se distinguant par des caractéristiques, des avantages et des domaines d'application spécifiques. L'analyse des défauts courants – tels que ceux affectant les roulements, le rotor ou le stator – nous a permis de mieux comprendre les modes de défaillance auxquels ces moteurs sont exposés.

Nous avons ensuite exploré plusieurs techniques de diagnostic, allant des méthodes conventionnelles (comme l'analyse vibratoire ou thermique) aux approches plus avancées basées sur l'intelligence artificielle et l'analyse de données. Ces outils de surveillance et de diagnostic constituent des leviers essentiels pour une maintenance préventive ou prédictive efficace.

En conclusion, la fiabilité des moteurs asynchrones triphasés dépend fortement de la mise en place de stratégies de surveillance continues et de diagnostics performants. L'émergence de technologies avancées telles que l'intelligence artificielle, les capteurs intelligents et l'Internet des objets (IoT) offre des perspectives prometteuses pour améliorer la détection précoce des anomalies et réduire les coûts d'entretien, tout en augmentant la durée de vie des équipements.

REFERENCES

[1] B. N. Das and S. P. Das, "Electric Machines: Principles, Applications, and Control Schematics"(2010).

[2] P. Vas, Fault," Diagnosis of Induction Motors"(1993).

[3] A. Bellini, F. Filippetti, G. France schini, C. Tassoni, and G. B. Kliman, "Advances in diagnostic techniques for induction machines,"(2008).

[4] J. Faiz and B. M. Ebrahimi, "Simulation of bearing faults in induction motors with time-stepping finite element method," (2008).

[5] M. E. H. Benbouzid, "A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection (2000).

[6] J. Smith et al., "Mechanical Vibrations in Induction Motors (2019).

[7] M. Dupont, "Fault Diagnosis in Motor Shafts," (2020).

[8] A. Martinez et al., "Stator Insulation Degradation Analysis"(2020).

[9] L. Zhang et al., "Environmental Effects on Motor Insulation" (2020).

[10] R. Kumar et al., "Rotor Bar Fault Detection in Induction Motors (2020).

[11] S. Hussein, "Wear Effects on Slip Rings and Brushes," Electrical Machines & Drives Conf., 2018.

[12] P. Johnson, "Environmental Impact on Motor Reliability (2020).

[13] M. El-Halwagy and A. A. El-Hawary, "Analysis of Bearing Faults in Induction Motors Using Vibration Signals (2012).

[14] L. Zhang and J. Liang, "Effects of Environmental Factors on the Reliability of Electric Motor Components," (2015).

[15] J. Smith and M. Brown, "Diagnosis of Rotor Eccentricity Faults in Induction Motors Using Current Signature Analysis(2015).

[16] A. Kumar and R. Singh, "Vibration Analysis Techniques for Detecting Rotor-Stator Eccentricity in Asynchronous Motors," (2016).

[17] J. Smith and L. Brown, "Rotor Bar Fault Detection in Induction Motors Using Vibration Analysis," (2015).

[18] P. T. Nguyen and H. J. Kim, "Effect of Abrasive Contamination on Induction Motor Rotor Bars," (2018).

[19] R. Zhao and M. Chen, "Vibration-Based Fault Diagnosis for Induction Motors: A Review," (2018).

[20] M. El Hachemi Benbouzid and G. Champenois, "Fault detection and diagnosis in induction motors: A review," (2002).

[21] N. Bianchi, Electrical Machine Analysis Using Finite Elements, CRC Press, 2005.

[22] B. Lu, T. G. Habetler, and R. G. Harley, "A survey of efficiency-estimation methods for in-service induction motors," (2006).

[23] J. Faiz and B. M. Ebrahimi, "A new method for loss calculation and thermal analysis in electrical machines,"(2007).

[24] Y. H. Kim, Y. J. Jeon, and D. H. Lee, "Fault diagnosis of induction motor using FFT and neural network,"(2010).

[25] A. S. Sedra and K. C. Smith, Microelectronic Circuits, 7th ed., New York, NY, USA: Oxford University Press, 2014.

[26] Arduino, "Arduino Uno Rev3," [Online]. Available: https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3. [Accessed: Jun. 2, 2025].

[27] OrCAD, "OrCAD PCB Design Suite," [Online]. Available: https://www.orcad.com. [Accessed: Jun. 2, 2025].

[28] P. Horowitz and W. Hill, The Art of Electronics, 3rd ed., Cambridge, UK: Cambridge University Press, (2015)

[29] R. Schaumann and M. E. Van Valkenburg, Design of Analog Filters, 2nd ed., Oxford University Press, 2001.

[30] A. Dupont, Traitement du signal analogique et numérique pour systèmes embarqués, Éd. Techniques Ingénieur, Paris, France, (2020).

[31] A. Dupont, Détection des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés : méthodes et applications, Éditions Techniques Industrielles, Paris, France, (2022).

[32] Projet personnel, "Conception d'un système de détection des défauts dans un moteur asynchrone triphasé," Travail de fin d'études, Université XYZ, année.

[33] J. Smith, "Introduction to Electrical Motors,"(2020).