



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



N° d'ordre : M...../GE/2026

MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de

MASTER EN Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Par

LOUDINA Mohamed Ali et BENALIOUA M'hamed Belkacem

Intitulé du sujet

**Diagnostic des défauts électriques des moteurs asynchrones par
analyseur de puissance**

Soutenu le 30 /06/ 2026 devant le jury composé de :

Président :	Mr Azzedine Mohamed	MCA	Université de Mostaganem.
Examinatrice :	Mme Ghomri Leila	MCA	Université de Mostaganem
Rapporteur :	Mr Chaouch Abdellah	Pr	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2025/2026

◆ *Dédicace* ◆

À moi-même Ali,

À toi qui as porté des rêves plus lourds que la fatigue, qui as choisi de te relever à chaque fois que l'ombre semblait l'emporter sur la lumière. Ce travail n'est pas qu'un diplôme : c'est le témoignage brut de ce que tu es capable d'endurer, de surmonter et de bâtir, pierre après pierre. Derrière chaque ligne se cache une nuit blanche, une mâchoire serrée, une victoire que personne n'a vue. Sois fier. Pas seulement du résultat final, mais du chemin parcouru, des chutes et des reprises, de l'homme que tu es devenu en traversant cette épreuve.

À mes chers parents

Vous êtes le socle sur lequel je me tiens, et la flamme qui a veillé sur moi dans les nuits les plus longues. Chaque sacrifice que vous avez consenti sans jamais vous en vanter, sans jamais rien réclamer en retour s'est gravé en moi comme une dette sacrée que seul l'amour peut espérer honorer. Ce mémoire, je le dépose entre vos mains comme un soldat dépose ses armes après la bataille, en signe de reconnaissance infinie. Merci d'avoir cru en moi, même quand le doute me gagnait.

À mes frères et sœurs

Merci pour votre affection, votre présence et votre soutien tout au long de mon parcours. Les moments partagés avec vous ont été une source de motivation et de bonheur. Je vous souhaite réussite, santé et épanouissement dans tout ce que vous entreprendrez.

À toute ma famille

Pour leur soutien, leurs encouragements et leur confiance. Trouvez dans ce travail l'expression de ma sincère reconnaissance.

À mes chers amis

À Bilal, Sedik, Alilou, Sabrina, Amira, Alae, vous que la vie m'a offerts comme des cadeaux inattendus. Vous qui avez su rire avec moi, et garder mes silences sans jamais les juger. Vous êtes la famille que l'on choisit, celle que le destin place sur notre route pour nous rappeler que nous ne sommes jamais seuls. Que nos chemins, même s'ils s'éloignent, restent à jamais noués les uns aux autres.

Sans oublier mon binôme **Kacem**. Travailler à tes côtés a été bien plus qu'une simple collaboration — ce fut une véritable complicité, faite de confiance, de rigueur partagée et d'entraide sincère. Merci pour ta disponibilité, ton sérieux et ta bonne humeur qui ont rendu chaque étape plus légère.

-OUDINA Mohamed Ali

◆ *Dédicace* ◆

À mes chers parents,

Vous êtes la première lumière qui a éclairé mon chemin et la force silencieuse qui m'a permis d'avancer. Votre amour, vos sacrifices et votre soutien indéfectible ont été les fondations de chacune de mes réussites. Chaque étape franchie porte l'empreinte de vos efforts et de vos prières. Ce travail est avant tout le vôtre, car sans vous, rien de tout cela n'aurait été possible.

À mes chères sœurs,

Merci pour votre affection, votre présence et votre confiance. Vous avez toujours été une source de joie, de motivation et de réconfort. Que ce modeste accomplissement soit le témoignage de tout l'amour et de toute la reconnaissance que je vous porte.

À ma fiancée,

Je souhaite exprimer ma gratitude et ma reconnaissance pour ton amour, ton soutien et ta compréhension tout au long de mes études. Tu as été mon roc, mon confidente et ma source de motivation. Ta présence à mes côtés, ton encouragement constant et ta confiance en moi ont été des éléments essentiels de mon parcours. Merci d'avoir partagé cette aventure avec moi et d'avoir été mon plus grand soutien.

À mes chers amis,

Merci pour votre amitié sincère, votre présence et tous les moments partagés. Vous avez su apporter de la bonne humeur dans les périodes les plus exigeantes et rendre ce parcours plus agréable. Que notre amitié demeure aussi forte au fil des années.

Sans oublier mon binôme **Ali**. Travailler à tes côtés a été une expérience enrichissante, marquée par l'entraide, le sérieux et le respect mutuel. Merci pour ton engagement et pour tous les efforts que nous avons fournis ensemble afin de mener ce projet à son terme.

-BENALIOUA M'hamed Belkacem

Remerciements

Avant toute chose, toute la gratitude revient à Allah, le Tout-Puissant, qui nous a accordé la force, la patience et la lumière pour mener à bien ce travail. Tout succès vient de Lui seul.

Nous remercions très vivement notre encadreur, Monsieur **Chaouch Abdellah**, Professeur à l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, pour votre disponibilité, vos précieux conseils et votre bienveillance tout au long de ce parcours. Votre encadrement éclairé a été un pilier essentiel à la réalisation de ce travail. Merci de nous avoir guidés avec patience et dévouement.

Nous remercions également Madame le Docteur **Rezini Saliha** pour l'honneur qu'elle nous fait en acceptant de présider le jury de soutenance de ce mémoire.

Nos vifs remerciements vont aussi à Madame le Docteur **Ghomri Leila** pour l'intérêt qu'elle a porté à notre recherche, en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par ses précieuses propositions.

Nous tenons à exprimer notre sincère gratitude au laboratoire de l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem pour tout ce qu'il nous a apporté en termes d'équipement, d'espaces de travail, de commodités, de conseils et d'orientation.

Résumé

Ce mémoire porte sur le diagnostic des défauts des moteurs asynchrones triphasés à l'aide d'un analyseur de puissance. Le moteur asynchrone, machine robuste et omniprésente dans l'industrie, est sujet à diverses défaillances dont les défauts d'alimentation. Nous avons conçu et réalisé un banc d'essai comprenant un moteur asynchrone, une génératrice synchrone et un tableau de charge résistive. L'analyseur de puissance Lutron DW-6195 a permis de mesurer les grandeurs électriques dans six conditions de fonctionnement. L'exploitation des indicateurs fournis par l'analyseur permet de caractériser la signature électrique de ce défaut électrique. Ce travail confirme l'intérêt de l'analyseur de puissance comme outil de diagnostic non-intrusif pour la maintenance prédictive des moteurs asynchrones.

Mots-clés : Moteur asynchrone, diagnostic, défauts, analyseur de puissance, Lutron DW-6195, chute de tension, maintenance prédictive.

Abstract

This thesis addresses the diagnosis of faults in three-phase asynchronous motors using a power analyzer. The asynchronous motor, a robust machine widely used in industry, is subject to various failures, including supply faults. We designed and built a test bench comprising an asynchronous motor, a synchronous generator and a resistive load panel. The Lutron DW-6195 power analyzer was used to measure the electrical quantities under six operating conditions. The indicators provided by the analyzer make it possible to characterize the electrical signature of this electrical fault. This work confirms the value of the power analyzer as a non-intrusive diagnostic tool for the predictive maintenance of asynchronous motors.

Keywords : Asynchronous motor, diagnosis, faults, power analyzer, Lutron DW-6195, voltage sag, predictive maintenance.

ملخص

يتناول هذا المشروع تشخيص أعطال المحركات اللامتزامنة ثلاثية الأطوار باستخدام محلل القدرة. يُعد المحرك اللامتزامن آلة متينة ومنتشرة بشكل واسع في الصناعة، إلا أنه يبقى عرضة لأعطال متعددة من بينها أعطال التغذية الكهربائية. قمنا بتصميم وإنجاز منصة تجريبية تتكون من محرك لامتزامن، ومولدة تزامنية، ولوحة حملية أومية. سمح محلل القدرة بقياس المقادير الكهربائية في ست حالات تشغيل. يسمح استغلال المؤشرات التي يوفرها المحلل بتوصيف الإشارة الكهربائية لهذا العطل الكهربائي. تؤكد هذه الدراسة أهمية محلل القدرة كأداة تشخيص غير تدخلية في إطار الصيانة التنبؤية للمحركات اللامتزامنة.

الكلمات المفتاحية: المحرك اللامتزامن، التشخيص، الأعطال، محلل القدرة، انخفاض التوتر، الصيانة التنبؤية،

Lutron DW-6195

Table des matières

Introduction générale	9
1 LE MOTEUR ASYNCHRONE ET LES MÉTHODES DE DIAGNOSTIC DES DÉFAUTS	11
1.1 Introduction	12
1.2 Constitution du moteur asynchrone triphasé	12
1.2.1 Le stator	13
1.2.2 Le rotor	13
1.2.3 L'entrefer	15
1.2.4 Les organes mécaniques	15
1.3 Principe de fonctionnement	15
1.3.1 Création du champ magnétique tournant	15
1.3.2 La loi de Lenz et la création du couple	16
1.3.3 Le glissement	17
1.4 Les défauts des moteurs asynchrones	17
1.4.1 Défauts courants des moteurs asynchrones	17
1.4.2 Défauts électriques	19
1.4.3 Défauts mécaniques	20
1.5 Les méthodes de diagnostic des défauts	23
1.5.1 Surveillance par Analyse Vibratoire	23
1.5.2 Surveillance Acoustique	23
1.5.3 Surveillance Thermique	23
1.5.4 Analyse par le vecteur de Park	24
1.5.5 Analyse de Signature Électrique (ESA)	24
1.5.5.1 Analyse de Signature du Courant Statorique (MCSA) .	24
1.5.5.2 Analyse de Signature de la Puissance (MPSA)	25
1.5.5.3 Analyse de la Signature du Facteur de Puissance Instantané (IPFSA)	25
1.6 Conclusion	26
2 L'analyseur de puissance Lutron DW-6195	27
2.1 Introduction	28

2.2	Généralités sur les analyseurs de puissance	28
2.2.1	Définition et rôle	28
2.2.2	Grandeurs mesurables	29
2.2.3	Principe de fonctionnement d'un analyseur de puissance	30
2.3	Présentation de l'analyseur de puissance LUTRON DW-6195	33
2.3.1	Caractéristiques techniques principales	33
2.3.2	Configuration pour l'expérimentation	36
2.3.3	Acquisition des données et extraction	37
2.4	Intérêt dans le diagnostic des moteurs asynchrones	38
2.5	Conclusion	39
3	RÉALISATION DU BANC D'ESSAI POUR LE DIAGNOSTIC DES DÉFAUTS DES MACHINES ASYNCHRONES	40
3.1	Introduction	41
3.2	Objectifs du banc d'essai	41
3.3	Description du Montage Expérimental	41
3.3.1	Vue d'ensemble	41
3.3.2	Bloc 1 : Source d'Alimentation	43
3.3.3	Bloc 2 : Moteur asynchrone triphasé	43
3.3.4	Bloc 3 : Génératrice Synchrone	43
3.3.5	Instruments de mesure auxiliaires	44
3.3.6	Bloc 4 : Tableau de Charge Résistive	44
3.3.7	Bloc 5 : Analyseur de Puissance Lutron DW-6195	45
3.4	Dimensionnement du Tableau de Charge Résistive	45
3.4.1	Conception du Tableau	45
3.4.2	Calcul de la puissance totale de la charge	46
3.4.3	Calcul des courants et tensions	46
3.4.4	Dimensionnement des fusibles	47
3.4.5	Dimensionnement du Disjoncteur Général 4P	47
3.4.6	Dimensionnement des câbles du tableau de charge	48
3.4.7	Récapitulatif du dimensionnement	48
3.5	Procédure expérimentale	49
3.5.1	Préparation du Banc	49
3.5.2	Mise en marche	49
3.6	Conclusion	50
4	PRÉSENTATION DES RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS	51
4.1	Introduction	52
4.2	Partie 1 : Fonctionnement normal — Essais de référence	52
4.2.1	Introduction	52

4.2.2	Essai 1 : Marche à vide	52
4.2.2.1	Conditions de l'essai	52
4.2.2.2	Résultats de mesure	53
4.2.2.3	Calcul du glissement à vide	55
4.2.2.4	Interprétation des résultats	55
4.2.3	Essai 2 : Marche en charge nominale (100%)	55
4.2.3.1	Conditions de l'essai	55
4.2.3.2	Résultats de mesure	56
4.2.3.3	Calcul du glissement en charge	56
4.2.3.4	Interprétation des résultats	57
4.2.4	Essai 3 : Charge partielle 50% (100%)	57
4.2.4.1	Conditions de l'essai	57
4.2.4.2	Résultats de mesure	58
4.2.4.3	Calcul du glissement en charge	58
4.2.4.4	Interprétation des résultats	58
4.3	Partie 2 : Fonctionnement en conditions dégradées	59
4.3.1	Introduction	59
4.3.2	Principe physique du défaut simulé	59
4.3.3	Essai 4 : Chute de tension sur L2 — A vide	60
4.3.3.1	Conditions expérimentales	60
4.3.3.2	Résultats de mesure	61
4.3.3.3	Calcul du glissement	61
4.3.3.4	Analyse et interprétation des résultats	62
4.3.4	Essai 5 : Chute de tension sur L2 — Charge nominale (100%)	62
4.3.4.1	Conditions expérimentales	62
4.3.4.2	Résultats de mesure	63
4.3.4.3	Calcul du glissement	64
4.3.4.4	Analyse et interprétation des résultats	65
4.3.5	Essai 6 : Chute de tension sur L2 — Charge partielle (50%)	66
4.3.5.1	Conditions expérimentales	66
4.3.5.2	Résultats de mesure	67
4.3.5.3	Calcul du glissement	69
4.3.5.4	Analyse et interprétation des résultats	69
4.4	Synthèse globale et tableau de bord diagnostique	70
4.4.1	Diagnostic principales	70
4.5	Conclusion	71

Conclusion générale	72
----------------------------	-----------

Bibliographie	73
----------------------	-----------

Table des figures

1.1	Constitution du moteur asynchrone triphasé	12
1.2	Stator d'un moteur asynchrone triphasé	13
1.3	Rotor a cage d'un moteur asynchrone triphasé	14
1.4	Rotor bobiné d'un moteur asynchrone triphasé	14
1.5	Construction de base d'un moteur asynchrone	15
1.6	Principe de fonctionnement du moteur asynchrone	16
1.7	Classification des défauts de moteurs asynchrone	18
1.8	Pourcentage des défauts de moteurs asynchrone[10]	18
1.9	Représentation des défauts statoriques	19
1.10	Défauts d'excentricité	20
1.11	Principaux composants du roulement	22
2.1	Analyseur de puissance Lurton Model DW-6195	34
2.2	Capture des grandeurs mesurables	36
2.3	Exemple d'extraction de fichier sur Excel data screen	37
2.4	Exemple d'extraction de fichier sur Excel graphic screen	37
3.1	Schéma de banc d'essai	42
3.2	Tableau de Charge Résistive	45
3.3	Photo du banc d'essai	49
4.1	Schéma unifilaire du banc d'essai (essai à vide)	53
4.2	Résultats de mesure : Essai 1 — Marche à vide (afficheur de l'analyseur)	54
4.3	Résultats de mesure : Essai 1 — Marche à vide (EXCEL)	54
4.4	Schéma de banc d'essai (charge nominale)	56
4.5	Résultats de mesure : Essai 2 — Charge nominale 100%	56
4.6	Résultats de mesure : Essai 2 — Charge nominale 50%	58
4.7	Schéma de banc d'essai (essai chute de tension)	60
4.8	Résultats de mesure : Essai 3 — Chute de tension L2 + Charge 100% (afficheur de l'analyseur)	63
4.9	Résultats de mesure : Essai 3 — Chute de tension L2 + Charge 50% (afficheur de l'analyseur)	67

Liste des tableaux

1.1	Comparaison des méthodes de surveillance	26
2.1	Caractéristiques techniques du LUTRON DW-6195	35
3.1	caractéristique de la source d'alimentation	43
3.2	caractéristique du moteur asynchrone	43
3.3	Caractéristiques de la génératrice synchrone	44
3.4	Instruments de mesure auxiliaires	44
3.5	Dimensionnement des fusibles	47
3.6	Dimensionnement du disjoncteur général	47
3.7	Récapitulatif du dimensionnement	48
4.1	Résultats de mesure : Essai 3 — Chute de tension L2 a vide	61
4.2	Résultats de mesure : Essai 3 — Chute de tension L2 + Charge 100% .	64
4.3	Résultats de mesure : Essai 4 — Chute de tension L2 + Charge 50% .	68
4.4	Synthèse globale des six essais : indicateurs diagnostiques	70

Liste des symboles et abréviations

n_s	Vitesse de synchronisme (tr/min)
f	Fréquence du réseau (Hz)
p	Nombre de paires de pôles
g	Glissement (%)
n	Vitesse de rotation du rotor (tr/min)
I	Courant (A)
U ou V	Tension (V)
P	Puissance active (kW)
Q	Puissance réactive (kVAR)
S	Puissance apparente (kVA)
$\cos \varphi$	Facteur de puissance
φ	Angle de déphasage (°)
THD	Taux de distorsion harmonique total (%)
VUR	Taux de déséquilibre des tensions (%)
AUR	Taux de déséquilibre des courants (%)
MCSA	Motor Current Signature Analysis
ESA	Electrical Signature Analysis
FFT	Transformée de Fourier rapide
EPRI	Electric Power Research Institute
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
NEMA	National Electrical Manufacturers Association

Introduction générale

Les moteurs asynchrones triphasés constituent l'un des piliers de l'industrie moderne : ils représentent plus de 70% de la consommation électrique industrielle mondiale et assurent l'essentiel de l'entraînement électromécanique dans les secteurs de la production, du transport, de l'énergie et du traitement des eaux. Leur robustesse mécanique, leur simplicité de construction et leur faible coût de fabrication en font la machine électrique la plus répandue au monde. Cette omniprésence a toutefois un revers : tout arrêt imprévu d'un moteur asynchrone, qu'il soit dû à un défaut électrique ou mécanique, se traduit par des pertes de production, des coûts de maintenance corrective élevés et, dans certains cas, des risques pour la sécurité du personnel.

Face à ces enjeux, le diagnostic précoce des défauts des moteurs asynchrones est devenu un axe de recherche et de développement industriel majeur. Si des techniques telles que l'analyse vibratoire, la surveillance thermique ou la surveillance acoustique restent largement utilisées, elles présentent des limites pratiques : nécessité d'un accès direct à la machine, coût d'instrumentation élevé et sensibilité aux perturbations de l'environnement industriel. L'analyse de signature électrique (Electrical Signature Analysis, ESA), qui exploite les signaux de tension, de courant et de puissance directement accessibles au tableau électrique, s'impose comme une alternative non-intrusive, économique et compatible avec une surveillance en continu, sans arrêt de la machine.

C'est dans cette problématique que s'inscrit ce mémoire, qui propose une approche de diagnostic des défauts électriques des moteurs asynchrones triphasés fondée sur l'analyse des grandeurs de puissance mesurées à l'aide d'un analyseur de puissance industriel, le Lutron DW-6195. Ce travail vise ainsi à réaliser un banc d'essai dédié au diagnostic des défauts du moteur asynchrone, à dimensionner et mettre en œuvre le tableau de charge résistive associé, à se familiariser avec la manipulation de l'analyseur de puissance, et enfin à mener les essais expérimentaux nécessaires au diagnostic des défauts électriques observés.

Ce travail est structuré en quatre chapitres. Le premier chapitre présente le moteur asynchrone triphasé, sa constitution, son principe de fonctionnement, ainsi qu'une revue des défauts les plus fréquents et des principales méthodes de diagnostic existantes. Le second chapitre est consacré à l'analyseur de puissance Lutron DW-6195 : ses principes de mesure, ses caractéristiques techniques et sa configuration pour

l'expérimentation. Le troisième chapitre détaille la conception, le dimensionnement et la réalisation du banc d'essai, comprenant le moteur asynchrone, la génératrice synchrone et le tableau de charge résistive. Enfin, le quatrième chapitre présente et interprète les résultats expérimentaux obtenus dans les différentes conditions de fonctionnement, normales et dégradées. Une conclusion générale, accompagnée des perspectives pour des travaux futurs, clôture ce mémoire.

Chapitre 1

LE MOTEUR ASYNCHRONE ET LES MÉTHODES DE DIAGNOSTIC DES DÉFAUTS

1.1 Introduction

Avant d'aborder le diagnostic des défauts proprement dit, il est nécessaire de rappeler les éléments fondamentaux relatifs au moteur asynchrone triphasé : sa structure interne, son principe de fonctionnement électromagnétique, ainsi que la typologie des défaillances auxquelles il est exposé. Une bonne compréhension de ces aspects théoriques est indispensable pour interpréter correctement, dans les chapitres suivants, les signatures électriques mesurées sur le banc d'essai. Ce chapitre présente d'abord la constitution du moteur asynchrone triphasé — stator, rotor, entrefer et organes mécaniques — puis son principe de fonctionnement, depuis la création du champ magnétique tournant jusqu'à la notion de glissement. Nous classons ensuite les défauts les plus couramment rencontrés en deux grandes familles, électriques et mécaniques, en nous appuyant sur les statistiques de défaillance rapportées dans la littérature. Enfin, nous dressons un état de l'art des principales méthodes de diagnostic existantes — analyse vibratoire, surveillance acoustique, surveillance thermique, analyse par le vecteur de Park et analyse de signature électrique (ESA) — ce qui permet de situer, parmi ces approches, la méthode retenue dans ce mémoire : le diagnostic par analyse des grandeurs de puissance.

1.2 Constitution du moteur asynchrone triphasé

Le moteur asynchrone triphasé est une machine électrique tournante à courant alternatif. Il est constitué de deux parties principales mécaniquement séparées par un entrefer de faible épaisseur (0.2 à 2 mm selon la puissance) : le stator, partie fixe, et le rotor, partie tournante. L'ensemble est logé dans une carcasse mécanique assurant la protection et l'évacuation thermique.

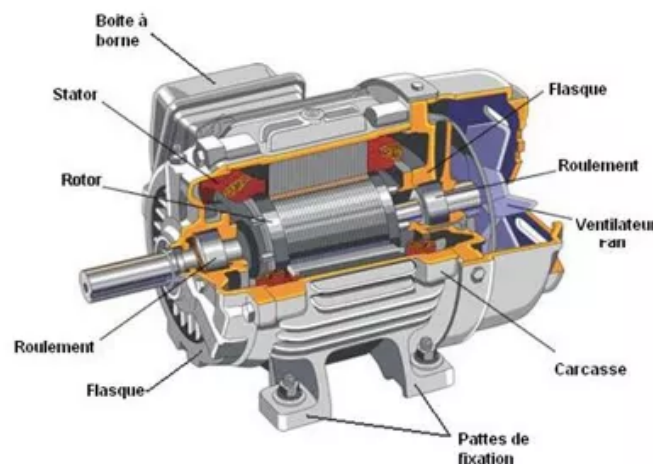


FIGURE 1.1. Constitution du moteur asynchrone triphasé

1.2.1 Le stator

Le stator constitue la partie fixe du moteur. Il est formé d'un empilage de toles ferromagnetiques decoupees et assemblees pour reduire les pertes par courants de Foucault et par hysteresis. Ces toles forment un circuit magnetique presentant des encoches regulierement reparties sur sa peripherie interieure. Dans ces encoches sont loges les enroulements statoriques : trois bobinages identiques decales de 120° electriques l'un par rapport a l'autre, correspondant aux trois phases du reseau triphase (L1, L2, L3). Ces enroulements sont realises en fil de cuivre emaille, isole par une resine epoxy assurant une rigidite dielectrique suffisante. Selon la puissance et la tension d'utilisation, les enroulements peuvent etre connectes en etoile (Y) ou en triangle (Δ) sur la plaque a bornes.



FIGURE 1.2. Stator d'un moteur asynchrone triphasé

1.2.2 Le rotor

Le rotor est la partie tournante du moteur. Il est monté sur un arbre en acier supporté par deux roulements à billes. Il est constitué d'un empilage de tôles ferromagnétiques présentant des encoches sur sa périphérie extérieure.

Il existe deux types de rotors, correspondant à deux familles de moteurs asynchrones :

a) Rotor à cage d'écureuil : Les encoches du rotor sont remplies de barres conductrices en aluminium ou en cuivre, court-circuitées à leurs deux extrémités par des anneaux de court-circuit (anneaux de court-circuit). Cet ensemble forme une structure semblable à une cage d'écureuil, d'où son nom. Ce type de rotor est le plus répandu en raison de sa robustesse et de son absence de contacts glissants.

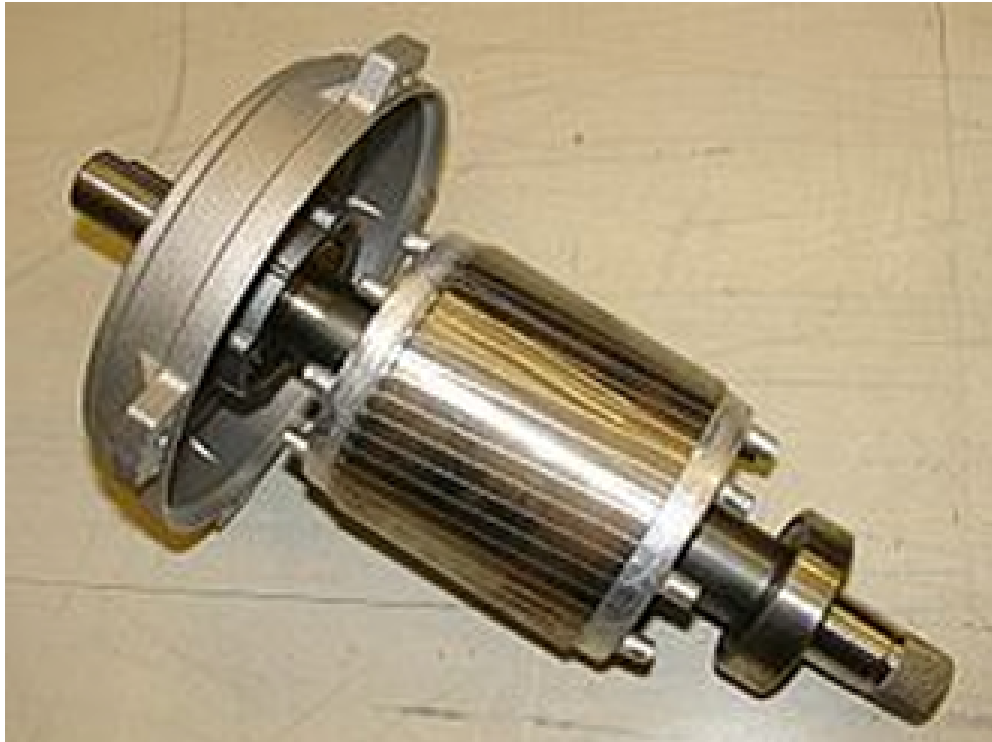


FIGURE 1.3. Rotor à cage d'un moteur asynchrone triphasé

b) Rotor bobiné : Le rotor comporte un enroulement triphasé similaire au stator, dont les bornes sont accessibles via trois bagues conductrices et des balais en graphite. Ce type permet d'insérer des résistances extérieures pour limiter le courant de démarrage ou régler la vitesse.

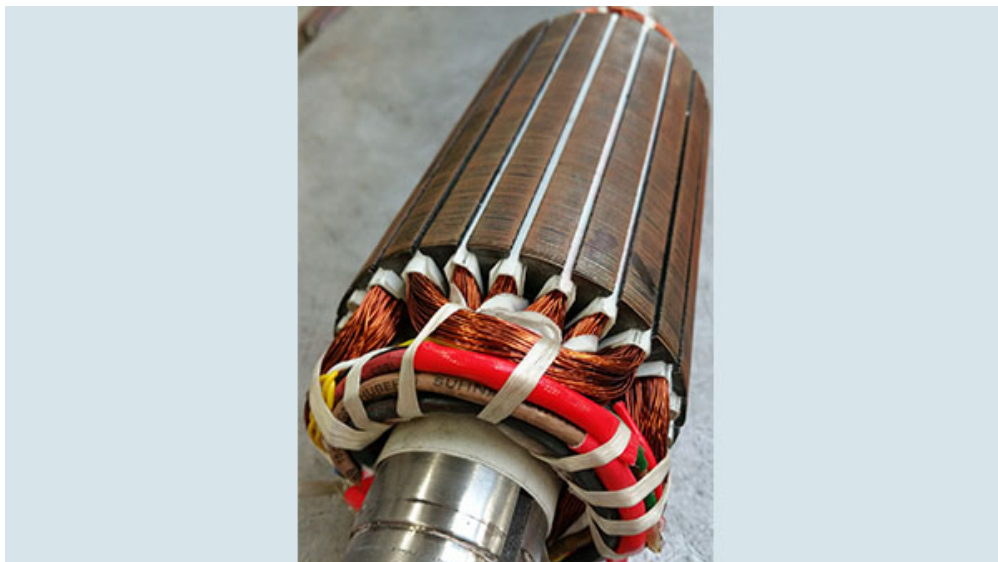


FIGURE 1.4. Rotor bobiné d'un moteur asynchrone triphasé

1.2.3 L'entrefer

L'entrefer est l'espace d'air séparant le stator et le rotor. Son épaisseur, de l'ordre de 0.2 à 2 mm selon la puissance de la machine, est un paramètre critique : un entrefer uniforme garantit un champ magnétique symétrique et un couple régulier. Toute non-uniformité de l'entrefer — due à une usure des roulements ou à un défaut d'alignement — constitue un défaut d'excentricité générant des forces radiales parasites et des vibrations anormales.

1.2.4 Les organes mécaniques

Les roulements à billes assurent le guidage en rotation de l'arbre et transmettent les efforts radiaux et axiaux à la carcasse. Ils constituent, statistiquement, la première cause de défaillance mécanique des moteurs asynchrones (41 % des pannes selon l'IEEE [13]). La carcasse en fonte ou en aluminium assure la rigidité mécanique, la protection contre les agressions extérieures (indice IP) et l'évacuation thermique par convection forcée grâce à un ventilateur solidaire de l'arbre.

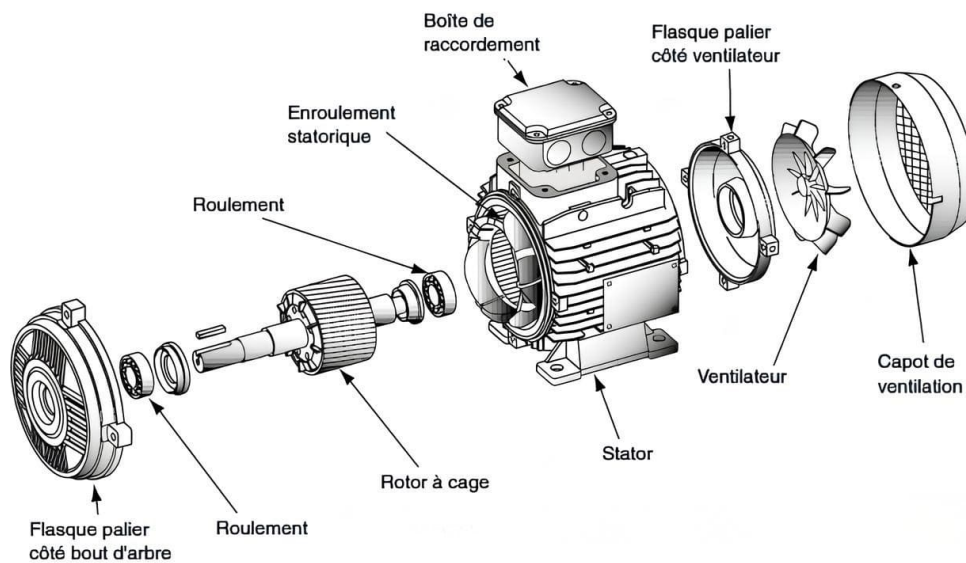


FIGURE 1.5. Construction de base d'un moteur asynchrone

1.3 Principe de fonctionnement

1.3.1 Création du champ magnétique tournant

Le principe fondamental du moteur asynchrone repose sur la création d'un champ magnétique tournant par les enroulements statoriques. Lorsque les trois enroulements statoriques, décalés de 120° dans l'espace, sont alimentés par un système de tensions

triphasées équilibrées décalées de 120° dans le temps, le champ magnétique résultant dans l'entrefer est un champ tournant d'amplitude constante.

La vitesse de rotation de ce champ, appelée vitesse de synchronisme n_s , est donnée par :

$$n_s = 60 \times f/p \quad [\text{tr/min}] \quad (1.1)$$

Où f est la fréquence du réseau et p le nombre de paires de pôles.

1.3.2 La loi de Lenz et la création du couple

Le champ magnétique tournant statorique induit, par la loi de Faraday, des forces électromotrices (f.e.m.) dans les barres du rotor. Ces f.e.m. provoquent la circulation de courants dans les barres rotoriques (court-circuitées par les anneaux d'extrémité). Par la loi de Lenz, les courants rotoriques créent à leur tour un champ magnétique qui s'oppose à la cause qui lui a donné naissance — c'est-à-dire qu'il tend à entraîner le rotor dans le sens de rotation du champ statorique. L'interaction entre le champ statorique et les courants rotoriques génère une force de Laplace ($F = B \times I \times L$) qui crée le couple électromagnétique entraînant le rotor.

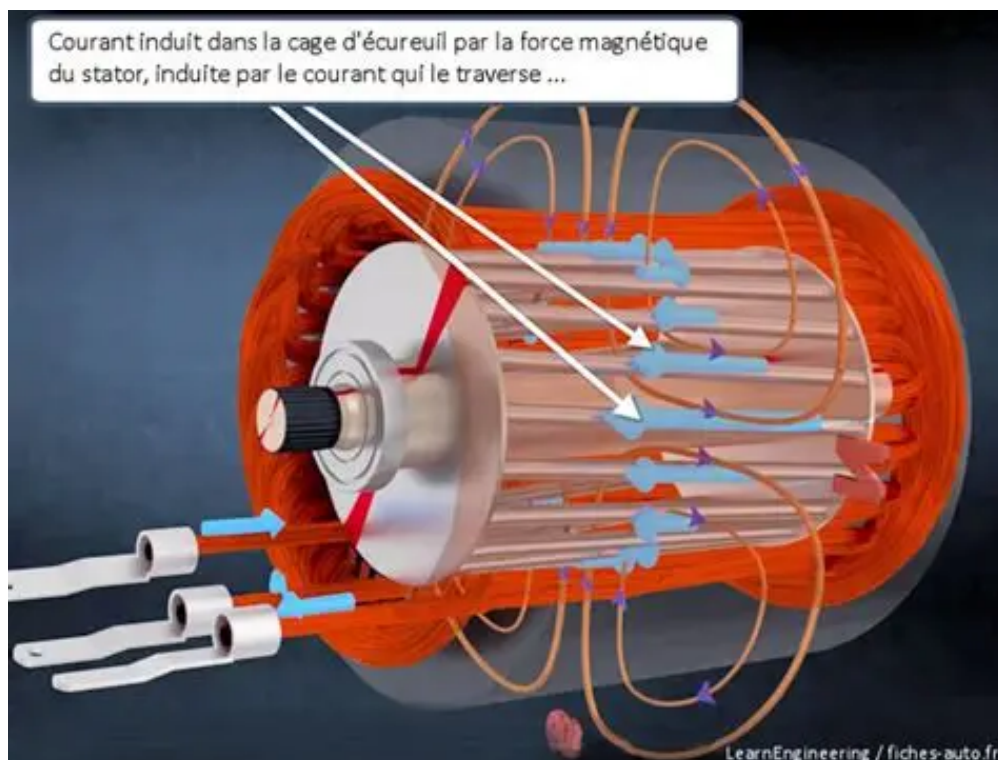


FIGURE 1.6. Principe de fonctionnement du moteur asynchrone

1.3.3 Le glissement

Le rotor ne peut jamais atteindre la vitesse de synchronisme n_s : s'il tournait à n_s , il n'y aurait plus de variation de flux relatif entre le stator et le rotor, donc plus de f.e.m. induite, plus de courant rotorique et plus de couple. Le rotor tourne nécessairement à une vitesse n légèrement inférieure à n_s . La différence relative entre ces deux vitesses est le glissement g :

$$g = (n_s - n)/n_s \times 100 \quad [\%] \quad (1.2)$$

Le glissement est nul à vide idéal et augmente avec la charge. À charge nominale, il est typiquement compris entre 3 et 6 % pour les moteurs industriels.

1.4 Les défauts des moteurs asynchrones

1.4.1 Défauts courants des moteurs asynchrones

Malgré leur fiabilité et leur robustesse reconnues, les moteurs asynchrones sont susceptibles de présenter différents types de défauts pouvant entraîner des défaillances graves, des arrêts de production, des risques pour la sécurité du personnel ainsi que des pertes en matières premières [8]. La détection précoce de ces défauts, dès les premiers stades de leur développement, permet d'éviter des pannes système et les coûts qui en découlent. Un défaut peut être défini comme une anomalie indésirable affectant une ou plusieurs caractéristiques d'une variable par rapport à son comportement nominal, et susceptible d'initier une défaillance du système. Il convient de souligner qu'une défaillance résulte de l'occurrence d'un défaut, mais qu'un défaut seul ne conduit pas nécessairement à une défaillance. En règle générale, toute défaillance peut être considérée comme un défaut, mais la réciproque n'est pas vraie. Les moteurs asynchrones présentent de nombreux avantages, notamment leur faible coût, leur simplicité de construction, leur robustesse et leur haute fiabilité [10]. Néanmoins, malgré ces qualités, des défaillances peuvent survenir. Comme l'illustre la Figure 1.7, les défauts des moteurs asynchrones peuvent être regroupés en deux grandes catégories : les défauts électriques et les défauts mécaniques.

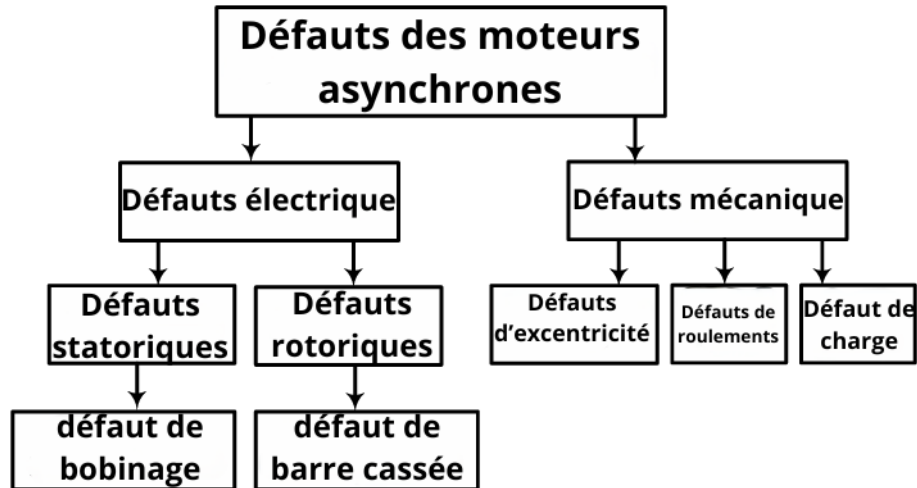


FIGURE 1.7. Classification des défauts de moteurs asynchrone

La répartition des différents types de défaillances des moteurs asynchrones est présentée à la Figure 1.8, telle que rapportée par l'Electric Power Research Institute (EPRI). Il ressort clairement que les défauts de roulements et les défauts liés au stator constituent les deux principales causes de défaillance. Environ 10 % des défaillances sont associées au rotor, tandis que la majorité d'entre elles sont liées aux causes résumées dans la figure suivante [9].

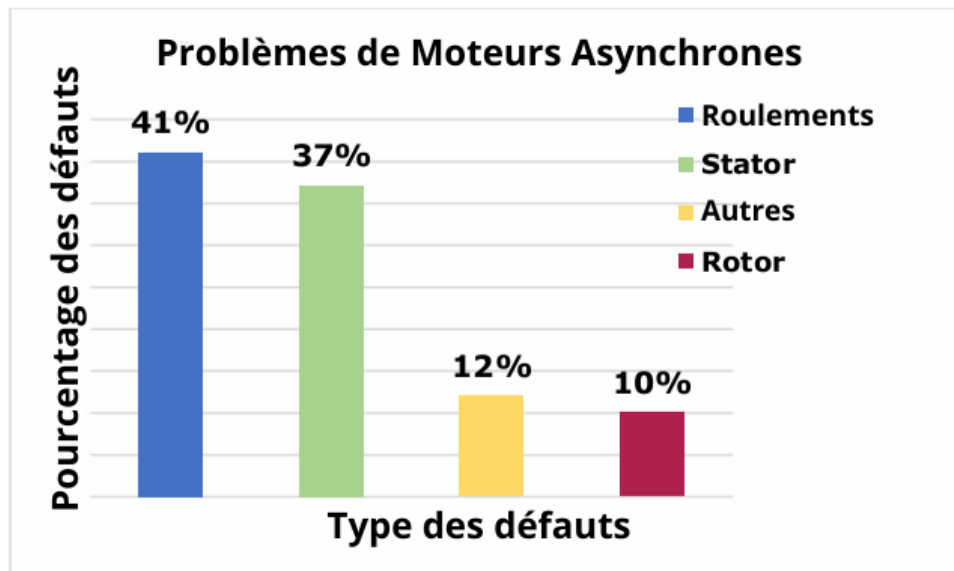


FIGURE 1.8. Pourcentage des défauts de moteurs asynchrone[10]

Les défauts les plus fréquemment rencontrés sont :

- Les défauts de roulements :
- Les barres et anneaux rotoriques cassés :
- Les courts-circuits dans les bobines statoriques :

— Le déséquilibre et les excentricités du stator.

Ces défauts peuvent engendrer d'autres anomalies dans le moteur, telles que des déséquilibres de tension ou de courant au stator, des oscillations du couple, des chutes de rendement, des échauffements excessifs, des vibrations accrues et/ou une réduction du couple moteur [9].

1.4.2 Défauts électriques

Les défauts électriques les plus courants dans les moteurs asynchrones sont liés au stator et/ou au rotor.

Défauts statoriques Les défauts statoriques représentent environ 40 % de l'ensemble des défaillances signalées dans les moteurs asynchrones. Il est donc impératif de les diagnostiquer dès les premiers stades de leur apparition. Ces défauts peuvent être classés en cinq catégories :

1. Court-circuit entre phases :
2. Court-circuit phase-terre :
3. Court-circuit entre bobines d'une même phase :
4. Circuit ouvert sur une phase (fonctionnement monophasé) :
5. Court-circuit inter-spices au sein d'une bobine.

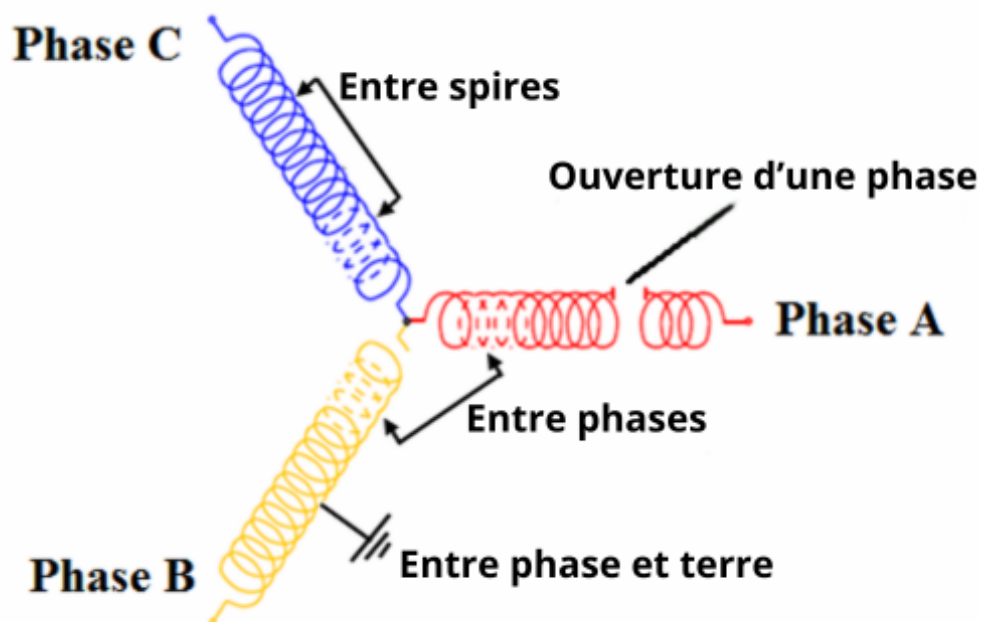


FIGURE 1.9. Représentation des défauts statoriques

Défauts rotoriques Les défauts rotoriques résultent principalement de la rupture de barres rotoriques sous l'effet des variations de charge. Les facteurs à l'origine de ces

ruptures sont les contraintes thermiques, les contraintes magnétiques, les contraintes environnementales et les contraintes mécaniques [12]. La présence de barres rotoriques cassées se manifeste par l'apparition de composantes harmoniques latérales dans le spectre de puissance du courant statorique. La composante latérale gauche est due aux asymétries électriques et magnétiques de la cage rotorique, tandis que la composante latérale droite est liée aux ondulations de vitesse provoquées par les pulsations du couple moteur [9]. La fréquence de ces bandes latérales est définie par l'équation (1.3) [9] :

$$f = (1 \pm 2S) \cdot f_s \quad (1.3)$$

f désigne la fréquence des raies latérales caractéristiques d'un défaut rotorique dans le spectre du courant statorique, f_s la fréquence fondamentale d'alimentation du réseau, et S le glissement du moteur asynchrone.

1.4.3 Défauts mécaniques

Entre 40 et 50 % des défauts des moteurs asynchrones sont d'origine mécanique et peuvent être classés en deux catégories : les défauts d'excentricité et les défauts de roulements [11].

Défauts d'excentricité L'excentricité du rotor se produit lorsque l'entrefer entre le stator et le rotor n'est plus uniforme, c'est-à-dire que le rotor n'est plus centré dans le stator. On distingue trois types :

- Excentricité statique : le centre de rotation est décalé de façon fixe par rapport au centre géométrique du stator ;
- Excentricité dynamique : le centre de rotation du rotor tourne autour du centre géométrique ;
- Excentricité mixte : combinaison des deux cas précédents.

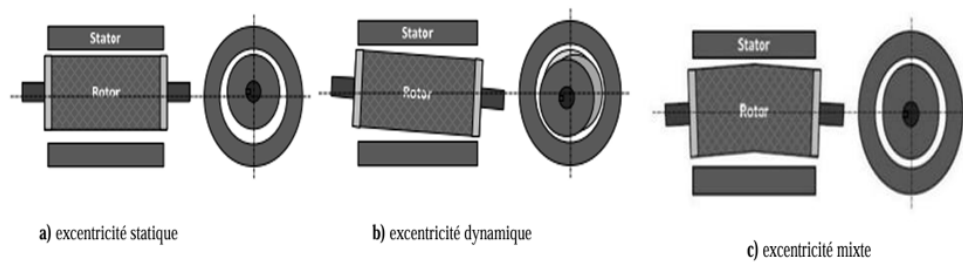


FIGURE 1.10. Défauts d'excentricité

Ces défauts peuvent avoir plusieurs origines : des imperfections de fabrication, une usure ou un mauvais positionnement des roulements, une déflexion de l'arbre, ou encore un fonctionnement à des vitesses critiques. Une tolérance d'excentricité jusqu'à 10 % est généralement acceptée ; au-delà, les déséquilibres des forces radiales risquent d'endommager le stator et/ou le rotor.

Sur le plan du diagnostic, l'excentricité génère des signatures fréquentielles caractéristiques dans le spectre du courant statorique, ce qui permet sa détection. Ces composantes fréquentielles dépendent de la géométrie du moteur (nombre d'encoches, nombre de paires de pôles), du glissement et des harmoniques de la force magnétomotrice statorique.

Défauts de roulements Selon [9], les défauts de roulements représentent environ 41 % des défaillances des moteurs électriques, ce qui en fait la cause de défaillance la plus fréquente. Leur détection précoce est donc primordiale. Un roulement est composé de deux bagues (intérieure et extérieure) entre lesquelles circulent des éléments roulants (billes ou rouleaux) dans des chemins de roulement. Selon la localisation du défaut, on distingue trois types :

- Défaut sur le chemin de roulement extérieur ;
- Défaut sur le chemin de roulement intérieur ;
- Défaut sur les éléments roulants.

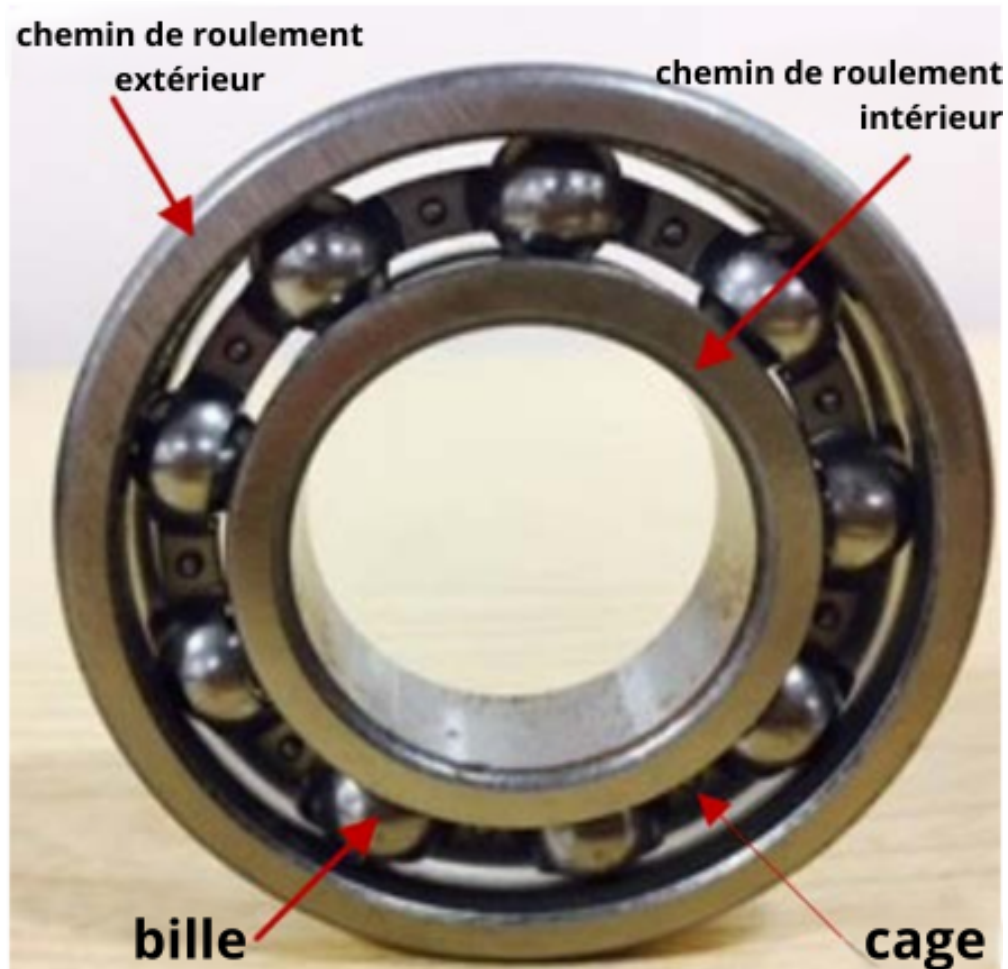


FIGURE 1.11. Principaux composants du roulement

Chaque type de défaut génère une fréquence caractéristique propre, qui dépend de la géométrie du roulement (diamètre des billes, diamètre primitif, angle de contact) et de la vitesse de rotation du rotor. Tout défaut de roulement se manifeste par des vibrations mécaniques à des fréquences bien définies, ce qui permet son identification. En pratique, le diagnostic des roulements repose principalement sur l'analyse vibratoire, qui constitue la méthode la plus couramment utilisée pour surveiller leur état.

Désalignement de l'arbre Le désalignement de l'arbre dans les structures rotor-palier est une cause fréquente de vibrations dans les machines tournantes ; il peut être de nature parallèle ou angulaire . Un désalignement survient lorsque les éléments d'un système ne sont pas coaxiaux. Des accouplements sont généralement utilisés pour compenser ce désalignement entre les arbres en absorbant les efforts de réaction qui en résultent.

1.5 Les méthodes de diagnostic des défauts

Le diagnostic des défauts des moteurs asynchrones regroupe l'ensemble des techniques permettant de détecter, localiser et quantifier une anomalie en cours de fonctionnement, sans démontage de la machine. On distingue les méthodes invasives (nécessitant l'installation de capteurs internes) et les méthodes non invasives, qui s'appuient sur les grandeurs électriques ou mécaniques accessibles en fonctionnement normal.

1.5.1 Surveillance par Analyse Vibratoire

L'analyse vibratoire est l'une des techniques de surveillance les plus répandues. En effet, toute machine tournante génère des vibrations, même en bon état de fonctionnement. Le signal vibratoire est capté par des capteurs, puis analysé pour évaluer l'état du moteur. Cependant, cette méthode présente certaines limites :

- Elle nécessite un accès direct à la machine et un positionnement précis des capteurs ;
- Son coût de mise en œuvre peut être élevé ;
- Elle est peu adaptée à la détection des défauts à un stade précoce ;
- Les signaux peuvent être perturbés par les vibrations d'autres machines environnantes.

1.5.2 Surveillance Acoustique

La surveillance acoustique repose sur l'analyse des signaux acoustiques à haute fréquence émis par le moteur, généralement captés par un microphone piézoélectrique. Elle offre un bon rapport signal/bruit dans les environnements industriels, notamment au-delà de 50 kHz. Ses principaux inconvénients sont :

- Un coût système élevé ;
- Une atténuation rapide du signal, nécessitant de placer les capteurs au plus près de la source ;
- Une expertise spécialisée requise pour son interprétation.

1.5.3 Surveillance Thermique

La température est un indicateur général largement utilisé pour détecter les anomalies dans les moteurs asynchrones. Des thermocouples ou des thermographes peuvent être employés pour surveiller des composants spécifiques tels que les roulements, les bobinages et le circuit magnétique. Toutefois, cette méthode présente des limitations :

- L'accès aux informations thermiques du rotor en fonctionnement est difficile ;
- Une élévation de température peut avoir des origines autres qu'un défaut (surcharge, température ambiante élevée, etc.) ;

1.5.4 Analyse par le vecteur de Park

La transformation de Park est une extension de la transformation de Clarke qui introduit un repère tournant synchronisé avec le champ magnétique statorique. Elle permet de convertir les courants statoriques triphasés $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$ en deux composantes continues i_d et i_q en régime permanent équilibré :

$$i_d = \sqrt{(2/3)} \times [i_a - i_b/2 - i_c/2] \quad (1.4)$$

$$i_q = \sqrt{(2/3)} \times [(i_b - i_c) \times \sqrt{3}/2] \quad (1.5)$$

Dans le plan (i_d, i_q) , le vecteur de courant de Park trace :

- Un cercle parfait centré à l'origine → moteur sain en régime équilibré
- Une ellipse → déséquilibre de tension ou court-circuit statorique
- Un cercle excentré → offset DC dans les capteurs ou composante continue
- Une figure déformée complexe → harmoniques de courant significatifs

La détection du passage cercle → ellipse et la quantification de l'excentricité de l'ellipse constituent les indicateurs diagnostiques de cette méthode. Son application rigoureuse nécessite un échantillonnage rapide des formes d'onde de courant.

1.5.5 Analyse de Signature Électrique (ESA)

Face aux coûts et contraintes des méthodes précédentes, Electrical signature analysis (ESA) s'est imposée comme une alternative prometteuse. Elle repose sur l'analyse des signaux électriques (courant, tension, puissance) pour détecter et diagnostiquer les défauts du moteur, sans interrompre son fonctionnement.

Ses principaux avantages sont :

- Non invasive : les signaux sont relevés directement au tableau de commande ;
- Pas de capteurs supplémentaires ni d'accès direct à la machine ;
- Détection précoce des défauts dès les premiers stades de développement ;
- Possibilité de surveillance à distance.

Les techniques ESA les plus utilisées sont les suivantes.

1.5.5.1 Analyse de Signature du Courant Statorique (MCSA)

La MCSA (Motor Current Signature Analysis) est la technique ESA la plus répandue. Elle consiste à analyser le spectre fréquentiel du courant statorique afin de détecter des défauts tels que les barres rotoriques cassées, l'excentricité de l'entrefer et

les défauts de roulements. Chaque type de défaut génère des composantes harmoniques caractéristiques (bandes latérales) autour de la fréquence fondamentale d'alimentation.

Ses principaux avantages sont :

- Non invasive et simple à mettre en œuvre ;
- Applicable à tout moteur électrique en service ;
- Adaptée à la détection des défauts mécaniques et électriques ;
- Permet une surveillance en ligne en temps réel.

1.5.5.2 Analyse de Signature de la Puissance (MPSA)

La MPSA (Motor Power Signature Analysis) exploite simultanément les signaux de courant et de tension pour calculer la puissance instantanée du moteur. Elle combine ainsi les informations contenues dans les deux signaux, ce qui améliore la fiabilité du diagnostic. Des études ont démontré que le spectre de puissance est plus riche en informations que le seul spectre de courant, notamment pour la détection des barres rotoriques cassées.

1.5.5.3 Analyse de la Signature du Facteur de Puissance Instantané (IPFSA)

Le facteur de puissance instantané est défini comme le rapport entre la puissance active (kW) et la puissance apparente (kVA). Sa valeur est comprise entre 0 et 1. Tout défaut mécanique ou électrique dans le moteur entraîne des fluctuations du couple, qui se répercutent directement sur le facteur de puissance instantané sous forme de composantes harmoniques caractéristiques, permettant ainsi la détection du défaut.

Avantages de la méthode

- Combine les informations de deux signaux (courant et tension) en une seule grandeur ;
- Permet la détection de nombreux défauts : barres rotoriques cassées, excentricités statique et dynamique, défauts de roulements et déséquilibres statoriques ;

Method	Avantages	Inconvénients
Analyse Vibratoire	Tres repandue, fiable	Accès direct nécessaire, cout eleve
Surveillance Thermique	Simple, non-invasive	Diagnostic limite, pas de detection rotorique
Analyse Acoustique	Bon rapport signal/bruit	Attenuation rapide, expertise requise
Vecteur de Park	Detection desquilibre / courts-circuits	Necessite echantillonnage rapide
ESA (notre méthode)	Non-intrusive, economique, surveillance continue	Depend de la qualité des mesures

TABLE 1.1. Comparaison des méthodes de surveillance

1.6 Conclusion

Ce chapitre a posé les bases théoriques nécessaires à la compréhension du travail expérimental développé dans ce mémoire. Le moteur asynchrone triphasé, machine robuste et omniprésente dans l'industrie, est sujet à diverses défaillances dont les plus fréquentes sont les défauts de roulements (41 %), statoriques (37 %) et rotoriques (10 %). Ces défauts se manifestent par des modifications mesurables des grandeurs électriques aux bornes du moteur — courants, puissances, harmoniques — que les méthodes de diagnostic non-intrusif permettent d'identifier. Parmi ces méthodes, l'analyse des indicateurs de puissance et la théorie de la puissance instantanée ont été retenues pour ce travail en raison de leur adéquation avec l'instrumentation disponible (analyseur Lutron DW-6195) et les défauts simulés (déséquilibre et chute de tension). Le chapitre suivant présentera en détail l'instrument de mesure principal utilisé dans ce travail : l'analyseur de puissance Lutron DW-6195, ses principes de mesure, ses fonctionnalités et son mode de connexion sur le banc d'essai.

Chapitre 2

L'analyseur de puissance Lutron DW-6195

2.1 Introduction

La qualité de l'énergie électrique influence directement la fiabilité et la durée de vie des moteurs asynchrones. Des perturbations telles que les déséquilibres de tension, les harmoniques ou les transitoires peuvent provoquer des échauffements anormaux, des contraintes mécaniques excessives et une dégradation accélérée de l'isolation [19, 7]. Dans un contexte industriel où la disponibilité des équipements est cruciale, la maintenance prédictive apparaît comme une approche privilégiée : elle vise à surveiller en continu des paramètres significatifs pour anticiper les défaillances avant qu'elles n'entraînent un arrêt de production. L'analyseur de puissance (Power Quality Analyzer) constitue l'instrument clé de cette surveillance. Il permet d'acquérir avec précision les grandeurs électriques triphasées (tensions, courants, puissances active et réactive, facteur de puissance, harmoniques) et d'enregistrer les formes d'onde temporelles. L'utilisation d'un analyseur de puissance dans une démarche de maintenance prédictive offre plusieurs bénéfices : réduction des arrêts imprévus, allongement de la durée de vie des machines, diminution des coûts de maintenance et amélioration de la sécurité des installations [18, 16]. Ce chapitre a pour objectif de présenter l'analyseur de puissance utilisé dans cette étude – le LUTRON DW-6195 – ainsi que les fondements théoriques et pratiques de son utilisation pour le diagnostic des moteurs asynchrones. Après un rappel des généralités sur les analyseurs de puissance et des grandeurs qu'ils mesurent, nous détaillerons le principe de mesure de la puissance électrique en régime triphasé. Nous décrirons ensuite les caractéristiques techniques de l'appareil, sa configuration et la procédure d'acquisition des données. Enfin, nous exposerons le protocole expérimental mis en œuvre sur le banc d'essai et les premières étapes d'exploitation des données en vue des traitements ultérieurs.

2.2 Généralités sur les analyseurs de puissance

2.2.1 Définition et rôle

Un analyseur de puissance, aussi appelé analyseur de qualité de l'énergie (Power Quality Analyzer ou PQA), est un instrument de mesure performant destiné à surveiller, enregistrer et analyser les grandeurs électriques d'un système de distribution d'énergie. Un simple multimètre fournit une valeur instantanée (tension, courant, résistance), alors que l'analyseur de puissance permet de capturer les formes d'onde sur une période prolongée et d'analyser finement la stabilité et la qualité de l'énergie électrique.

Cet appareil a pour fonction principale de détecter et de mesurer les perturbations susceptibles d'affecter le réseau, notamment les creux de tension et les surtensions,

les harmoniques, le flicker ou encore les déséquilibres de phase. Il permet donc de diagnostiquer l'origine des dysfonctionnements et de proposer des solutions correctives. La différence entre un analyseur de puissance et d'autres instruments de mesure se résume comme suit :

- Multimètre : c'est un appareil de base qui permet de mesurer avec beaucoup de précision des valeurs discrètes, comme la tension continue ou alternative, le courant ou la résistance. Il ne permet ni d'enregistrer dans le temps, ni d'analyser les harmoniques.
- Oscilloscope : Appareil à large bande passante permettant de visualiser en temps réel la forme d'onde des signaux électriques. Très utile pour observer des phénomènes transitoires rapides, il ne calcule pas intrinsèquement les grandeurs de puissance ni les indicateurs de qualité d'énergie sur la durée.
- Analyseur de puissance : Combine la précision de mesure d'un multimètre à la capacité d'enregistrement et d'analyse d'un oscilloscope. Il est spécialement destiné pour calculer les grandeurs dérivées (puissances, harmoniques, facteur de puissance) et pour réaliser des diagnostics approfondis.

Les analyseurs de puissance sont couramment utilisés dans trois grands domaines :

1. Audits énergétiques : Ils évaluent la consommation électrique (kWh, kVARh) et repèrent les points de gaspillage d'énergie pour améliorer l'efficacité énergétique des installations.
2. Surveillance de la qualité de l'énergie : Ils mesurent en permanence les paramètres du réseau afin de détecter et d'analyser les perturbations (creux de tension, harmoniques, transitoires) susceptibles d'endommager les équipements sensibles.
3. Diagnostic des machines électriques : Ils permettent de détecter, par analyse des signatures électriques (courants, tensions, puissance instantanée), les défauts naissants dans les moteurs asynchrones avant qu'ils ne provoquent une panne.

2.2.2 Grandeurs mesurables

Un analyseur de puissance triphasé comme le LUTRON DW-6195, utilisé dans cette étude, permet de mesurer et de calculer un large éventail de grandeurs électriques indispensables à l'analyse de la qualité de l'énergie et au diagnostic des machines :

- Tensions : Valeur efficace (RMS) des tensions phase-neutre et phase-phase, ainsi que leur forme d'onde temporelle.
- Courants : Valeur efficace (RMS) du courant dans chaque phase par rapport à la terre, généralement mesurée à l'aide de pinces ampèremétriques, et leur forme d'onde.

- Puissances : Calcul des puissances active (kW), réactive (kVAR) et apparente (kVA), à la fois par phase et pour l'ensemble du système triphasé.
- Facteurs de puissance et angle de phase : Le facteur de puissance (PF) , l'angle de phase et le $\cos \varphi$ (facteur de déplacement), qui quantifient l'efficacité de la transmission de l'énergie.
- Harmoniques : Analyse des harmoniques de tension et de courant jusqu'au 50ème ordre, ainsi que le calcul du taux de distorsion harmonique total (THD) , un indicateur clé de la pureté du signal électrique.
- Énergies : Enregistrement des énergies active (kWh) , apparente (kVAh) et réactive (kVARh) , permettant un suivi de la consommation et une analyse des coûts.
- Autres grandeurs système : Mesure de la fréquence du réseau, et calcul de grandeurs avancées comme le rapport de déséquilibre des tensions (VUR) ou des courants (AUR).

2.2.3 Principe de fonctionnement d'un analyseur de puissance

Un analyseur de puissance opère selon un processus de mesure en plusieurs étapes : il capte d'abord les signaux électriques (tension et courant), puis les échantillonne, les traite de manière numérique pour calculer les puissances, et enfin les analyse (harmoniques, transitoires, déséquilibre, etc.). Le fonctionnement est très similaire pour les modèles haut de gamme comme le Lutron DW-6195 .

Acquisition des signaux électriques L'analyseur est placé entre la source d'alimentation et la charge Il mesure :

- Tension : directement entre les phases (ou phase-neutre), à l'aide de sondes de tension branchées aux bornes appropriées de l'appareil.
- Courant : via des sondes de courant (pinces de type CT ou capteurs à effet Hall), placées autour des conducteurs alimentant le moteur.

Ces capteurs fournissent des signaux proportionnels à la tension et au courant (souvent en volts ou en millivolts) qui sont ensuite transmis à l'unité de traitement interne de l'analyseur.

Échantillonnage et numérisation Pour manipuler ces signaux, l'analyseur les soumet à une étape de numérisation :

- Les signaux analogiques de tension et de courant sont échantillonnés à haute fréquence (souvent de quelques kHz à plusieurs dizaines de kHz selon l'appareil).
- Chaque échantillon est converti en une valeur numérique par un convertisseur analogique-numérique (ADC).

- L'analyseur mémorise temporairement les échantillons pour une ou plusieurs périodes, ce qui lui permet de reconstruire les formes d'ondes instantanées $u(t)$ et $i(t)$ de chaque phase.

Ce processus permet d'avoir une bonne résolution temporelle, nécessaire pour calculer des moyennes précises, détecter des transitoires et analyser les harmoniques.

Calcul des puissances et des paramètres associés À partir des signaux numérisés, l'analyseur effectue plusieurs calculs de puissance en temps réel :

- Puissance instantanée par phase :

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (2.1)$$

Cette grandeur résulte de la multiplication, point à point, des valeurs de tension et de courant.

- Puissance active P : La puissance active est la valeur moyenne de la puissance instantanée sur une période T :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (2.2)$$

Pour un système triphasé équilibré, la puissance active totale est la somme des puissances actives de chaque phase.

- Puissance réactive Q et puissance apparente S :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.3)$$

La puissance réactive peut être déduite à partir des valeurs efficaces de tension et de courant, ainsi que du déphasage φ entre les signaux :

$$Q = U_{\text{RMS}} \cdot I_{\text{RMS}} \cdot \sin \varphi \quad (2.4)$$

$$P = U_{\text{RMS}} \cdot I_{\text{RMS}} \cdot \cos \varphi \quad (2.5)$$

d'où le facteur de puissance :

$$PF = \cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (2.6)$$

Ces calculs sont réalisés pour chaque phase, puis agrégés au niveau du système triphasé.

- Énergie : L'analyseur intègre la puissance active dans le temps pour obtenir l'énergie (en kWh), ainsi que l'énergie réactive et apparente.

Tous ces calculs sont exécutés en continu par les microprocesseurs de l'analyseur, qui affichent les résultats sur l'écran et les mettent à jour plusieurs fois par seconde.

Analyse fréquentielle (harmoniques et THD) En plus des grandeurs de puissance, l'analyseur réalise une analyse spectrale des signaux de tension et de courant :

Une transformée de Fourier rapide (FFT) ou une méthode équivalente est appliquée aux signaux échantillonnés pour extraire leurs composantes fréquentielles.

On peut ainsi identifier les harmoniques (2e, 3e, 4e, ..., jusqu'au 50e ordre, par exemple) présentes dans la tension et le courant.

L'indice de distorsion harmonique (THD) est ensuite calculé :

- pour la tension :

$$\text{THD}_U = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{h_{\max}} U_h^2}{U_1^2}} \quad (2.7)$$

- Pour le courant (de même forme) :

$$\text{THD}_I = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2}{I_1^2}} \quad (2.8)$$

où U_1 et I_1 sont les amplitudes de la composante fondamentale, et U_h , I_h sont celles des harmoniques d'ordre h .

Calcul des paramètres de qualité de l'énergie À partir des signaux originaux et de leur analyse fréquentielle, l'analyseur déduit plusieurs paramètres de qualité de l'énergie :

- Fréquence du réseau : déterminée à partir de la période du signal fondamental.
- Déséquilibre de tension et de courant (VUR, AUR) : comparaison des amplitudes et des phases entre les trois phases, calcul de ratios de déséquilibre conformes aux normes de qualité de l'énergie.
- Transitoires (dips, swells, interruptions) : comparaison des valeurs instantanées de tension avec des seuils programmables, enregistrement des événements avec horodatage (creux, surtensions, coupures).

Ces paramètres sont stockés en mémoire et peuvent être visualisés sous forme de chronogrammes ou de tableaux.

Calcul de phase angle En plus de la puissance active, l'analyseur de puissance détermine le déphasage entre la tension et le courant (φ), ce qui permet de calculer le facteur de puissance et la puissance réactive.

Pour une phase donnée, l'analyseur dispose des signaux instantanés de tension $u(t)$ et de courant $i(t)$, déjà numérisés. Le déphasage φ peut être déterminé par :

Méthode basée sur la FFT (fréquence réelle) :

- L'analyseur calcule la transformée de Fourier rapide des signaux $u(t)$ et $i(t)$.
- Pour la composante fondamentale (fréquence f), l'analyseur obtient :
 - L'amplitude complexe de la tension : $U = U_1 \angle \theta_U$,
 - L'amplitude complexe du courant : $I = I_1 \angle \theta_I$.
- Le déphasage φ entre courant et tension est alors :

$$\varphi = \theta_I - \theta_U \quad (2.9)$$

Traitement, affichage et enregistrement Enfin, l'analyseur gère la visualisation et la conservation des données :

- Un processeur embarqué applique les algorithmes de calcul (puissance, THD, facteur de puissance, déséquilibre, etc.) en temps réel, et met à jour l'affichage continu sur l'écran LCD.
- Les valeurs peuvent être enregistrées à intervalles réguliers sur une carte SD ou en mémoire interne, avec horodatage, permettant un retour ultérieur pour l'analyse détaillée.
- Les données sont ensuite exportées (souvent au format CSV ou Excel) pour être traitées par un logiciel de post-traitement (MATLAB, etc.)

2.3 Présentation de l'analyseur de puissance LUTRON DW-6195

2.3.1 Caractéristiques techniques principales

Le LUTRON DW-6195 est un analyseur de puissance triphasé portable, conçu pour la mesure et l'enregistrement des grandeurs électriques dans les réseaux basse tension. Il est particulièrement adapté au diagnostic des moteurs asynchrones grâce à sa capacité à mesurer les harmoniques (jusqu'au 50ème ordre) et à enregistrer les formes d'onde sur carte SD.



FIGURE 2.1. Analyseur de puissance Lutron Model DW-6195

Les principales caractéristiques techniques sont regroupées dans le tableau suivant :

TABLE 2.1. Caractéristiques techniques du LUTRON DW-6195

Paramètre	Spécification
Écran	TFT LCD couleur (résolution 320×240 pixels)
Systèmes mesurables	1P/2W (monophasé 2 fils), 1P/3W (monophasé 3 fils), 3P/3W (triphasé 3 fils), 3P/4W (triphasé 4 fils)
Voies de mesure	3 tensions + 3 courants
Plages de tension	0 à 600 V RMS (CAT III)
Plages de courant	dépend des pinces CP-1201 : 200 A ou 1200 A (sélectionnable). Autres pinces optionnelles disponibles (20 A à 6000 A)
Impédance d'entrée tension	10 MΩ
Fréquence d'échantillonnage	réglable de 2 à 7200 secondes (en mode enregistrement)
Stockage	carte SD (FAT32), capacité 4 Go
Formats de fichiers	CSV
Alimentation	8 piles AA (1,5 V) ou adaptateur secteur 9 V DC
Norme de sécurité	IEC 1010, CAT III 600 V
Dimensions	225 x 125 x 64 mm
Poids	840 g (appareil seul)

L'appareil mesure en valeur efficace vraie (True RMS) les grandeurs suivantes :

- Tensions phase-phase et phase-neutre
- Courants par phase (phase-terre)
- Puissances active (kW), réactive (kVAR) et apparente (kVA) – par phase et système
- Énergies active (kWh), apparente (kVAh) et réactive (kVARh)
- Facteur de puissance (PF) et angle de phase
- Fréquence
- Harmoniques de tension et de courant (jusqu'au 50ème ordre) et taux de distortion harmonique total (THD)
- Rapport de déséquilibre des tensions (VUR) et des courants (AUR)
- Courant déséquilibré dans le neutre (An)
- Phase angle

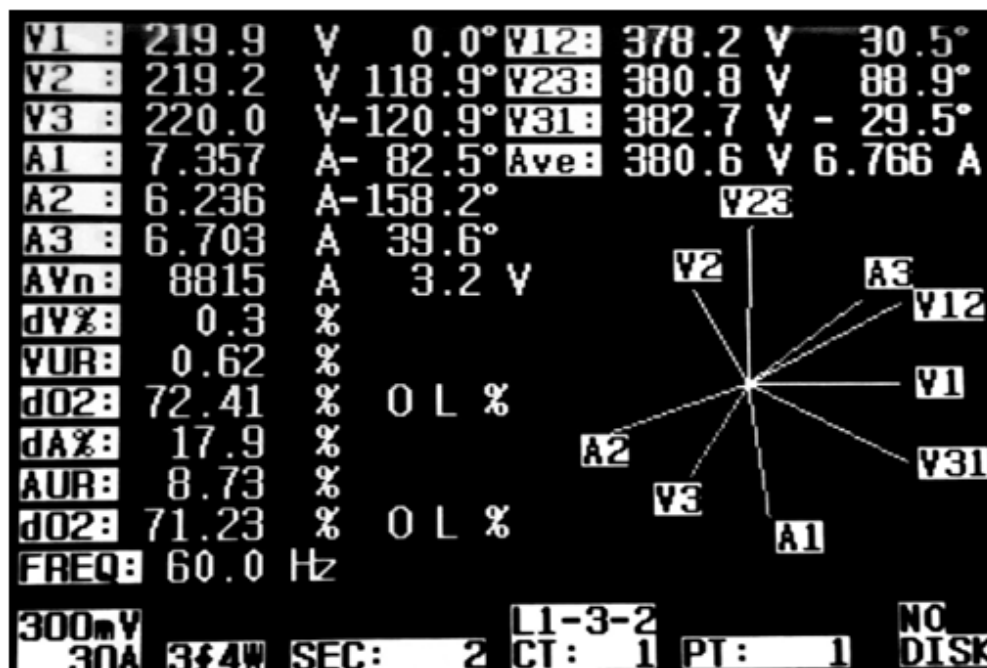


FIGURE 2.2. Capture des grandeurs mesurables

2.3.2 Configuration pour l'expérimentation

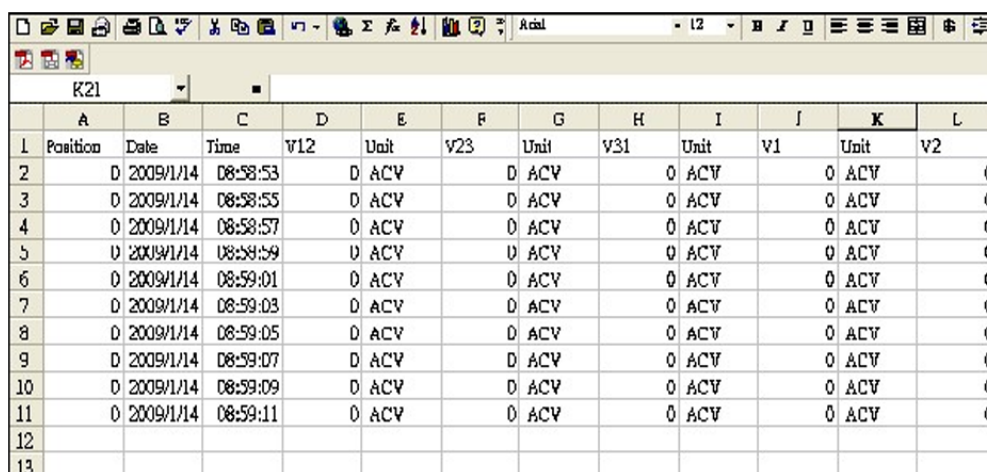
Pour les essais sur le moteur asynchrone, la configuration de l'analyseur suit les étapes suivantes :

1. Choix du système de mesure : selon le branchement du moteur (étoile ou triangle), l'utilisateur sélectionne le mode approprié (3P/4W ou 3P/3W) à l'aide de la touche 1 Φ 3 Φ .
2. Réglage du rapport de transformation des pinces : les pinces CP-1201 offrent deux calibres (200 A et 1200 A).
3. Paramétrage de l'enregistrement :
 - Temps d'échantillonnage (Sampling Time) : réglable de 2 à 7200 secondes. Pour l'analyse des régimes transitoires et harmoniques, un temps court (2 à 10 secondes) est recommandé.
 - Nom du dossier et du fichier : personnalisable via le menu Folder Name et File Name (de WTA01 à WTA10).
 - Rapport PT (Potential Transformer) : réglable de 1 à 1000 si des transformateurs de tension sont utilisés.
 - Rapport CT (Current Transformer) : réglable de 1 à 600 si des transformateurs de courant externes sont utilisés.

2.3.3 Acquisition des données et extraction

La procédure d'acquisition pour chaque essai (moteur sain ou avec défaut) est la suivante :

1. Raccordement : les pinces de courant CP-1201 sont placées sur les trois câbles d'alimentation (L1, L2, L3) en respectant le sens (flèche vers la charge). Les cordons de tension sont connectés entre phases et neutre (ou entre phases selon le schéma).
2. Démarrage de l'enregistrement : après validation de la configuration, l'appareil sauvegarde automatiquement les données sur la carte SD. Le fichier créé porte l'extension .XLS (format Excel compatible).
3. Extraction des fichiers : la carte SD est retirée et insérée dans un ordinateur. Les fichiers peuvent être ouverts directement dans un tableur (Excel) ou importés dans MATLAB/Python pour analyse



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Position	Date	Time	V12	Unit	V23	Unit	V31	Unit	V1	Unit	V2
2		0	2009/1/14	08:58:53	0	ACV	0	ACV	0	ACV	0	ACV
3		0	2009/1/14	08:58:55	0	ACV	0	ACV	0	ACV	0	ACV
4		0	2009/1/14	08:58:57	0	ACV	0	ACV	0	ACV	0	ACV
5		0	2009/1/14	08:58:59	0	ACV	0	ACV	0	ACV	0	ACV
6		0	2009/1/14	08:59:01	0	ACV	0	ACV	0	ACV	0	ACV
7		0	2009/1/14	08:59:03	0	ACV	0	ACV	0	ACV	0	ACV
8		0	2009/1/14	08:59:05	0	ACV	0	ACV	0	ACV	0	ACV
9		0	2009/1/14	08:59:07	0	ACV	0	ACV	0	ACV	0	ACV
10		0	2009/1/14	08:59:09	0	ACV	0	ACV	0	ACV	0	ACV
11		0	2009/1/14	08:59:11	0	ACV	0	ACV	0	ACV	0	ACV
12												
13												

FIGURE 2.3. Exemple d'extraction de fichier sur Excel data screen

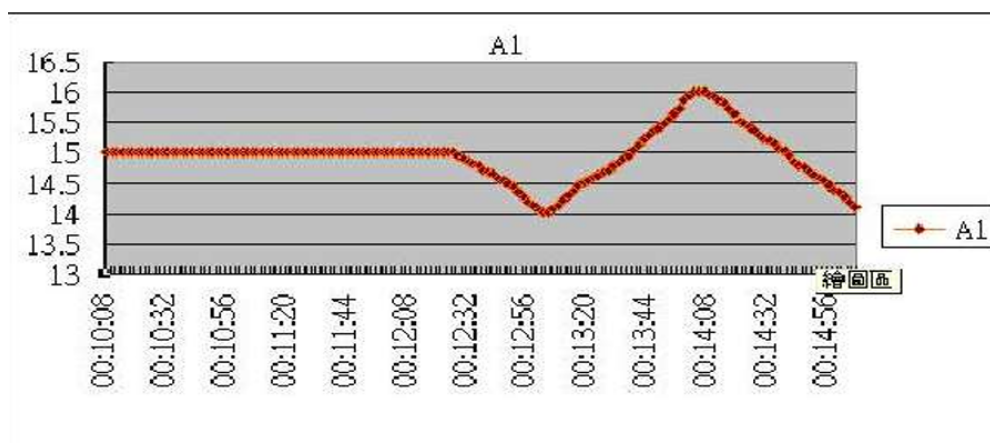


FIGURE 2.4. Exemple d'extraction de fichier sur Excel graphic screen

2.4 Intérêt dans le diagnostic des moteurs asynchrones

Le diagnostic des moteurs asynchrones par analyse des grandeurs électriques repose sur un principe fondamental : tout défaut, qu'il soit d'origine mécanique ou électrique, modifie le comportement des courants et des tensions de façon spécifique et identifiable. L'analyseur de puissance, en permettant un accès précis aux formes d'onde et aux grandeurs dérivées, apparaît comme un outil de premier plan pour la maintenance prédictive de ces machines [19, 7].

Deux avantages majeurs justifient son utilisation dans le cadre de cette étude.

Accès à la puissance instantanée La puissance électrique instantanée consommée par le moteur triphasé est définie par :

$$p(t) = v_a(t)i_a(t) + v_b(t)i_b(t) + v_c(t)i_c(t) \quad (2.10)$$

Contrairement à une simple analyse du courant de ligne, la puissance instantanée intègre simultanément les informations de tension et de courant. Elle reflète donc de manière synoptique les effets des déséquilibres, des harmoniques et des modulations induites par les défauts. L'analyse de cette grandeur permet ainsi de détecter des anomalies qui seraient masquées dans le courant seul [18].

Exploitation pour des traitements avancés du signal Les formes d'onde enregistrées par l'analyseur de puissance peuvent être soumises à des techniques de traitement du signal sophistiquées. Deux approches sont particulièrement pertinentes pour le diagnostic des moteurs asynchrones :

- Analyse spectrale (FFT) : La transformée de Fourier rapide (FFT) appliquée au signal de puissance instantanée ou aux courants transformés dans le repère de Park permet d'identifier des raies fréquentielles caractéristiques. Ainsi, un défaut rotorique (rupture de barres) se manifeste par des composantes spectrales à des fréquences

$$f = (1 \pm 2ks)f_s, \quad (2.11)$$

où f_s est la fréquence d'alimentation et s le glissement [5]. De même, les défauts statoriques (court-circuit entre spires) génèrent des harmoniques paires et une augmentation du taux de distorsion harmonique (THD) [6].

- Transformation de Park : Cette transformation mathématique convertit le système triphasé (abc) en un repère biphasé tournant (dq). Elle simplifie l'analyse des régimes transitoires et met en évidence des signatures de défauts difficilement observables dans le repère d'origine. Par exemple, une excentricité rotorique ou

un déséquilibre d'alimentation se traduit par l'apparition d'une composante oscillante à $2f_s$ dans les courants de Park [4]. Cette approche est particulièrement efficace pour distinguer les défauts mécaniques des défauts électriques.

Ainsi, l'analyseur de puissance ne se limite pas à un rôle de contrôle de la qualité de l'énergie ; il devient un véritable capteur de défauts pour les machines tournantes, à condition de savoir exploiter finement les signaux qu'il fournit. Les méthodes évoquées ci-dessus (puissance instantanée, FFT, transformation de Park)

2.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté l'analyseur de puissance, outil central de notre étude pour le diagnostic des moteurs asynchrones. Après avoir rappelé les grandeurs mesurables et l'intérêt de cet instrument pour la détection de défauts nous avons décrit le principe de mesure de la puissance électrique en triphasé. Le fonctionnement général de l'analyseur a été expliqué à travers ses trois étapes fondamentales. Enfin, nous avons détaillé les caractéristiques techniques et la configuration de l'appareil retenu, le LUTRON DW-6195.

Chapitre 3

RÉALISATION DU BANC D'ESSAI POUR LE DIAGNOSTIC DES DÉFAUTS DES MACHINES ASYNCHRONES

3.1 Introduction

L'identification des défauts dans les machines asynchrones représente un défi industriel de première importance. L'identification anticipée des anomalies comme le déséquilibre de charge, les défauts de bobinage et les défauts de roulements contribue à minimiser les interruptions imprévues, à prolonger la longévité des matériels et à améliorer la maintenance préventive. Dans cette section, nous exposons la conception, le dimensionnement et la mise en œuvre d'un banc d'essai spécifique dédié à l'analyse expérimentale du comportement d'un moteur triphasé asynchrone sous diverses conditions de charge. Ce dispositif offre la possibilité de générer intentionnellement un déséquilibre de charge entre les trois phases et une baisse de tension pour étudier son effet sur les paramètres électriques (puissance, courant, facteur de puissance, harmoniques, THD) à l'aide de l'analyseur de puissance Lutron DW-6195. L'approche adoptée repose sur :

- Une source d'alimentation triphasée réglable fournissant 380 V / 50 Hz.
- Un moteur asynchrone triphasé de 3,5 kW.
- Une génératrice synchrone de 2,4 kVA.
- Un tableau de charge résistive composé de 12 lampes de 200 W.
- L'analyseur de puissance Lutron DW-6195 pour l'acquisition des grandeurs électriques.

3.2 Objectifs du banc d'essai

Les objectifs principaux visés par ce banc d'essai sont :

- Reproduire en laboratoire des conditions d'exploitation normales et dégradées d'un moteur asynchrone triphasé.
- Créer un déséquilibre de charge contrôlé entre les phases en agissant sur le tableau de charge résistive.
- Mesurer et enregistrer les puissances actives, réactives et apparentes sur chaque phase à l'aide de l'analyseur Lutron DW-6195.
- Analyser l'influence du déséquilibre de charge sur le courant de ligne, le facteur de puissance et les harmoniques.

3.3 Description du Montage Expérimental

3.3.1 Vue d'ensemble

Le banc d'essai est constitué de trois blocs fonctionnels interconnectés, comme le montre la figure (3.1).

L'analyseur de puissance est connecté entre la source d'alimentation et le moteur afin de mesurer en temps réel les paramètres électriques.

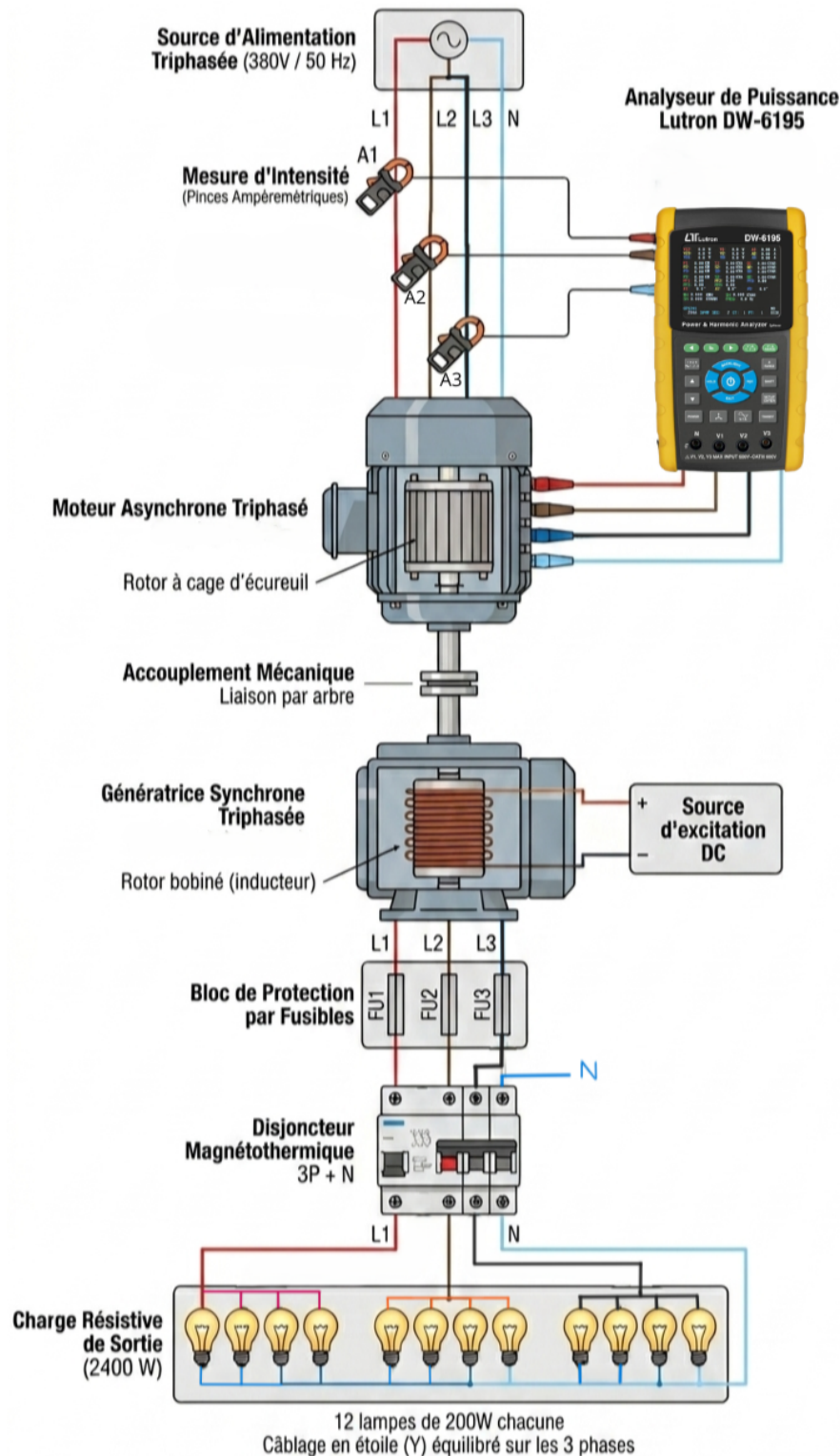


FIGURE 3.1. Schéma de banc d'essai

3.3.2 Bloc 1 : Source d'Alimentation

La source d'alimentation De Lorenzo est un banc pédagogique permettant de délivrer une tension triphasée réglable. Pour nos essais, elle est configurée comme suit :

TABLE 3.1. caractéristique de la source d'alimentation

Paramètre	Valeur
Type de réseau	Triphasé + Neutre
Tension de ligne	380 V
Tension de phase	220 V
Fréquence	50 Hz
Couplage	3L + N

3.3.3 Bloc 2 : Moteur asynchrone triphasé

Le moteur utilisé est un moteur asynchrone triphasé à cage d'écreuil dont les caractéristiques de la plaque signalétique sont les suivantes :

TABLE 3.2. caractéristique du moteur asynchrone

Paramètre	Valeur
Puissance nominale	3,5 kW
Tension d'alimentation	220 V (Δ) / 380 V (Y)
Courant nominal	13,8 A (Δ) / 8,0 A (Y)
Vitesse nominale	1420 tr/min
Facteur de puissance $\cos \varphi$	0,8
Fréquence	50 Hz
Couplage choisi	Étoile (Y)
Indice de protection	IP 54

3.3.4 Bloc 3 : Génératrice Synchrone

La génératrice synchrone est accouplée mécaniquement avec le moteur asynchrone et constitue la charge du moteur. Ses caractéristiques sont :

TABLE 3.3. Caractéristiques de la génératrice synchrone

Paramètre	Valeur
Puissance apparente nominale	2,4 kVA
Tension de sortie	220 V (Δ) / 380 V (Y)
Courant nominal	6,3 A (Δ) / 3,65 A (Y)
Vitesse nominale	1500 tr/min
Facteur de puissance	1 ($\cos \varphi = 1$)
Fréquence	50 Hz
Tension d'excitation	110 V DC
Courant d'excitation	0,8 A DC
Indice de protection	IP 44

Le circuit d'excitation est alimenté par une source DC externe. Le courant d'excitation est réglé entre 0,6 et 0,8 A pour un flux nominal, ce qui permet de contrôler la puissance électrique délivrée à la charge résistive et donc le couple de charge appliqué au moteur asynchrone.

3.3.5 Instruments de mesure auxiliaires

En complément de l'analyseur Lutron DW-6195, plusieurs instruments de mesure conventionnels sont utilisés pour surveiller et régler les grandeurs du banc en temps réel :

TABLE 3.4. Instruments de mesure auxiliaires

Instrument	Grandeur mesurée	Emplacement
Voltmètre AC	Tension d'alimentation triphasée	Bornes de sortie de la source De Lorenzo
Voltmètre DC	Tension d'excitation de la génératrice	Bornes du circuit d'excitation DC (110 V)
Ampèremètre DC	Courant d'excitation de la génératrice	Circuit d'excitation DC (0,6 à 0,8 A)
Ampèremètre AC	Courant de phase de la charge résistive	Phase de la charge
Tachymètre optique	Vitesse de rotation du moteur	Pointé sur l'arbre du moteur (ou de la génératrice)

3.3.6 Bloc 4 : Tableau de Charge Résistive

Le tableau de charge résistive est l'élément central permettant de simuler les déséquilibres de phases. Sa description détaillée et son dimensionnement font l'objet de la section 3.4.



FIGURE 3.2. Tableau de Charge Résistive

3.3.7 Bloc 5 : Analyseur de Puissance Lutron DW-6195

L'analyseur de puissance Lutron DW-6195 est placé entre la source d'alimentation et le moteur asynchrone. Le raccordement est le suivant :

- Pinces ampèremétriques A1, A2, A3 : clampées sur les câbles des phases L1, L2, L3 entre la source et le moteur.
- Sondes de tension V1, V2, V3, N : raccordées directement sur la plaque à bornes du moteur (phases R, S, T et neutre).

Cet emplacement permet de mesurer les puissances, les courants et les tensions directement aux bornes du moteur, en incluant les pertes dans les câbles d'alimentation.

3.4 Dimensionnement du Tableau de Charge Résistive

3.4.1 Conception du Tableau

Le tableau de charge résistive est conçu pour alimenter une charge purement résistive triphasée à partir des sorties de la génératrice synchrone. Il est constitué des éléments suivants :

- 3 porte-fusibles (un par phase) : protection individuelle de chaque phase.
- 1 disjoncteur tétrapolaire 4P de calibre C16 (courbe C, 16 A) : protection générale de l'ensemble du tableau.
- 4 lampes incandescentes de 200 W par phase $\times$ 3 phases = 12 lampes au total.
- 2 interrupteurs doubles par phase $\times$ 3 phases : permettant de commander les groupes de lampes.

- Chaque phase comporte 4 lampes de 200 W commandées par 2 interrupteurs doubles

3.4.2 Calcul de la puissance totale de la charge

La charge est dimensionnée pour correspondre à la puissance active maximale délivrable par la génératrice synchrone.

Données de la génératrice :

- Puissance apparente nominale : $S = 2,4 \text{ kVA}$
- Facteur de puissance : $\cos \varphi = 1$
- Puissance active maximale : $P_G = S \times \cos \varphi = 2400 \times 1 = 2400 \text{ W}$
- Puissance de charge par phase (charge maximale) :

$$P_{\text{phase}} = 4 \text{ lampes} \times 200 \text{ W} = 800 \text{ W} \quad (3.1)$$

- Puissance totale triphasée (charge équilibrée maximale) :

$$P_{\text{totale}} = 3 \times 800 \text{ W} = 2400 \text{ W} = 2,4 \text{ kW} \quad (3.2)$$

La puissance de la charge est donc parfaitement adaptée à la puissance nominale de la génératrice (2,4 kVA).

3.4.3 Calcul des courants et tensions

La charge est branchée sur les sorties en triangle de la génératrice. Le neutre provient de la source De Lorenzo.

- Tension de phase de la génératrice (côté charge) :

$$U_{\text{phase}} = U_{\text{ligne}}/\sqrt{3} = 380/\sqrt{3} \approx 220 \text{ V} \quad (3.3)$$

- Courant par phase à pleine charge (800 W par phase) :

$$I_{\text{phase}} = P_{\text{phase}}/U_{\text{phase}} = 800/220 \approx 3,64 \text{ A} \quad (3.4)$$

- Courant total maximal (3 phases, charge équilibrée) :

$$I_{\text{total}} = 3 \times 3,64 = 10,92 \text{ A} \quad (3.5)$$

- Puissance réactive : $Q = 0 \text{ VAR}$ (charge purement résistive, $\cos \varphi = 1$)
- Puissance apparente : $S = P = 2400 \text{ VA}$

3.4.4 Dimensionnement des fusibles

Les fusibles sont placés en tête de chaque phase afin de protéger les câbles et les lampes contre les surintensités et les courts-circuits.

- Courant nominal par phase : $I_N = 3,64 \text{ A}$
- Coefficient de sécurité recommandé : $k = 1,25 \text{ à } 1,5$ (NF C 15-100 [17])
- Courant nominal du fusible : $I_f \geq 1,25 \times I_N = 1,25 \times 3,64 = 4,55 \text{ A}$

Fusible choisi : 6 A gG (usage général) — valeur normalisée immédiatement supérieure.

TABLE 3.5. Dimensionnement des fusibles

Paramètre	Calcul	Valeur choisie
Courant nominal de charge/phase	$P/U = 800/220$	3,64 A
Courant mini fusible ($\times 1,25$)	$1,25 \times 3,64$	4,55 A
Calibre fusible normalisé	Valeur sup. normalisée	6 A gG

3.4.5 Dimensionnement du Disjoncteur Général 4P

Le disjoncteur tétrapolaire (4P) protège l'ensemble du tableau de charge. Il doit supporter le courant total maximal du tableau (les 3 phases + neutre) et assurer la coupure en cas de surintensité ou de court-circuit.

Courant total maximal : $I_{\text{tot}} = 3 \times 3,64 = 10,92 \text{ A}$ Courant nominal disjoncteur : $I_n \geq I_{\text{tot}} = 10,92 \text{ A}$

Disjoncteur choisi : C16 — 4P (courbe C, 16 A)

TABLE 3.6. Dimensionnement du disjoncteur général

Paramètre	Calcul	Valeur choisie
Courant total max (3 phases)	$3 \times 3,64 \text{ A}$	10,92 A
Calibre normalisé retenu	Valeur sup. normalisée	16 A
Nombre de pôles	3 phases + neutre	4P (tétrapolaire)
Courbe de déclenchement	Charge résistive (courant d'appel lampes)	Courbe C
Pouvoir de coupure min.	Réseau BT 380 V	6 kA (Icn)

Choix de la courbe C : La courbe C (déclenchement magnétique entre $5 \times I_n$ et $10 \times I_n$) est retenu car les lampes incandescentes présentent un courant d'appel à froid pouvant atteindre 5 à 6 fois le courant nominal pendant quelques millisecondes. La courbe B ($3 \times I_n$ à $5 \times I_n$) risquerait de provoquer des déclenchements intempestifs à la mise sous tension.

3.4.6 Dimensionnement des câbles du tableau de charge

Le dimensionnement des câbles internes au tableau de charge est effectué selon deux critères : la capacité thermique (courant admissible) et la chute de tension acceptable ($\leq 3\%$ selon NF C 15-100 [17]).

Critère thermique Courant de calcul par phase : $I_B = 3,64$ A Section retenue : $2,5 \text{ mm}^2$ rigide (H07V-U). Ce choix offre une marge de sécurité confortable et est la section standard pour les circuits terminaux de puissance dans les tableaux électriques.

Critère chute de tension Longueur estimée des câbles internes au tableau : $L \approx 3$ m. Résistivité du cuivre : $\rho = 0,0225 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$

Résistance d'un conducteur aller-retour :

$$R = \rho \times 2L/S = 0,0225 \times (2 \times 3)/2,5 = 0,054\Omega \quad (3.6)$$

Chute de tension maximale :

$$\Delta U = R \times I = 0,054 \times 3,64 = 0,20V \quad (3.7)$$

Pourcentage de chute de tension :

$$\Delta U\% = (0,20/220) \times 100 \approx 0,09\% \ll 3\% \quad (3.8)$$

La chute de tension est largement inférieure à la limite de 3%. La section de $2,5 \text{ mm}^2$ rigide est pleinement validée.

3.4.7 Récapitulatif du dimensionnement

TABLE 3.7. Récapitulatif du dimensionnement

Élément	Paramètre dimensionné	Valeur choisie
Charge résistive	Puissance totale max	$12 \times 200 \text{ W} = 2400 \text{ W}$
Charge / phase	Puissance max/phase	$4 \times 200 \text{ W} = 800 \text{ W}$
Courant / phase	$I = P/U$	3,64 A
Fusibles par phase	$1,25 \times I_{ph}$	6 A gG cylindrique
Disjoncteur général	I_{tot} 3 phases	C16 $\rightarrow$ 4P courbe C
Câble interne tableau	Critère thermique + $\Delta U\%$	H07V-U $2,5 \text{ mm}^2$ rigide

3.5 Procédure expérimentale

3.5.1 Préparation du Banc

Avant toute mise sous tension, les étapes suivantes sont respectées :

- Vérifier visuellement l'état des câbles, des fusibles et du disjoncteur.
- S'assurer que toutes les lampes sont correctement vissées dans leurs douilles.
- Ouvrir tous les interrupteurs du tableau de charge (charge déconnectée initialement).
- Positionner les pinces ampèremétriques A1, A2, A3 sur les phases L1, L2, L3 respectivement.
- Raccorder les sondes de tension V1, V2, V3 et N sur la plaque à bornes du moteur.
- Vérifier le couplage étoile (Y) du moteur sur la plaque à bornes.

3.5.2 Mise en marche

- Mettre en marche la source De Lorenzo progressivement et régler à 380 V triphase.
- Démarrer le moteur asynchrone : il entraîne la génératrice synchrone.
- Fermer le disjoncteur général du tableau.
- Alimenter progressivement le circuit d'excitation de la génératrice (source DC) et ajuster le courant d'excitation à 0,6–0,8 A / 110 V.



FIGURE 3.3. Photo du banc d'essai

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en détail la conception et la réalisation du banc d'essai dédié au diagnostic des défauts du moteur asynchrone par analyse de puissance. Le dimensionnement rigoureux du tableau de charge résistive a montré que :

- La puissance totale de la charge (2400 W) est parfaitement adaptée à la puissance nominale de la génératrice synchrone (2,4 kVA).
- Les fusibles de 6 A gG par phase assurent une protection individuelle adéquate.
- Le disjoncteur C16 tétrapolaire protège l'ensemble de l'installation avec une marge de sécurité suffisante, et la courbe C est adaptée au courant d'appel des lampes incandescentes.
- Les câbles internes au tableau (section 2,5 mm² rigide H07V-U) respectent les critères thermiques avec une chute de tension de seulement 0,09%, bien inférieure à la limite de 3%.

Ce banc d'essai offre une grande flexibilité dans la création de scénarios de déséquilibre contrôlés, ce qui permettra, dans le chapitre suivant, d'analyser en détail les signatures électriques mesurées par l'analyseur Lutron DW-6195 et d'établir une corrélation entre le déséquilibre de charge et les indicateurs mesurés.

Chapitre 4

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

4.1 Introduction

Ce chapitre présente l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus lors des essais réalisés sur le banc d'essai. L'objectif est d'analyser et d'interpréter les grandeurs électriques mesurées par l'analyseur de puissance Lutron DW-6195 dans différentes conditions de fonctionnement du moteur asynchrone triphasé. Les essais sont organisés en deux parties : la première traite du fonctionnement normal (marche à vide et en charge équilibrée), servant de référence de base pour le diagnostic. La deuxième partie porte sur les conditions dégradées simulant des défauts d'alimentation : chute de tension et déséquilibre des phases.

4.2 Partie 1 : Fonctionnement normal — Essais de référence

4.2.1 Introduction

Avant d'analyser les conditions défaillantes, il est indispensable d'établir une référence du comportement électrique du moteur dans ses conditions normales de fonctionnement. Deux essais de référence ont été réalisés : un essai à vide (sans charge sur la génératrice) et un essai en charge nominale (12 lampes de 200 W, soit 2400 W totaux). Ces mesures serviront de base de comparaison pour identifier les signatures caractéristiques des défauts dans la deuxième partie.

4.2.2 Essai 1 : Marche à vide

4.2.2.1 Conditions de l'essai

Le moteur asynchrone est alimenté sous 380 V / 50 Hz et entraîne la génératrice synchrone sans charge. Le tableau de charge résistive est entièrement déconnecté. Le courant d'excitation de la génératrice est maintenu à 0.6–0.8 A sous 110 V DC.

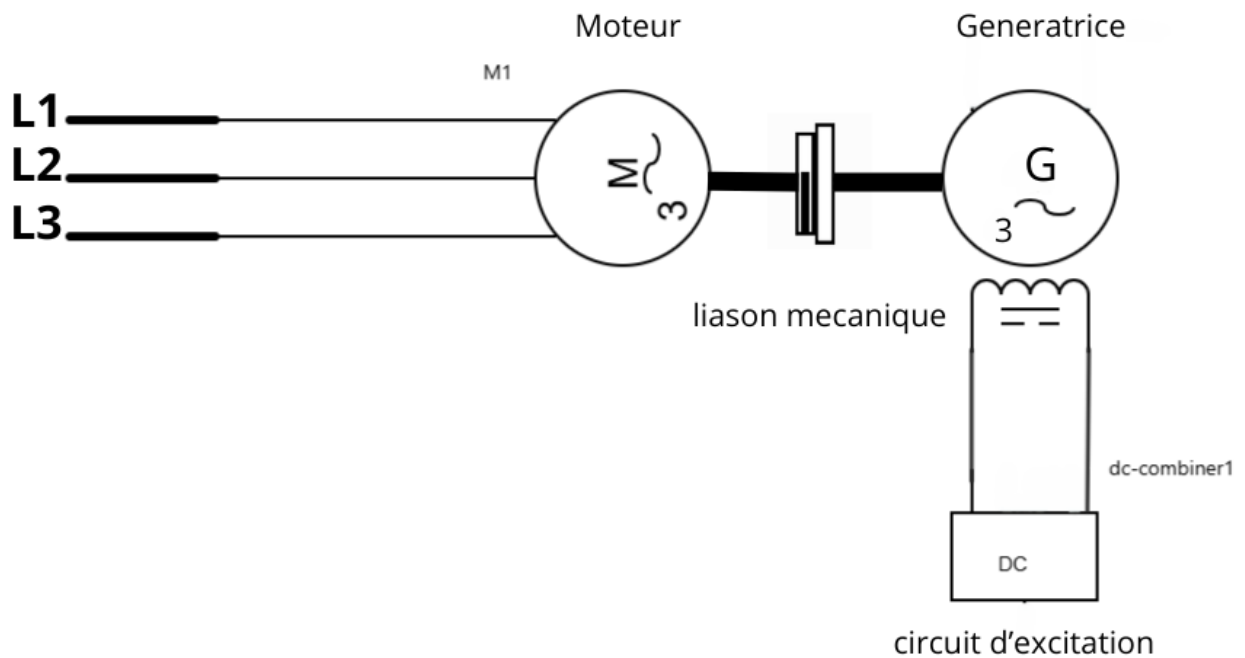


FIGURE 4.1. Schéma unifilaire du banc d'essai (essai à vide)

4.2.2.2 Résultats de mesure

L'analyseur de puissance Lutron DW 6195 peut être utilisé selon deux méthodes d'acquisition des données. La première méthode, dite « lecture directe », repose sur l'affichage en temps réel des grandeurs électriques (tension, courant, puissance, facteur de puissance, fréquence, etc.) sur l'écran LCD de l'appareil ; on relève manuellement les valeurs instantanées. Cette approche, simple et rapide, ne nécessite aucun matériel supplémentaire mais elle ne permet pas un suivi temporel ni un traitement approfondi des données. La seconde méthode, plus élaborée, exploite la fonction d'enregistrement sur carte SD. Les mesures sont alors sauvegardées de façon continue sous forme de fichiers XLS, puis transférées vers un ordinateur pour une analyse différée à l'aide de logiciels tels qu'Excel ou Python. Ce mode offre un historique complet des grandeurs mesurées et autorise des traitements statistiques, graphiques et une interprétation plus fine des évolutions temporelles, au prix d'une étape de post traitement. Les deux figures présentes les grandeurs électriques mesurées par l'analyseur Lutron DW-6195 lors de la marche à vide :



FIGURE 4.2. Résultats de mesure : Essai 1 — Marche à vide (afficheur de l'analyseur)

essai1 avide • Saved to this PC															
File Home Insert Draw Page Layout Formulas Data Review View Automate Help															
A1 : X ✓ fx Position															
	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O		
1	Time	V12	V23	V31	V1	V2	V3	A1	A2	A3	P1	P2	P3		
2	Time	V12	V23	V31	V1	V2	V3	A1	A2	A3	P1	P2	P3		
3	13:00:06	383	381.6	380.7	221.1	221	219.1	4.347	3.607	3.907	-0.052	-0.109	-0.045		
4	13:00:26	383.7	382	381.2	221.3	221.3	219.5	4.345	3.629	3.924	-0.049	-0.105	-0.052		
5	13:00:46	383.4	382.2	381.9	221.4	221.2	219.8	4.337	3.599	3.981	-0.061	-0.1	-0.048		
6	13:01:06	382.9	381.9	381	221.2	220.9	219.3	4.376	3.573	3.955	-0.059	-0.106	-0.044		
7	Time	V12	V23	V31	V1	V2	V3	A1	A2	A3	P1	P2	P3		
8	13:08:50	379.6	376.7	377.3	219.4	218.4	216.7	5.705	4.929	5.319	-0.801	-0.746	-0.77		
9	13:09:10	380.6	377.6	377.4	219.4	218.5	216.8	5.716	4.917	5.299	-0.799	-0.745	-0.767		
10	13:09:30	378.9	377.5	376.8	218.9	218.6	216.8	5.6	4.889	5.285	-0.775	-0.731	-0.765		
11	13:09:50	379	376.8	376.6	218.9	218.5	216.8	5.59	4.871	5.261	-0.773	-0.725	-0.761		
12	13:10:10	379.8	377.7	377.3	219.2	218.8	217	5.592	4.887	5.279	-0.77	-0.728	-0.764		
13	13:10:30	379.9	377.6	377.3	219.2	218.8	216.8	5.569	4.857	5.236	-0.767	-0.725	-0.754		
14															
15		S1	S2	S3	Q1	Q2	Q3	PF1	PF2	PF3	PFH	FREQ			
16		S1	S2	S3	Q1	Q2	Q3	PF1	PF2	PF3	PFH	FREQ			
17		-0.962	-0.799	-0.857	0.961	0.79	0.856	-0.05	-0.14	-0.06	0.05	50			
18		-0.963	-0.804	-0.863	0.961	0.797	0.861	-0.05	-0.13	-0.06	0.06	50			
19		-0.962	-0.797	-0.876	0.96	0.79	0.875	-0.06	-0.13	-0.06	0.06	50			
20		-0.969	-0.79	-0.869	0.968	0.782	0.867	-0.06	-0.14	-0.05	0.06	50			
21		S1	S2	S3	Q1	Q2	Q3	PF1	PF2	PF3	PFH	FREQ			
22		-1.253	-1.079	-1.154	0.962	0.775	0.858	-0.64	-0.69	-0.67	0.54	49.9			
23		-1.256	-1.077	-1.151	0.968	0.775	0.856	-0.64	-0.69	-0.67	0.56	50			
24		-1.228	-1.07	-1.148	0.951	0.78	0.854	-0.63	-0.68	-0.67	0.57	50			
25		-1.226	-1.066	-1.142	0.95	0.78	0.851	-0.63	-0.68	-0.67	0.58	50			
26		-1.228	-1.071	-1.148	0.955	0.784	0.854	-0.63	-0.68	-0.67	0.59	50			
27		-1.223	-1.065	-1.137	0.951	0.777	0.849	-0.63	-0.68	-0.66	0.6	50			

FIGURE 4.3. Résultats de mesure : Essai 1 — Marche à vide (EXCEL)

Les valeurs négatives de puissance active sont dues à l'orientation des pinces ampèremétriques lors du câblage. La puissance active réellement absorbée est —PT— = 0.211 kW.

4.2.2.3 Calcul du glissement à vide

La vitesse de synchronisme (moteur à 2 paires de pôles, $f = 50$ Hz) est :

$$n_s = 60 \times f/p = 60 \times 50/2 = 1500 \text{ tr/min} \quad (4.1)$$

Le glissement à vide est donc :

$$g_0 = (n_s - n)/n_s \times 100 = (1500 - 1478)/1500 \times 100 = 1.47\% \quad (4.2)$$

4.2.2.4 Interprétation des résultats

Les résultats de l'essai à vide révèlent plusieurs caractéristiques fondamentales :

a) Courant magnétisant et facteur de puissance : Les courants mesurés (3.6 à 4.4 A) représentent environ 50 % du courant nominal (8 A en couplage étoile). À vide, le courant absorbé est quasi exclusivement magnétisant (composante réactive), ce qui explique les angles de déphasage proches de 90° et un facteur de puissance global très faible ($\cos \varphi \approx 0.08$). Cette valeur est typique et attendue pour un moteur asynchrone non chargé.

b) Puissance active absorbée : La puissance active totale mesurée —PT— = 0.211 kW correspond uniquement aux pertes mécaniques (frottements, ventilation) et aux pertes fer dans le stator. En l'absence de charge, aucune puissance mécanique utile n'est transmise à l'arbre.

c) Faible glissement à vide ($g_0 = 1.47\%$) : La vitesse de rotation (1478 tr/min) est proche de la vitesse de synchronisme (1500 tr/min), confirmant l'absence de couple résistant significatif sur l'arbre.

d) THD courant moyen de 9.1 % : Ce taux de distorsion harmonique, plus élevé à vide qu'en charge, s'explique par la saturation relative du noyau magnétique, qui introduit des harmoniques dans le courant magnétisant.

e) Déséquilibre de courant (AUR = 9.56 %) : Ce déséquilibre résulte des légères dissymétries intrinsèques des enroulements statoriques. Il constitue la signature de référence du moteur à comparer aux essais en conditions dégradées.

4.2.3 Essai 2 : Marche en charge nominale (100%)

4.2.3.1 Conditions de l'essai

Le moteur asynchrone est alimenté sous 380 V / 50 Hz et entraîne la génératrice synchrone en charge. Le tableau de charge résistive est entièrement connecté : 4 lampes $\times$ 200 W $\times$ 3 phases = 2400 W. La charge est purement résistive et équilibrée ($\cos \varphi_{\text{charge}} = 1$). Le courant d'excitation de la génératrice est réglé à 0.6–0.8 A / 110 V DC.

Cette valeur est cohérente avec les caractéristiques du moteur. Un glissement entre 3 et 6 % est typique d'un moteur asynchrone à cage en charge nominale.

4.2.3.4 Interprétation des résultats

Le passage à la charge nominale provoque des modifications significatives et attendues sur toutes les grandeurs mesurées :

a) Augmentation du courant absorbé : Le courant moyen passe de 3.976 A (à vide) à 5.545 A (charge 100%), soit une augmentation de 39.5 %. Cette hausse reflète l'absorption d'une puissance mécanique supplémentaire nécessaire pour vaincre le couple résistant de la génératrice chargée. La valeur mesurée reste inférieure au courant nominal (8 A), confirmant que le moteur fonctionne dans sa plage admissible.

b) Amélioration significative du facteur de puissance : Le $\cos\varphi$ passe de 0.08 (à vide) à 0.69 (en charge). Sous charge, la composante active du courant augmente fortement, réduisant le déphasage entre la tension et le courant. La valeur reste inférieure au $\cos\varphi$ nominal (0.80), ce qui s'explique par une charge encore partielle par rapport à la puissance nominale du moteur (3.5 kW).

c) Augmentation du glissement : Le glissement passe de 1.47 % (à vide) à 4.40 % (en charge), entraînant une chute de vitesse de 1478 à 1434 tr/min. C'est le comportement caractéristique du moteur asynchrone : plus le couple résistant augmente, plus le glissement augmente et la vitesse diminue.

d) Puissance active absorbée cohérente : La puissance active totale mesurée —PT— = 2.508 kW pour une charge de 2400 W. La différence (≈ 108 W) correspond aux pertes moteur et câbles, ce qui est physiquement cohérent.

e) Réduction du THD courant (6.7 %) : Sous charge, la composante fondamentale du courant augmente, réduisant le poids relatif des harmoniques. Le THD tension reste stable (≈ 6 %).

f) Déséquilibre de courant ($dA\% = 15.7$ %) : Bien que la charge soit équilibrée, le déséquilibre de courant est plus élevé qu'à vide (9.56 %). Cela résulte des dissymétries des enroulements statoriques dont l'effet devient plus prononcé lorsque le courant augmente. Ce niveau reste dans les limites acceptables selon la norme EN 50160 [15].

4.2.4 Essai 3 : Charge partielle 50% (100%)

4.2.4.1 Conditions de l'essai

Le moteur asynchrone est alimenté sous 380 V / 50 Hz et entraîne la génératrice synchrone en charge. Le tableau de charge résistive est réduit à 2 lampes $\times 200$ W $\times 3$ phases = 1 200 W. Le courant d'excitation de la génératrice est réglé à 0.6 A sous 93 V DC.

4.2.4.2 Résultats de mesure



FIGURE 4.6. Résultats de mesure : Essai 2 — Charge nominale 50%

4.2.4.3 Calcul du glissement en charge

Le glissement en charge nominale est :

$$g = (ns - n)/ns \times 100 = (1500 - 1440)/1500 \times 100 = 4.00\% \quad (4.4)$$

Le glissement mesuré (4.00%), très proche de celui de l'Essai 2 (4.40%)

4.2.4.4 Interprétation des résultats

Cet essai confirme un fonctionnement parfaitement sain, mais révèle une particularité expérimentale notable :

a) Conformité normative des indicateurs de déséquilibre : Le déséquilibre de tension ($dV\% = 1.5\%$) et le déséquilibre de courant ($AUR = 5.46\%$) respectent tous deux les seuils normatifs (EN 50160 et NEMA MG1 respectivement), confirmant l'absence de tout défaut d'alimentation.

b) Très faible distorsion harmonique : Le THD de courant moyen (3.0%) est particulièrement faible — inférieur même à celui de l'Essai 2 à pleine charge — signature d'une onde de courant de très bonne qualité.

c) Courants supérieurs aux attentes pour une charge à 50% : Les courants mesurés (5.6 à 6.2 A, moyenne 5.972 A) dépassent ceux de l'Essai 2 en charge nominale théorique 100% (5.545 A). Cette particularité s'explique par la différence de réglage de l'excitation de la génératrice entre les deux essais (0.6 A / 93 V ici, contre 0.8 A / 106 V à l'Essai 2).

d) Glissement confirmant un couple réel proche du nominal : Le glissement mesuré (4.00 %), très proche de celui de l'Essai 2 (4.40%), confirme que le couple de charge mécanique réellement transmis au moteur dans cet essai est proche de la charge nominale, en dépit d'une charge résistive nominale réduite de moitié.

e) Recommandation méthodologique : Cette observation souligne l'importance du contrôle rigoureux de l'excitation de la génératrice pour garantir une charge mécanique reproductible entre essais.

4.3 Partie 2 : Fonctionnement en conditions dégradées

4.3.1 Introduction

La première partie de ce chapitre a établi les signatures électriques de référence du moteur asynchrone en fonctionnement normal. Cette deuxième partie aborde les conditions dégradées simulées en laboratoire, qui reproduisent deux familles de défauts d'alimentation fréquemment rencontrés dans l'environnement industriel : la chute de tension monophasée (Essais 3 et 4) et le déséquilibre des phases (Essais 5 et 6). Les défauts d'alimentation constituent une cause majeure de dégradation prématurée des moteurs asynchrones. Selon la norme NEMA MG1 [14], un déséquilibre de tension de seulement 3.5 % peut réduire la durée de vie des enroulements statoriques de 50 %, en raison de l'échauffement différentiel qu'il provoque entre les phases. La norme européenne EN 50160 [15] fixe quant à elle la limite admissible du déséquilibre de tension à 2 % sur les réseaux de distribution publique. La détection précoce de ces défauts par analyse des grandeurs de puissance — tensions, courants, facteurs de puissance et indicateurs de déséquilibre — est l'objectif central de ce travail. L'analyseur de puissance Lutron DW-6195 constitue l'outil de mesure privilégié pour cette approche de diagnostic non-intrusif, réalisé en fonctionnement normal sans arrêt du moteur.

4.3.2 Principe physique du défaut simulé

Le défaut de chute de tension est simulé par l'insertion d'un rhéostat de résistance en série sur la phase L2, entre la source d'alimentation et les bornes du moteur. Ce montage crée une chute de tension résistive $\Delta V_2 = R \times I_2$ proportionnelle au courant circulant dans cette phase. La tension effective aux bornes du moteur sur L2 est donc :

$$V_{2 \text{ moteur}} = V_{2 \text{ source}} - R \times I_2 \quad (4.5)$$

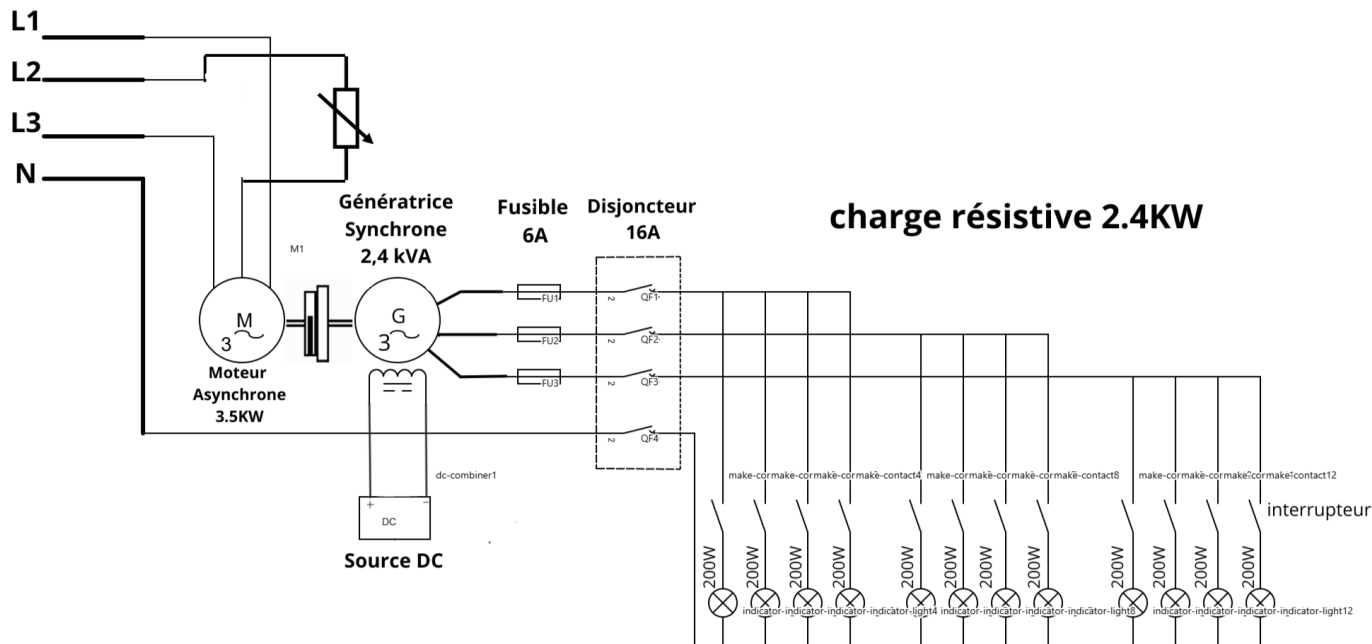


FIGURE 4.7. Schéma de banc d'essai (essai chute de tension)

4.3.3 Essai 4 : Chute de tension sur L2 — A vide

4.3.3.1 Conditions expérimentales

Le rhéostat de 30Ω est inséré sur la phase L2. La génératrice n'est pas chargée. Le courant d'excitation de la génératrice est maintenu entre 0.6 et 0.6 A sous 95 V DC. La vitesse de rotation est mesurée au tachymètre optique : $n = 1485 \text{ tr/min}$.

4.3.3.2 Résultats de mesure

TABLE 4.1. Résultats de mesure : Essai 3 — Chute de tension L2 a vide

Grandeur mesurée	Phase L1	Phase L2 (af- fectée)	Phase L3
Tension de phase (V)	210.0	209.1	222.4
Tension de ligne V12/V23/V31 (V)	354.9	377.5	378.3
Courant de ligne I (A)	4.157	2.706	5.400
Puissance active —P— (kW)	0.234	0.206	0.265
Puissance réactive Q (kVAR)	0.841	0.527	1.172
Puissance apparente S (kVA)	0.874	0.567	1.203
Facteur de puissance —cosφ—	0.27	0.36	0.22
Angle de déphasage φ (°)	74.4	111.1	0.22
THD courant (%)	5.4	6.4	4.4
THD tension (%)	4.9	4.8	4.6
Puissance active totale —PT— (kW)		0.705	
Puissance apparente totale ST (kVA)		2.639	
Facteur de puissance global —PFZ—		0.705	
Déséquilibre de tension dV% (%)		6.2 Δ (limite : 2 %)	
Déséquilibre de courant AUR (%)		33 Δ (limite : 10 %)	
Courant de neutre AVn (A)		0.111 Δ	
Fréquence (Hz)		50.0	
Vitesse de rotation mesurée (tr/min)		1485	

4.3.3.3 Calcul du glissement

La vitesse mesurée est $n = 1485$ tr/min pour une vitesse de synchronisme $n_s = 1500$ tr/min. Le glissement est :

$$g_3 = (n_s - n)/n_s \times 100 = (1500 - 1485)/1500 \times 100 = 1\% \quad (4.6)$$

Faible glissement à vide ($g_0 = 1\%$) : La vitesse de rotation (1485 tr/min) est proche de la vitesse de synchronisme (1500 tr/min), confirmant l'absence de couple

résistant significatif sur l'arbre.

4.3.3.4 Analyse et interprétation des résultats

L'introduction du défaut de chute de tension, même en l'absence de charge mécanique, révèle des signatures électriques significatives :

a) Déséquilibre de tension sévère dès la mise sous tension : Le déséquilibre de tension atteint $dV\% = 6.2\%$, soit plus de sept fois la valeur mesurée en régime sain équivalent (E1 : 0.8%) et plus de trois fois la limite normative EN 50160 (2%). Ce résultat démontre que le défaut est détectable indépendamment de toute charge mécanique.

b) Déséquilibre de courant largement hors normes : L'AUR = 33.00% dépasse très largement la limite NEMA MG1 (10%) et la valeur de référence saine (E1 : 9.56%).

c) Redistribution paradoxale des courants : La phase L2, directement affectée par le rhéostat, présente le courant le plus faible (2.706 A), tandis que la phase opposée L3 atteint 5.400 A — signature de la redistribution compensatoire déjà présente en l'absence de charge.

d) Effondrement du facteur de puissance : Le $PF\Sigma$ chute à 0.26 , traduisant l'augmentation de la puissance réactive associée à la composante de séquence inverse créée par le déséquilibre.

4.3.4 Essai 5 : Chute de tension sur L2 — Charge nominale (100%)

4.3.4.1 Conditions expérimentales

Le rhéostat est inséré sur la phase L2. La charge résistive triphasée est entièrement connectée : $4\text{ lampes} \times 200\text{ W} \times 3\text{ phases} = 2400\text{ W}$ (puissance nominale de la génératrice). Le courant d'excitation de la génératrice est maintenu entre 0.6 et 0.8 A sous 110 V DC , assurant un flux nominal et donc un couple de charge maximal sur le moteur. La vitesse de rotation est mesurée au tachymètre optique : $n = 1479\text{ tr/min}$.

4.3.4.2 Résultats de mesure

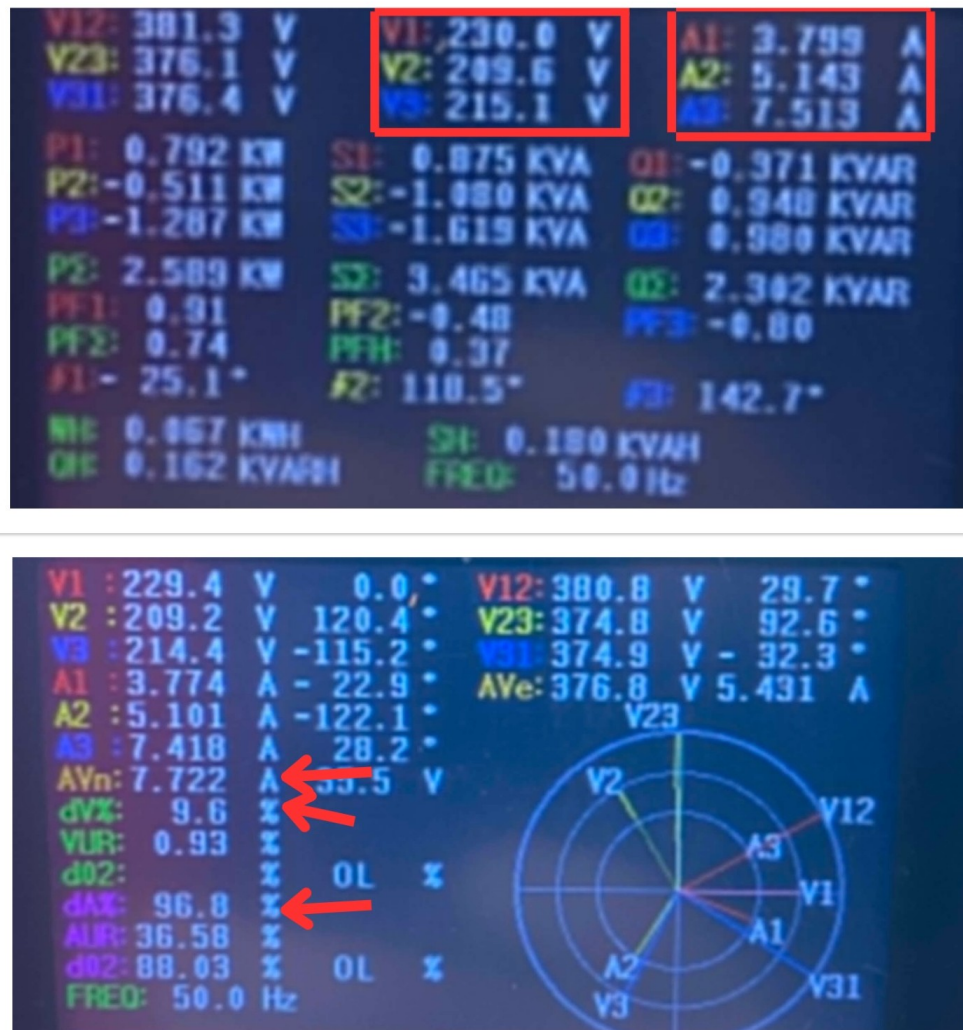


FIGURE 4.8. Résultats de mesure : Essai 3 — Chute de tension L2 + Charge 100% (afficheur de l'analyseur)

TABLE 4.2. Résultats de mesure : Essai 3 — Chute de tension L2 + Charge 100%

Grandeur mesurée	Phase L1	Phase L2 (af- fectée)	Phase L3
Tension de phase (V)	230.0	209.6	215.1
Tension de ligne V12/V23/V31 (V)	380.8	374.8	374.9
Courant de ligne I (A)	3.799	5.143	7.513
Puissance active —P— (kW)	0.792	0.511	1.287
Puissance réactive Q (kVAR)	0.371	0.940	0.980
Puissance apparente S (kVA)	0.875	1.080	1.619
Facteur de puissance —cosφ—	0.91	0.48	0.80
Angle de déphasage φ (°)	-25.1	110.5	142.7
THD courant (%)	6.1	6.8	5.0
THD tension (%)	6.1	6.3	5.5
Puissance active totale —PT— (kW)		2.590	
Puissance apparente totale ST (kVA)		3.465	
Facteur de puissance global —PFZ—		0.74	
Déséquilibre de tension dV% (%)		9.6 Δ (limite : 2 %)	
Déséquilibre de courant AUR (%)		36.58 Δ (limite : 10 %)	
Courant de neutre AVn (A)		7.722 Δ	
Fréquence (Hz)		50.0	
Vitesse de rotation mesurée (tr/min)		1479	

4.3.4.3 Calcul du glissement

La vitesse mesurée est $n = 1479$ tr/min pour une vitesse de synchronisme $n_s = 1500$ tr/min. Le glissement est :

$$g_3 = (n_s - n)/n_s \times 100 = (1500 - 1479)/1500 \times 100 = 1.40\% \quad (4.7)$$

Ce glissement (1.40 %) est nettement inférieur au glissement mesuré en charge nominale équilibrée (4.40 % à l'Essai 2). Cette observation apparemment paradoxale s'explique par le fait que la chute de tension sur L2 réduit la puissance mécanique disponible sur cette phase. Le moteur développe moins de couple sur le cycle corres-

pondant à L2, ce qui allège globalement le couple résistant moyen — d'où une vitesse plus élevée et un glissement plus faible. La puissance active totale absorbée (2.590 kW) reste cependant proche de l'Essai 2 (2.508 kW), les phases L1 et L3 compensant le déficit de L2.

4.3.4.4 Analyse et interprétation des résultats

L'analyse des résultats de l'Essai 3 met en évidence les manifestations électriques caractéristiques d'une chute de tension monophasée en charge nominale :

a) Déséquilibre de tension sévère : signature directe du défaut

La phase L2 présente une tension de 209.6 V contre 230.0 V sur L1 et 215.1 V sur L3. La chute de tension sur L2 est $\Delta V_2 = 230.0 - 209.6 = 20.4$ V, soit une réduction de 8.9 % par rapport à L1. Le taux de déséquilibre de tension mesuré par l'analyseur est $dV\% = 9.6$ %, soit près de cinq fois la limite normative de 2 % imposée par la norme EN 50160 [15]. Ce niveau de déséquilibre constitue, à lui seul, une condition suffisante pour justifier une intervention de maintenance selon les normes en vigueur.

b) Redistribution et surcharge asymétrique des courants de ligne

La réaction du moteur asynchrone au déséquilibre de tension est une redistribution significative des courants de ligne. On observe $A_1 = 3.799$ A, $A_2 = 5.143$ A et $A_3 = 7.513$ A. Le courant de la phase L3 atteint 7.513 A, soit 93.9 % du courant nominal (8.0 A en couplage étoile). Cette valeur est particulièrement préoccupante car elle est très proche du seuil de déclenchement des protections thermiques.

La règle empirique établie par la NEMA MG1 [14] stipule qu'un déséquilibre de tension de 1 % provoque un déséquilibre de courant de 6 à 10 fois plus élevé. Dans notre cas : $dV\% = 9.6$ % $\rightarrow$ AUR théorique = $9.6 \times (6 \text{ à } 10) = 57.6 \text{ à } 96$ %. La valeur mesurée $AUR = 36.58$ % est dans le bas de cette plage, ce qui s'explique par la nature résistive pure de la perturbation (rhéostat) par rapport à un déséquilibre de source.

c) Courant de neutre : indicateur de rupture de symétrie triphasée

Le courant de neutre mesuré est $AV_n = 7.722$ A. En régime triphasé parfaitement équilibré et symétrique, la somme vectorielle des courants de ligne est nulle et le courant de neutre est théoriquement nul. La valeur mesurée de 7.722 A confirme la rupture totale de la symétrie du système triphasé. Ce courant de neutre représente une perte d'énergie supplémentaire dans le conducteur de neutre et peut provoquer des surtensions sur les autres phases en cas de coupure accidentelle du neutre. En diagnostic industriel, la surveillance du courant de neutre constitue un indicateur simple et efficace pour détecter les déséquilibres triphasés.

d) Analyse de la répartition de la puissance active entre phases

La puissance active par phase est $P_1 = 0.792$ kW, $P_2 = 0.511$ kW et $P_3 = 1.287$ kW. L'écart entre la puissance maximale (P_3) et la puissance minimale (P_2) est $\Delta P = 1.287 - 0.511 = 0.776$ kW, contre $\Delta P = 0.057$ kW en charge équilibrée

(Essai 2). Ce déséquilibre de puissance est multiplié par un facteur 13.6 entre le régime sain et le régime défaillant. Cette dissymétrie de puissance est la traduction directe de l'échauffement différentiel entre phases : la phase L3, qui absorbe 1.287 kW, produit une densité de pertes Joule proportionnelle à $I^2 \times R = 7.513^2 \times R$, soit 3.9 fois plus élevée que la phase L1 (3.799 A). En exploitation continue, cet échauffement différentiel dégrade l'isolation de l'enroulement L3 de façon accélérée et irréversible.

e) Facteur de puissance et puissance réactive : effet de la composante inverse

La puissance réactive totale mesurée est $Q_T = 2.302$ kVAR, légèrement inférieure à la valeur de référence de l'Essai 2 (2.624 kVAR). La puissance apparente est $ST = 3.465$ kVA pour un facteur de puissance global $PF_\Sigma = 0.74$. L'amélioration apparente du $\cos\varphi$ par rapport à l'Essai 2 (0.69) est trompeuse : elle résulte de la réduction de la puissance réactive totale due à la baisse de tension sur L2, et non d'une amélioration réelle de l'efficacité énergétique du moteur. En réalité, les pertes totales dans le système sont plus élevées qu'en régime sain, comme l'indique la puissance active totale légèrement plus élevée (2.590 kW vs 2.508 kW) pour une charge identique.

4.3.5 Essai 6 : Chute de tension sur L2 — Charge partielle (50%)

4.3.5.1 Conditions expérimentales

Les conditions du défaut sont identiques à l'Essai 3 : rhéostat de 30 Ω sur la phase L2. La charge résistive est réduite à 50 % par la commande des interrupteurs du tableau : 2 lampes $\times$ 200 W $\times$ 3 phases = 1200 W. La tension d'excitation de la génératrice est abaissée à 73.6 V DC pour un courant d'excitation de 5 A, réduisant le couple de charge mécanique. Le courant de charge côté résistif mesuré est 1.7 A. La vitesse de rotation est $n = 1476$ tr/min.

4.3.5.2 Résultats de mesure



FIGURE 4.9. Résultats de mesure : Essai 3 — Chute de tension L2 + Charge 50% (afficheur de l'analyseur)

TABLE 4.3. Résultats de mesure : Essai 4 — Chute de tension L2 + Charge 50%

Grandeur mesurée	Phase L1	Phase L2 (af- fectée)	Phase L3
Tension de phase (V)	230.9	211.6	218.5
Tension de ligne V12/V23/V31 (V)	385.2	379.1	380.1
Courant de ligne I (A)	3.425	4.439	6.562
Puissance active —P— (kW)	0.671	0.339	1.025
Puissance réactive Q (kVAR)	0.419	0.875	1.004
Puissance apparente S (kVA)	0.792	0.941	1.436
Facteur de puissance —cos φ —	0.85	0.36	0.71
Angle de déphasage φ (°)	-31.7	111.1	135.5
THD courant (%)	11.5	8.6	6.8
THD tension (%)	6.3	7.3	6.4
Puissance active to- tale —PT— (kW)		2.034	
Puissance apparente totale ST (kVA)		3.072	
Facteur de puissance global —PFZ—		0.66	
Déséquilibre de ten- sion dV% (%)		9.0 Δ	
Déséquilibre de cou- rant AUR (%)		36.57 Δ	
Courant de neutre AVn (A)		6.968 Δ	
Résistance rhéostat sur L2 (Ω)		30	
Tension d'excitation génératrice (V DC)		73.6	
Courant d'excitation génératrice (A DC)		5.0	
Courant de charge résistive (A)		1.7	
Fréquence (Hz)		50.0	
Vitesse de rotation mesurée (tr/min)		1476	

4.3.5.3 Calcul du glissement

La vitesse mesurée est $n = 1476$ tr/min. Le glissement est :

$$g_4 = (1500 - 1476)/1500 \times 100 = 1.60\% \quad (4.8)$$

Le glissement $g_4 = 1.60\%$ est cohérent avec une charge à 50% : supérieur au glissement à vide (1.47%) mais très inférieur au glissement en charge nominale équilibrée (4.40%). Il est légèrement supérieur au glissement de l'Essai 5 (1.40%), ce qui confirme que la réduction du couple développé sur la phase affaiblie L2.

4.3.5.4 Analyse et interprétation des résultats

L'Essai 6 permet d'étudier l'influence du niveau de charge sur les signatures diagnostiques du défaut de chute de tension. La comparaison systématique avec l'Essai 5 révèle des enseignements importants pour le diagnostic industriel :

a) Persistance du déséquilibre de tension : signature indépendante de la charge

Le taux de déséquilibre de tension est $dV\% = 9.0\%$ à charge 50%, contre 9.6% à charge 100% (Essai 3). La variation est faible (0.6 point) malgré une réduction de charge de 50 %. Cette constance s'explique par le fait que la chute de tension aux bornes du rhéostat ($\Delta V = R \times I_2$) varie avec le courant I_2 , lui-même dépendant de la charge. À charge réduite, I_2 est plus faible, donc ΔV est plus faible, d'où un $dV\%$ légèrement inférieur. L'observation clé est que même à charge réduite de moitié, le déséquilibre de tension reste 4.5 fois au-dessus de la limite normative : le défaut reste pleinement détectable quelle que soit la charge.

b) Stabilité de l'AUR : robustesse de l'indicateur de déséquilibre de courant

L'indicateur $AUR = 36.57\%$ à charge 50% est pratiquement identique à la valeur obtenue à charge 100% (36.58 %). Cette invariance remarquable de l'AUR face à la variation de charge est une propriété diagnostique fondamentale : elle démontre que l'AUR est gouverné par le déséquilibre de tension — et non par le niveau de charge. En conséquence, l'AUR constitue un indicateur diagnostique robuste du défaut de chute de tension, exploitable à tout niveau de charge, y compris à faible charge où d'autres indicateurs (comme la puissance totale) sont moins discriminants.

c) Réduction des courants absolus mais maintien de la hiérarchie inter-phases

Les courants absolus diminuent avec la charge : A1 passe de 3.799 A à 3.425 A (-9.8 %), A2 de 5.143 A à 4.439 A (-13.7 %) et A3 de 7.513 A à 6.562 A (-12.7 %). La hiérarchie $A3 \succ A2 \succ A1$ est strictement préservée, confirmant que la phase L3 reste la plus sollicitée quel que soit le niveau de charge. Cette signature asymétrique — la phase opposée à la phase sous-alimentée supporte la surcharge la plus importante — est un critère diagnostique permettant d'identifier quelle phase est affectée par le

défaut.

d) Bilan des pertes supplémentaires dues au défaut

La puissance active totale absorbée par le moteur à charge 50% avec défaut est $—PT— = 2.034$ kW, pour une charge résistive de 1200 W. Les pertes totales du système (moteur + génératrice + câbles) sont donc : $P_{\text{pertes}} = 2.034 - 1.200 = 0.834$ kW. En comparaison, à charge équilibrée et nominale (Essai 2), les pertes sont $P_{\text{pertes}} = 2.508 - 2.400 = 0.108$ kW pour le même type de moteur. Le défaut de chute de tension génère donc des pertes supplémentaires considérables, significativement réduisant le rendement global de l'installation. Ces pertes se dissipent principalement en chaleur dans les enroulements du moteur, accélérant la dégradation de l'isolation.

4.4 Synthèse globale et tableau de bord diagnostique

Le tableau 4.4 présente une vue synthétique de l'ensemble des indicateurs mesurés sur les six essais, permettant une lecture transversale immédiate de l'effet du défaut à chaque niveau de charge.

TABLE 4.4. Synthèse globale des six essais : indicateurs diagnostiques

Indicateur	E1 Vide sain	E2 Ch.100% sain	E3 Ch.50% sain	E4 Vide + défaut	E5 Ch.100% + défaut	E6 Ch.50% + défaut
I_{moy} (A)	3.976	5.545	5.972	4.088	5.485	4.809
$\ P_T\ $ (kW)	0.211	2.508	2.745	0.705	2.590	2.034
$\ \cos \varphi\ $ global	0.08	0.69	0.70	0.26	0.74	0.66
$dV\%$ (%)	0.8	1.2	1.5	6.2	9.6	9.0
AUR (%)	9.56	15.7	5.46	33.00	36.58	36.57
AV_n (A)	0.710	0.764	0.288	0.111	7.722	6.968
$THDI_{\text{moy}}$ (%)	9.1	6.7	3.0	5.4	6.0	9.0
Vitesse (tr/min)	1478	1434	1440	1485	1479	1476
Glissement (%)	1.47	4.40	4.00	1	1.4	1.60

4.4.1 Diagnostiques principales

1. L'AUR est l'indicateur le plus robuste pour la détection du défaut de chute de tension monophasée : il dépasse systématiquement la limite normative de 10 % dans les trois essais en défaut (33,00 % à 36,58 %), avec une stabilité remarquable vis-à-vis du niveau de charge (écart inférieur à 0,01 % entre charge 100 % et 50 %).

2. Le $dV\%$ confirme la nature du défaut comme étant lié à l'alimentation (et non à la charge) : sa persistance à vide (6,2%) démontre que le défaut est détectable indépendamment de tout couple mécanique appliqué au moteur.
3. Le courant de neutre AV_n est un indicateur fortement discriminant en charge (facteur $\times 9$ par rapport au régime sain) mais peu sensible à vide, ce qui limite son usage à la surveillance de moteurs en fonctionnement chargé.
4. La phase opposée à la phase défaillante (ici L3, opposée à L2) est systématiquement la plus sollicitée en courant, ce qui permet, par la seule mesure des courants de ligne, de localiser la phase à l'origine du défaut.
5. Le risque thermique est maximal à charge nominale (Essai 5 : 93,9% du courant nominal sur L3), justifiant une action de maintenance prioritaire à ce régime de fonctionnement.

4.5 Conclusion

En guise de conclusion de ce chapitre, les résultats expérimentaux obtenus grâce à l'analyseur de puissance Lutron DW-6195 valident pleinement l'approche de diagnostic non intrusif fondée sur les indicateurs de puissance pour la détection des défauts de chute de tension monophasée sur les moteurs asynchrones triphasés. L'étude a mis en évidence la pertinence de plusieurs grandeurs caractéristiques, notamment le déséquilibre de tension ($dV\%$), le déséquilibre de courant (AUR), le courant de neutre ainsi que l'augmentation des pertes. Parmi ces indicateurs, l'AUR s'est révélé particulièrement robuste, en ce sens qu'il demeure invariant quel que soit le niveau de charge du moteur, ce qui en fait un critère fiable pour une surveillance en conditions réelles d'exploitation. Ces signatures diagnostiques, établies à partir de données expérimentales réelles, constituent ainsi une base solide pour le déploiement de stratégies de maintenance prédictive.

Conclusion générale

Ce mémoire a été consacré au diagnostic des défauts électriques des moteurs asynchrones triphasés par l'analyse des grandeurs de puissance. Après avoir rappelé la constitution et le principe de fonctionnement du moteur asynchrone, ainsi que les principales méthodes de diagnostic existantes (analyse vibratoire, acoustique, thermique, vecteur de Park, analyse de signature électrique), nous avons présenté l'analyseur de puissance Lutron DW-6195, instrument central de ce travail pour la mesure non-intrusive des grandeurs électriques. Un banc d'essai expérimental a ensuite été conçu et réalisé, associant un moteur asynchrone triphasé de 3,5 kW, une génératrice synchrone de 2,4 kVA et un tableau de charge résistive de 2400 W, avec un dimensionnement rigoureux des protections (fusibles, disjoncteur) et des câbles, conforme à la norme NF C 15-100. Ce dispositif a permis de mener six essais reproduisant, en laboratoire et de façon contrôlée, le fonctionnement sain et le fonctionnement en présence d'une chute de tension monophasée sur la phase L2, à vide ainsi qu'en charge nominale (100%) et partielle (50%). Les essais expérimentaux ont confirmé la pertinence des indicateurs de puissance pour la détection de ce défaut d'alimentation. La comparaison des essais à charge nominale et à charge partielle a par ailleurs montré que l'indicateur AUR demeure pratiquement invariant avec le niveau de charge, ce qui en fait un indicateur diagnostique particulièrement robuste, exploitable quel que soit le régime de charge du moteur. Il a également été établi que la chute de tension sur une phase provoque une redistribution asymétrique des courants de ligne, avec une surcharge marquée sur la phase opposée, génératrice de pertes Joule supplémentaires et d'un échauffement différentiel susceptible d'accélérer la dégradation de l'isolation statorique. Ces résultats confirment l'intérêt de l'analyse des grandeurs de puissance comme méthode de diagnostic non-intrusive et économique pour la maintenance prédictive des moteurs asynchrones, complémentaire aux approches vibratoires et thermiques traditionnelles. Comme perspectives pour des travaux futurs, nous proposons l'application de traitements avancés du signal (FFT, transformation de Park) aux signaux enregistrés, l'extension à d'autres types de défauts (roulements, excentricité, défauts rotoriques), et le développement d'un système de surveillance automatisé basé sur des seuils adaptatifs.

Bibliographie

- [1] A. T. de Almeida, F. J. T. E. Ferreira, and G. Baoming, “Beyond Induction Motors — Technology Trends to Move Up Efficiency,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 3, pp. 2103–2114, 2014.
- [2] A. Raqeeb et al., “Data-Driven Bearing Fault Diagnosis for Induction Motor,” *Journal of Electrical and Computer Engineering*, Wiley, vol. 2023, Article ID 7173989, November 2023. doi : 10.1155/2023/7173989.
- [3] W. T. Thomson and M. Fenger, “Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults,” *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 7, no. 4, pp. 26–34, July/August 2001.
- [4] S. Nandi, H. A. Toliyat, and X. Li, “Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors — A Review,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 4, pp. 719–729, December 2005.
- [5] H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, “Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-20, no. 3, pp. 625–630, May 1984.
- [6] P. J. Tavner, “Review of Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines,” *IET Electric Power Applications*, vol. 2, no. 4, pp. 215–247, 2008.
- [7] W. Rajan Babu, M. Sundaram, G. Muthuram, A. K. Najumudeen, M. Karthick, and B. Chandramouli, “MSCP Based Stator Fault Identification in Induction Motor Using Power Quality Analyzer,” in *Proc. 2023 International Conference on Intelligent Data Communication Technologies and Internet of Things (IDCIoT)*, 2023.
- [8] S. Malhotra and M. Soni, “Fault Diagnosis of Induction Motor,” *European Scientific Journal*, 2013.
- [9] M. Bin Hasan, *Current Based Condition Monitoring of Electromechanical Systems — Model Free Drive System Current Monitoring : Faults Detection and Diagnosis Through Statistical Features Extraction and Support Vector Machines Classification*, Ph.D. dissertation, University of Bradford, 2013.

- [10] M. Sabaghi and H. F. Farahani, “Monitoring of Induction Motor Temperature Under Unbalanced Supplying by Stator Resistance Estimation,” *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 5, no. 3, pp. 2354–2359, 2012.
- [11] K. Pandey, P. Zope, and S. Suralkar, “Review on Fault Diagnosis in Three-Phase Induction Motor,” in *IJCA Proceedings on National Conference*, Foundation of Computer Science (FCS), 2012.
- [12] X. Huang, *Diagnostics of Air Gap Eccentricity in Closed-Loop Drive-Connected Induction Motors*, Ph.D. dissertation, CiteSeer, 2005.

Normes et standards

- [13] IEEE, “Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1985.
- [14] NEMA MG1-2016, *Motors and Generators*, National Electrical Manufacturers Association, Rosslyn, VA, USA, 2016.
- [15] EN 50160 :2010, *Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Networks*, CENELEC, 2010.
- [16] IEEE Std 1159-2019, *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, IEEE, New York, USA, 2019.
- [17] NF C 15-100, *Installations électriques à basse tension*, AFNOR, France.

Manuels techniques et documentation constructeur

- [18] LUTRON Electronic Enterprise Co., Ltd., *DW-6195 Three-Phase Power Analyzer — Operation Manual*, Taiwan, 2018.
- [19] Fluke Corporation, *What is a Power Quality Analyzer?* [Documentation technique]. Consulté sur : <https://www.fluke.com>.
- [20] Electric Test, “Qu’est-ce qu’un analyseur de qualité d’énergie?” [En ligne]. Consulté le 7 novembre 2025 sur : <https://www.electric-test.fr>.