



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

Hounani Mohamed Zakaria / Belhamidi Abdelmadjid

Intitulé du sujet

Simulation de diagnostic des défauts de la machine asynchrone par Machine Learning

Soutenu le // 2026 devant le jury composé de :

Président :	Mr.Azzedine	MCA	Université de Mostaganem.
Examineur :	Mr.Kouadria	MCA	Université de Mostaganem
Encadreur :	Mr.Chaouch Abdellah		Université de Mostaganem

Année Universitaire 2025/2026

Remerciements :

Nous remercions tout d'abord Dieu de nous avoir donné la force et la connaissance afin que nous puissions accomplir ce que nous présentons aujourd'hui. Nous avons tous les deux travaillé dur pour en arriver là, et à ce stade, nous tenons à remercier Dieu pour tout le courage, la puissance et la force qu'Il nous a insufflés tout au long de ce chemin, nous permettant ainsi d'atteindre ce niveau.

Nous voulons également remercier notre encadrant, Monsieur Chaouch, pour son précieux accompagnement, le président de cette soutenance, Monsieur Benyamina, ainsi que l'examinatrice, Madame Rezini. Nos remerciements s'adressent aussi à l'ensemble des professeurs avec lesquels nous avons étudié, qui ont été nos guides durant nos années à l'université ; nous les remercions pour leur expérience, leur efficacité et pour tout ce que nous avons appris à leurs côtés.

Enfin, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers toutes les personnes qui nous ont soutenus et aidés tout au long de cette année, celles qui nous ont transmis leur énergie positive et nous ont guidés à chaque étape : nos familles, nos conjoints, nos amis, nos camarades, et chacun d'entre vous.

Dédicace :

Avec tout notre respect et notre profonde gratitude, nous dédions cet humble ouvrage à nos chères familles. À nos pères et à nos mères, qui ont toujours été à nos côtés, nous offrant leur amour, leur confiance, leurs sacrifices et leur soutien inconditionnel. Grâce à leurs encouragements et à leurs conseils, nous avons pu surmonter les difficultés et poursuivre notre chemin avec détermination et ténacité. À nos frères et sœurs, pour leur amour, leur présence et leur soutien tout au long de cette aventure. À nos grands-parents, pour leur tendresse, leurs prières et leurs précieux conseils, qui ont toujours été une source d'inspiration pour nous. À nos amis, qui ont partagé avec nous aussi bien les moments de joie que les moments difficiles, et qui nous ont toujours soutenus avec sincérité. À nos professeurs, pour leur disponibilité constante à nous aider, leurs conseils et le savoir qu'ils nous ont transmis tout au long de nos études.

Et enfin, à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

À vous tous, nous adressons nos sincères remerciements et vous offrons ce succès avec une profonde et infinie gratitude.

Résumé :

Nous allons établir un diagnostic des moteurs asynchrones en utilisant l'intelligence artificielle pour identifier les problèmes sans passer par les méthodes traditionnelles, pièce par pièce. Après avoir étudié la conception complète du moteur, nous allons simuler un moteur sain dans MATLAB, en enregistrant toutes les données électriques. Ensuite, nous introduirons des défauts, comme une barre cassée, et nous comparerons ces résultats aux signaux sains. L'IA analysera ces écarts pour détecter les anomalies, permettant ainsi de prévenir les pannes graves, d'optimiser la maintenance, et d'assurer une détection précoce des problèmes. Nous exploiterons ces données pour créer un modèle robuste, garantissant la fiabilité du système, tout en simplifiant l'identification des défauts.

Abstract :

AI-Based Diagnostic System for Induction Motors

We will establish a diagnostic system for induction motors using artificial intelligence to identify faults, bypassing traditional component-by-component methods. After studying the complete design of the motor, we will simulate a healthy motor in MATLAB and record all relevant electrical data. Next, we will introduce specific faults, such as a broken rotor bar, and compare these results with the healthy signals. The AI will analyze these deviations to detect anomalies, thereby preventing catastrophic failures, optimizing maintenance strategies, and ensuring early fault detection. We will leverage this data to build a robust model, guaranteeing system reliability while simplifying the fault identification process.

ملخص

تشخيص المحركات الحثية باستخدام الذكاء الاصطناعي

سندرس في هذا المشروع تشخيص أعطال المحركات الحثية (غير المتزامنة) باستخدام الذكاء الاصطناعي لتحديد المشاكل دون الحاجة إلى اللجوء إلى الطرق التقليدية التي تفحص كل قطعة على حدة. بعد دراسة التصميم الكامل للمحرك، سنقوم بمحاكاة محرك سليم في برنامج MATLAB وتسجيل جميع البيانات الكهربائية الناتجة عنه. بعد ذلك، سنقوم بإدراج بعض الأعطال، مثل كسر في قضبان الدوار، ومقارنة هذه النتائج بإشارات المحرك السليم. سيقوم الذكاء الاصطناعي بتحليل هذه الانحرافات والفروقات للكشف عن الاختلالات، مما يسمح بالوقاية من الأعطال الجسيمة، وتحسين عمليات الصيانة، وضمان الكشف المبكر عن المشاكل. سنستغل هذه البيانات لإنشاء نموذج قوي يضمن موثوقية النظام ويسهل عملية تحديد الأعطال

Sommaire

Remerciements	2
Dédicace	3
Résumé	4
Abstract	5
ملخص	6
Introduction Générale	14
1 Chapitre : Présentation le système industriel	16
1.1 Présentation générale du complexe GL1Z	16
1.2 Présentation des réseaux	17
1.2.1 Architecture générale du réseau moyenne tension (5,5 kV).....	17
1.2.2 Equipements électriques Importants	23
1.3 Les méthodes de la maintenance	26
1.3.1 Définition de la Maintenance corrective	26
1.3.2 Maintenance palliative (dépannage).....	27
1.3.3 Maintenance curative (réparation).....	27
1.4 Classification selon le degré d'urgence	27
1.4.1 Maintenance corrective immédiate	28
1.4.2 Maintenance corrective différée.....	28
1.5 Méthodologie d'une intervention corrective	28
1.5.1 Détection et signalement de la défaillance	28
1.5.2 Sécurisation et isolation	28
1.5.3 Diagnostic et identification de la cause racine	29
1.5.4 Choix et exécution de l'intervention	29
1.5.5 Contrôles et remise en service.....	29
1.6 Les différents défauts du moteur, les causes et leur maintenance.....	30
1.7 Maintenance préventive	31
1.7.1 Objectifs de la maintenance préventive.....	32
1.7.2 Maintenance systématique	32
1.8 Traitement des données par les capteurs.....	41
1.8.1 Les capteurs utilisés	41
1.8.2 Acquisition et traitement des données.....	41
1.9 Conclusion	42

2	Chapitre : Conception et Modélisation de la Machine Asynchrone	44
2.1	Introduction	44
2.2	Conception et Constitution Détaillée de la MAS	44
2.2.1	Constitution de la machine Asynchrone à cage d'écureuil.....	44
2.2.2	Principe de fonctionnement.....	47
2.3	Les Modèle Mathématique de la MAS.....	48
2.3.1	Mise en équations de la MAS	48
2.4	Conclusion	52
3	Chapitre : simulation et analyse des défauts.....	54
3.1	Introduction Générale du Chapitre	54
3.2	Analyse Fréquentielle par FFT (Analyse Fréquentielle)	55
3.2.1	Introduction à l'Analyse Fréquentielle	55
3.2.2	Signature de la Machine Parfaite Référence	55
3.2.3	Cas de la Chute de Tension d'Alimentation	56
3.2.4	Commentaires et Interpolation des Figures (Cas de la Chute de Tension).....	56
3.2.5	Conclusion Spécifique aux Scénarios de Chute de Tension	59
3.2.6	Cas du Défaut de Barres Rotoriques Cassées.....	59
3.2.7	Commentaires et Interpolation des Figures (Cas des Barres Cassées)	60
3.2.8	Conclusion Spécifique aux Scénarios de Barres Cassées.....	62
3.2.9	Conclusion Générale de l'Analyse des Spectres FFT	62
3.3	Analyse Temporelle (<i>Analyse Temporelle</i>).....	63
3.3.1	Introduction à l'Analyse Temporelle.....	63
3.3.2	Interpolation et Analyse des Formes d'Onde et des Enveloppes RMS.....	63
3.3.3	Interpolation et Analyse des Trajectoires du Vecteur de Park	65
4	Chapitre : Diagnostic Intelligent par Apprentissage Automatique.....	70
4.1	Introduction du Chapitre.....	70
4.2	Concepts Fondamentaux : Machine Learning vs. Deep Learning	70
4.2.1	Le Machine Learning Classique.....	70
4.2.2	Le Deep Learning et la Classification d'Images.....	70
4.3	Architecture et Fonctionnement de Google Teachable Machine	71
4.4	Protocole de Collecte et Constitution Statistique du Dataset	71
4.4.1	Dataset Fréquentiel (FFT) : Structure Multi-Charge à 1000 Hz et 100 Hz.....	71
4.4.2	La Règle Technique des Titres Graphiques (Apprentissage vs. Test).....	72
4.4.3	Dataset Géométrique (Approche par Vecteur de Park à 15 N.m)	73
4.5	Présentation de l'Interface Utilisateur de Google Teachable Machine	74
4.6	Analyse Comparative des Échelles : Spectre 1000 Hz vs. 100 Hz	75

4.7	Implémentation Pratique et Discussion des Résultats	77
4.7.1	Déploiement des Phases sur Google Teachable Machine	77
4.7.2	Intérêt Industriel Stratégique : Le cas de SONATRACH.....	82
4.8	Test du Système sur une Figure Aléatoire Inconnue.....	82
4.9	Interprétation des Résultats et Discussion.....	88
4.10	Conclusion du Chapitre	88
5	Références bibliographiques.....	92

Liste Des Figures

Figure I.1 Localisation Du Complexe Gllz.....	17
Figure I.2 Les Source D'energie Du Complexe Gllz.....	19
Figure I.3 Pompe Chargement Gnl.....	24
Figure I.4 Controle Sensoriel Du Moteur.....	33
Figure I.5 Comparateur à cardan.....	34
Figure I.6 Marbre de control.....	34
Figure I.7 Dispositif de contrôle du faux-rond de l'arbre moteur.....	35
Figure I.8 Principe de mesure du faux-rond de l'arbre moteur	35
Figure I.9 Verification De La Flexion.....	36
Figure I.10 Schema Des Enroulements	36
Figure I.11 Plaque A Bornier	36
Figure I.12 Megohmmetre	38
Figure I.13 Test Des Enroulements.....	38
Figure I.14 Test D'isolement Entre Phases.....	37
Figure I.15 Test D'isolment A La Masse	39
Figure I.16 Controle Des Pieces Internes Du Moteur	40
Figure II.1 Stator-----	45
Figure II.2 Rotor A Cage D'écureuil -----	46
Figure II.3 Regle De La Main Droite -----	47
Figure II.4 Schema Stator Triphase -----	48
Figure II.5 Circuit Equivalent Du Rotor A Cage D'ecureuil -----	50
Figure III.1 Fft De La Machine Saine	55
Figure III.2 Spectre FFT Zoome Du Chute De Tension (0 - 100 Hz)	57
Figure III.3 Spectre FFT Zoome Du Chute De Tension (0 - 1000 Hz)	58
Figure III.4 Spectre FFT Zoome Du Bars Casses (0 - 100 Hz)	60
Figure III.5 Spectre FFT Zoome Du Bars Casses (0 - 1000 Hz)	61
Figure III.6 RMS Temporelle , Barres Casses	63
Figure III.7 RMS Temporelle , Chute De Tension	64
Figure III.8 Park Circle ,Chute De Tension.....	66
Figure III.9 Park Circle , Barres Casses.....	67

Figure IV.1 Figure Du Matlab Complete.....	72
Figure IV.2 Figure Du Matlab Recadree (Sans Titre).....	73
Figure IV.3 L'interface De Google Teachable Machine	74
Figure IV.4 Spectre 1000 Hz (Approche Sensible).....	75
Figure IV.5 Spectre 100 Hz (Approche Precise).....	76
Figure IV.6 Interface De Classification Optimisee FFT A 1000 Hz.....	77
Figure IV.7 Interface De Classification Optimisee FFT A 100 Hz.....	78
Figure IV.8 Interface De Classification Vecteur De Park	79
Figure IV.9 Interface De Phase "Train"	80
Figure IV.10 Interface De Phase "Preview"	81
Figure IV.11 Figure Exemple 3 Bars Casses 1000 Hz.....	83
Figure IV.12 Figure Exemple Chute De Tension 30% 1000 Hz.....	84
Figure IV.13 Figure Exemple Chute De Tension 30% 100 Hz.....	85
Figure IV.14 Figure Exemple 3 Bars Casses 100 Hz -----	86
Figure IV.15 Figure Exemple Healthy 100 Hz -----	87

Liste Des Tableaux

Tableau I.1 Tableau De Distribution	21
Tableau II.1 les différentes pannes possibles et leurs causes et leurs solutions	31

Table Des Histogrammes

Histogramme IV.1 : Résultat Du L'exemple 3 Bars Casses 1000 Hz	83
Histogramme IV.2 : Résultat Du L'exemple Chute de Tension 30% 1000 Hz	84
Histogramme IV.3 : Résultat Du L'exemple Chute de Tension 30% 100 Hz	85
Histogramme IV.4 : Résultat Du L'exemple 3 Bars Casses 100 Hz	86
Histogramme IV.5 : Résultat Du L'exemple Healthy 100 Hz	87

Table Des Matières

Nomenclature et Symboles Mathématiques

Pour un modèle mathématique rigoureux, voici la définition de chaque variable :

$V_{sa}V_{sb}V_{sc}$: Tensions simples appliquées aux phases du stator (V)

$I_{sa}I_{sb}I_{sc}$: Courants circulant dans le stator (A)

$\psi_{sa}\psi_{sb}\psi_{sc}$: Flux magnétiques au stator (Wb)

R_sR_r : Résistances d'une phase du stator et du rotor (Ω)

L_sL_r : Inductances propres cycliques du stator et du rotor (H)

M : Inductance mutuelle maximale entre le stator et le rotor (H)

θ : Position angulaire électrique du rotor (rad)

ω_s : Pulsation électrique du réseau (rad/s)

ω : Vitesse angulaire électrique du rotor (rad/s)

Ω : Vitesse mécanique de rotation de l'arbre (rad/s)

P : Nombre de paires de pôles

C_{em} : Couple électromagnétique.

C_r : Couple résistant.

f : Coefficient de frottement.

J : Moment d'inertie du rotor.

M_0 : Maximum de l'inductance mutuelle entre phase du stator et la phase Correspondent du rotor.

v_e : Tension de l'anneau

L_s : Matrices des inductances statoriques.

L_r : Matrices des inductances rotoriques.

M_{sr} : Matrices des inductances mutuelles statoriques.

M_{rs} : Matrices des inductances mutuelles rotoriques.

ψ_s : flux statorique

$i_{ra}i_{rb}i_{rc}$: Courants circulant dans le rotor

Mots-clés et Définitions

Machine asynchrone : Actionneur électrique robuste convertissant l'énergie électrique en énergie mécanique, basé sur l'induction électromagnétique entre le stator et le rotor.

Diagnostic des défauts : Processus systématique de détection, d'identification et de localisation des anomalies de fonctionnement au sein d'un système industriel avant l'apparition d'une panne majeure.

Intelligence artificielle (IA) : Ensemble de techniques et d'algorithmes informatiques permettant à un système d'analyser des données complexes et de prendre des décisions automatisées pour la reconnaissance des signatures de défauts.

Courant statorique : Signal électrique mesuré aux bornes des enroulements du stator, dont les variations et les modulations fréquentielles servent d'indicateurs principaux pour la surveillance de la machine.

Valeur efficace (RMS) : Grandeur statistique (I_{RMS}) caractérisant l'énergie d'un signal temporel, utilisée ici pour quantifier l'évolution de l'amplitude du courant face aux perturbations et transitoires de charge.

Rupture de barres rotoriques : Défaut électrique et mécanique critique se produisant au niveau de la cage d'écureuil du rotor, entraînant des dissymétries magnétiques et des fluctuations cycliques du courant.

Chute de tension : Perturbation transitoire ou permanente du réseau d'alimentation affectant le comportement dynamique de la machine et modifiant sa signature de courant.

Traitement du signal : Ensemble de techniques mathématiques appliquées aux signaux temporels extraits afin d'éliminer le bruit de fond et de mettre en évidence les composantes fréquentielles liées aux anomalies.

Simulation numérique : Modélisation mathématique du comportement de la machine sous environnement logiciel permettant de reproduire fidèlement des scénarios de pannes sans endommager d'équipements réels.

MATLAB : Environnement de calcul technique et de programmation utilisé pour simuler les modèles électriques, traiter les signaux de courant et implémenter les algorithmes d'apprentissage.

Maintenance prédictive : Stratégie de maintenance basée sur la surveillance continue de l'état de santé de la machine, visant à planifier les interventions uniquement lorsque les indicateurs de défauts franchissent un seuil critique.

Introduction Générale :

Dans ce travail, nous nous penchons sur une étude approfondie des moteurs asynchrones, des machines largement utilisées dans l'industrie. Cependant, comme tout équipement mécanique, les moteurs asynchrones sont sujets à des défauts qui peuvent compromettre leur performance et leur fiabilité. Afin d'assurer le bon état de ces moteurs et d'optimiser leur durabilité, il est crucial de disposer de méthodes efficaces de détection et de diagnostic des défauts.

Pour simplifier le travail des opérateurs responsables de la maintenance des moteurs asynchrones, une approche novatrice consiste à faire appel à l'intelligence artificielle pour classer les différents types de défauts. Cette classification facilite non seulement le processus de diagnostic, mais permet également d'anticiper les problèmes potentiels et de mettre en œuvre des mesures correctives.

Ainsi dans cet ordre d'idée notre mémoire est subdivisée en quatre chapitres :

Le premier chapitre présente le système global étudié, fruit d'un stage en entreprise où nous avons réalisé des tests sur site, collecté des données précieuses, et utilisé diverses méthodes de diagnostic et de protection. **Le deuxième chapitre** s'attarde sur la conception et la modélisation des moteurs asynchrones, en analysant chaque composant, du rotor au stator, en passant par les équations qui régissent leur comportement. **Le troisième chapitre** se focalise sur les simulations numériques réalisées sous MATLAB, où nous comparons les signaux d'un moteur sain à ceux d'un moteur présentant des défauts. Grâce à ces données, l'intelligence artificielle nous permet d'identifier précocement les anomalies, de prévenir les pannes graves, et d'assurer une maintenance plus efficace et fiable c'est l'objet du **quatrième chapitre**. Cette approche intégrée nous offre ainsi une vision globale et innovante de la protection des moteurs asynchrones.

En fin nous terminerons notre travail par une conclusion générale et nos perspectives.

Chapitre 1

Présentation le système industriel

1 Chapitre : Présentation le système industriel

1.1 Présentation générale du complexe GL1Z

Le projet GL1Z a été lancé le 13 juin 1973, dans un contexte de croissance de la demande mondiale en gaz naturel. Après une phase d'ingénierie, de construction et de mise en service progressive, la production commerciale a débuté le 20 février 1978.

Une importante campagne de modernisation et de fiabilisation a été réalisée entre 1993 et 1996, permettant :

- Améliorer le rendement énergétique,
- Moderniser les systèmes de contrôle et d'automatisation,
- Augmenter la disponibilité des trains de liquéfaction
- Intégrer des équipements plus performants et plus sûrs.

Le complexe GL1Z constitue l'une des installations majeures de la filière du Gaz Naturel Liquéfié (GNL) en Algérie. Implanté dans la région industrielle d'Arzew (Figure I.1), sur la côte ouest algérienne, il représente un pivot stratégique dans la chaîne nationale de valorisation du gaz naturel. Conçu pour transformer le gaz en provenance des grands gisements du sud en GNL destiné à l'exportation, GL1Z joue un rôle clé dans la sécurité énergétique internationale et dans l'économie nationale.



Figure I.1 : Localisation du complexe GL1Z

1.2 Présentation des réseaux

Dans un complexe industriel de liquéfaction du gaz naturel tel que le GL1Z, l'énergie électrique constitue un levier fondamental pour assurer la continuité et la stabilité de la production. La majorité des équipements critiques, notamment les turbogénérateurs, les compresseurs, les pompes, les systèmes auxiliaires et les moteurs moyen tension, dépendent d'une alimentation électrique permanente et fiable. Toute perturbation ou indisponibilité du réseau électrique peut entraîner des conséquences majeures : arrêt partiel ou total des trains de liquéfaction, pertes de production, contraintes de redémarrage, et risques accrus sur la sûreté des installations.

1.2.1 Architecture générale du réseau moyenne tension (5,5 kV)

Le réseau électrique moyenne tension (MT) du complexe industriel GL1Z est conçu afin d'assurer une alimentation stable et continue des charges critiques nécessaires au fonctionnement des trains de liquéfaction et des utilités. L'architecture MT s'appuie principalement sur une production interne d'énergie électrique assurée par trois turbo-générateurs (G1, G2 et G3) et sur une alimentation externe provenant du réseau national SONELGAZ. Le schéma unifilaire (figure I.2) illustre l'organisation générale de la distribution 5,5 kV, ainsi que les interconnexions permettant le couplage et la répartition des charges entre les différentes sources.

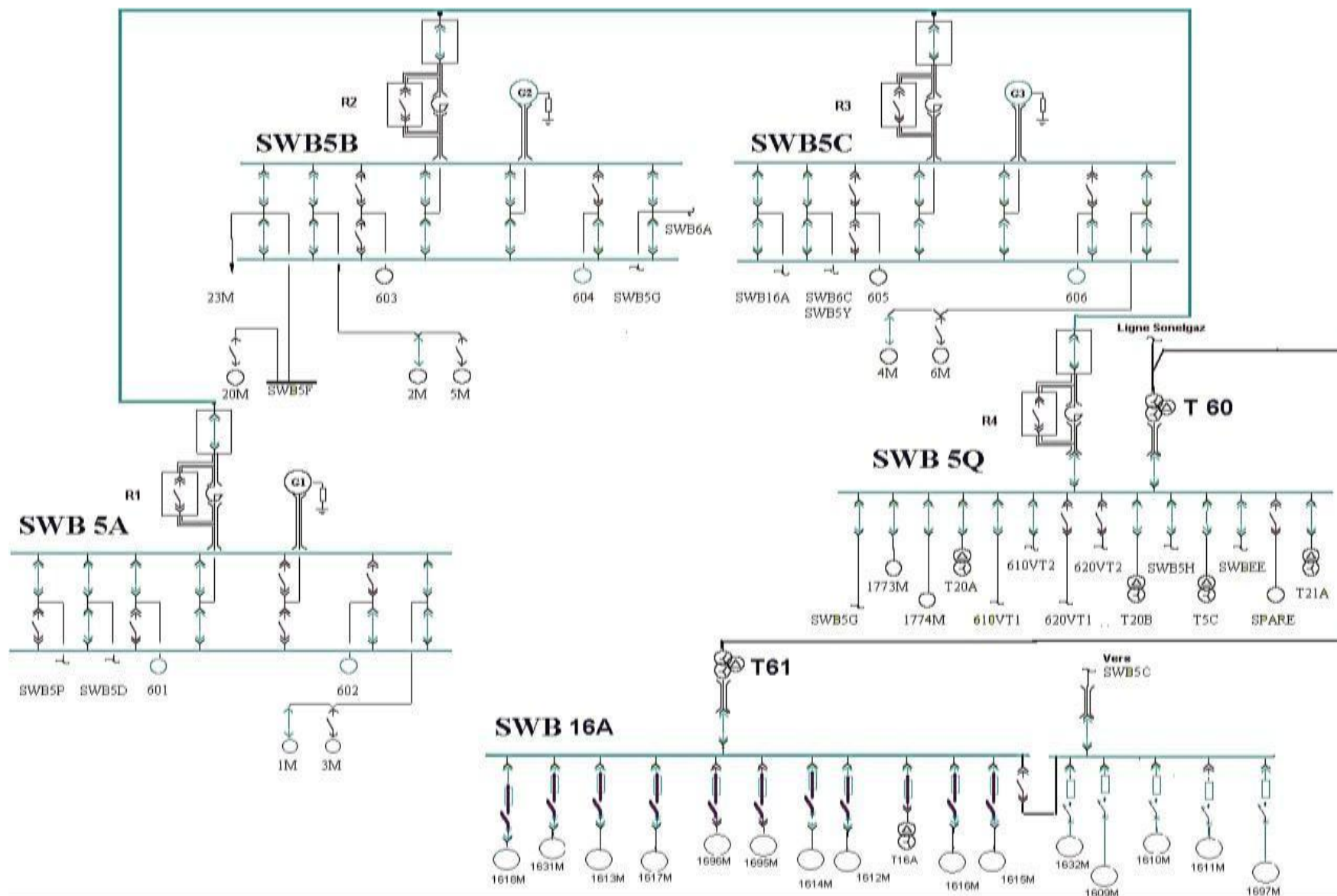


Figure I.2 : Les source d'Energie du complexe GL1Z [1]

1.2.1.1 Production interne : Turbo-générateurs G1, G2 et G3

La production interne du complexe est assurée par trois turbo-générateurs raccordés individuellement à des tableaux moyenne tension dédiés. Chaque turbo-générateur est connecté à un jeu de barres MT via son disjoncteur générateur et alimente un ensemble de départs vers les charges du complexe. Sur le schéma, ces raccordements sont clairement identifiés comme suit :

- **G1** alimentant le tableau de distribution **SWB5A**
- **G2** alimentant le tableau de distribution **SWB5B**
- **G3** alimentant le tableau de distribution **SWB5C**

Chaque tableau (SWB5A, SWB5B, SWB5C) comprend un double jeu de barres et plusieurs départs MT destinés à alimenter les équipements du complexe. Ces départs incluent notamment des moteurs moyenne tension et des transformateurs alimentant les réseaux basse tension.

Le réseau MT est également équipé d'une barre de synchronisation. Cette barre joue un rôle essentiel dans la flexibilité d'exploitation du réseau, car elle permet :

- La mise en parallèle de plusieurs turbo-générateurs et l'arrivée SONELGAZ (T60),
- Le transfert de charge d'une source vers une autre,
- Le maintien de l'alimentation de certaines charges en cas d'arrêt d'un turbo-générateur,
- Ainsi que l'équilibrage global des puissances disponibles sur le réseau 5,5 kV.

En pratique, la synchronisation garantit que le couplage des sources n'est réalisé que lorsque les conditions de tension, fréquence et phase sont compatibles. Cette disposition est indispensable dans un réseau industriel où les variations rapides de charge et les démarrages de moteurs de grande puissance peuvent affecter la stabilité du système.[1]

1.2.1.2 Distribution des charges moyenne tension

Tableau de distribution 064V-SWB5A :

Le tableau de distribution 064V-SWB5A composé d'un double jeu de barres A & B et de sept (07) paires de disjoncteurs de 5500 V. Le tableau 1.1.I présente les références des disjoncteurs et les circuits alimentés.

REFERENCES DES DISJONCTEURS	IN (A)	CIRCUITS ALIMENTES
52A-G1 (1A5), 52B-G1 (1B5)	2500	Arrivée Générateur #1
52A-R1 (1A4), 52B-R1 (1B4),	2500	Départ Réactance R#1
52A-15M (1A3) & 52B-15M (1B3) (1A3)-(1B3)	1200	Départ Pompe EDM /041-J-601
52A-16M & 52B-16M	1200	Départ Pompe EDM /041-J-602

52A-1F1 & 52B-1F1 (1A1-1B1)	1200	Départ vers : Liaison Normal (GL1/Z) /Normal (GL2/Z) Liaison Normal (GL1/Z) /Secours (GL2/Z)
52A-1F2 & 52B-1F2 (1A2-1B2)	1200	Départ vers : MPA(HP)-060-J-361 (Utilités) S/S#4-T4A(Dessalement) S/S#5- T5A(Turbogénérateurs) S/S#7-T7A (Pomperie EDM)
52A-1F3 & 52B-1F3 (1A7-1B7)	1200	Départ vers : MPA-T100(710-J-369) Soufflante sécheur-T100(102-K-301AM) S/S#1- T1A(T100) MPA-T300(730-J-369) Soufflante sécheur-T300(302-K-301AM) S/S#2- T2A(T300)

Tableau I.1 : Tableau de distribution [1]

1.2.1.2.1 Arrivée SONELGAZ via le transformateur T60

En complément de la production interne, le complexe GL1Z dispose d'une alimentation externe provenant du réseau national SONELGAZ. Cette alimentation arrive sur le réseau MT du complexe via un transformateur identifié T60, assurant l'adaptation du niveau de tension (réseau haute tension vers 5,5 kV). Cette arrivée SONELGAZ est connectée à un tableau MT distinct, repéré SWB5Q, via la liaison indiquée « T60 ». Le tableau d'arrivée SONELGAZ (SWB5Q) distribue ensuite l'énergie vers plusieurs départs MT, notamment ceux destinés aux transformateurs auxiliaires et aux réseaux de distribution internes. Cette source externe joue un rôle stratégique dans plusieurs situations d'exploitation, notamment :

- En cas de déficit de puissance produite par les turbo-générateurs,
- Lors de l'indisponibilité d'un ou plusieurs turbo-générateurs,
- Ou en mode de secours pour garantir l'alimentation des charges vitales nécessaires à la sûreté, au maintien des utilités et au redémarrage du complexe.

Cette interconnexion avec SONELGAZ permet ainsi d'augmenter la disponibilité globale du réseau électrique du complexe et d'améliorer sa flexibilité opérationnelle.[1]

1.2.1.2.2 Arrivée SONELGAZ via le transformateur T61

En complément de l'arrivée principale SONELGAZ via le transformateur T60 (60 kV / 5,5 kV), le réseau haute tension 60 kV du complexe comporte également un piquage en amont permettant d'alimenter un second transformateur T61 (60 kV / 5,5 kV). Ce transformateur est dédié à l'alimentation du tableau moyenne tension SWB16A,

Lequel assure la distribution électrique vers les six chaudières du complexe ainsi que leurs auxiliaires. Cette configuration met en évidence une architecture de distribution segmentée, où certaines charges critiques (notamment la production vapeur) disposent d'une alimentation MT dédiée, améliorant ainsi la sélectivité, la continuité de service et la flexibilité d'exploitation du réseau électrique du GL1Z.[1]

1.2.1.3 Sous-stations électriques du complexe

Toute la distribution d'énergie électrique du complexe GL1Z est réalisée à l'aide de sous-stations électriques réparties dans les différentes zones industrielles. Ces sous-stations constituent les points essentiels de transformation, de protection et de répartition de l'énergie, permettant d'alimenter les unités de procédé, les utilités, les installations de

stockage/chargement ainsi que les bâtiments auxiliaires. Elles assurent ainsi la continuité de service et la sélectivité de la distribution, tout en facilitant l'exploitation et la maintenance des départs électriques. L'organisation du réseau met en évidence une implantation par zones fonctionnelles, à savoir les trains de liquéfaction, les utilités (pomperies eau de mer et dessalement), la génération électrique, le terminal de chargement et les infrastructures de support (centre de control central, maintenance, administration). La répartition nominative des sous-stations permet de relier directement chaque zone du complexe à une alimentation électrique dédiée, améliorant ainsi la fiabilité globale du réseau et la gestion opérationnelle des charges critiques.[1]

1.2.2 Equipements électriques Importants

Le complexe GL1Z abrite des équipements électriques importants, à savoir un turbogénérateur, une pompe à eau de mer, des pompes GNL, un compresseur et un transformateur. Dans notre étude, nous nous intéresserons aux pompes GNL.

1.2.2.1 Les pompes GNL

Les pompes de GNL (Figure I.3) constituent un équipement stratégique du complexe GL1Z, car elles assurent le transfert du gaz naturel liquéfié depuis les réservoirs cryogéniques vers les installations de chargement, garantissant ainsi la continuité des opérations d'exportation. Le complexe dispose de trois réservoirs de stockage d'une capacité de 100 000 m³ chacun, et le système de chargement est dimensionné pour atteindre un débit pouvant aller jusqu'à 10 000 m³/h. Cette performance est rendue possible grâce à une configuration en parallèle de cinq (05) pompes GNL, entraînées par des moteurs asynchrones moyenne tension alimentée en 5,5 kV, d'une puissance nominale de 784 kW par pompe.

La surveillance de ces pompes doit intégrer non seulement les aspects mécaniques (vibrations, désalignement, cavitation, usure des roulements), mais également les défauts électriques susceptibles d'affecter les moteurs (déséquilibre de phases, surcharge, défaut rotor, défauts d'alimentation). Dans cette perspective La mise en place des méthodes de diagnostic précoce, telles que l'intelligence artificielle, constitue une approche efficace pour améliorer la disponibilité et prévenir les pannes imprévues.



Figure I.3 : Pompe chargement GNL

1.2.2.2 Problème historique de la pompe GNL

Le complexe GL1Z est équipé de cinq (05) motopompes de chargement GNL (J-901 à J-905), mises en service en 1994–1995. Ces équipements sont critiques, car le chargement d'un méthanier nécessite la mise en service simultanée de trois (03) pompes, les autres servant de secours.

1.2.2.2.1 Apparition progressive d'un même symptôme électrique

À partir de 2006, un phénomène récurrent d'oscillation anormale du courant statorique est observé successivement sur plusieurs motopompes :

- J-903 (2006) : premières oscillations importantes du courant statorique, suivies de déclenchements répétés.
- J-901 (2009) : apparition d'oscillations de courant, sans arrêt immédiat mais avec signes de fatigue.
- J-902 (2010) : oscillations persistantes malgré une révision mécanique, avec aggravation progressive.
- J-904 (2011) : oscillations du courant statorique conduisant à un défaut d'isolement du bobinage.
- J-905 (2011–2012) : oscillations détectées plusieurs mois avant un court-circuit statorique.

Ce symptôme électrique constitue le premier indicateur commun observé sur l'ensemble des équipements avant leur défaillance. [1]

1.2.2.2.2 Évolution des défauts vers des avaries majeures

L'historique montre que les oscillations du courant statorique n'ont pas été traitées comme un défaut précurseur, ce qui a conduit à des dégradations graves :

- Cassures de barres rotoriques confirmées sur la J-903 après expertise constructeur.
- Courts-circuits du bobinage statorique sur les pompes J-904 et J-905.
- Arrêt définitif de la J-902 après aggravation des oscillations et déclenchements répétitifs.

Les protections électriques existantes (thermiques, surintensité, isolement) n'ont agi qu'au stade destructif, lorsque le défaut était déjà irréversible.

1.2.2.2.3 Absence de diagnostic électrique préventif

Durant près de quinze (15) ans d'exploitation :

- aucune méthode de maintenance préventive électrique n'a été appliquée,
- aucune analyse approfondie des signaux de courant statorique n'a été réalisée,
- les décisions ont été essentiellement curatives (réparations, interchangeabilité stator/rotor, retour constructeur, remplacement).

Ainsi, bien que le signal courant fût disponible et mesurable, il n'a pas été exploité comme outil de diagnostic avancé .

1.2.2.2.4 Conséquences industrielles

Cette situation a conduit à :

- une indisponibilité critique du parc de moto-pompes,
- des risques opérationnels élevés pour le chargement GNL,
- des coûts importants (expertises constructeur, réparations lourdes, acquisitions de nouvelles pompes),
- une dépendance accrue aux solutions de remplacement plutôt qu'à la prévention.

Dans ce contexte nous présentons les méthodes de la maintenance industrielle.

1.3 Les méthodes de la maintenance

1.3.1 Définition de la Maintenance corrective

1.3.1.1 Définition normalisée

La maintenance corrective désigne, selon la norme AFNOR NF EN 13306, « l'ensemble des actions de maintenance exécutées après détection d'une panne et destinées à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise » [2]. Cette approche s'applique à tous types d'équipements industriels : machines de production, systèmes de manutention, installations électriques ou équipements HVAC /CVC. [3]

1.3.1.2 Objectifs principaux

La maintenance corrective vise notamment à :

- rétablir le fonctionnement le plus rapidement possible,
- réduire les arrêts imprévus,
- identifier la cause racine pour éviter les récurrences,
- améliorer la fiabilité globale grâce aux retours d'expérience. [3]

1.3.1.3 Types de maintenance corrective selon AFNOR NF EN 13306

La norme distingue clairement deux catégories de maintenance corrective, chacune répondant à des objectifs opérationnels distincts. [2]

1.3.2 Maintenance palliative (dépannage)

La maintenance palliative, également appelée dépannage, constitue une intervention provisoire et rapide permettant de relancer l'équipement dans un délai minimal. [3]

Exemple : Suite à la rupture d'une courroie de transmission, le technicien installe temporairement une courroie standard disponible en stock. Cette solution permet de reprendre la production en attendant la réception de la pièce d'origine.

1.3.3 Maintenance curative (réparation)

La maintenance curative correspond à une réparation définitive et durable visant à éliminer totalement la cause de la défaillance. [3]

Exemple : Après analyse, on découvre que la rupture répétée de courroies provient d'un désalignement des poulies. L'intervention curative consiste à réaligner précisément les arbres, remplacer la courroie par le modèle d'origine, et vérifier les tensions selon les préconisations du constructeur.

1.4 Classification selon le degré d'urgence

Au-delà de la distinction palliative/curative, la maintenance corrective se décline selon son degré d'urgence. [3]

1.4.1 Maintenance corrective immédiate

L'intervention est déclenchée sans délai après la détection de la défaillance. Cette approche s'applique lorsque la panne bloque une production critique, qu'un risque sécurité est identifié, que l'équipement est stratégique sans redondance, ou que le coût d'immobilisation est très élevé. [3]

1.4.2 Maintenance corrective différée

L'intervention est planifiée et programmée après l'identification du problème, selon des règles de maintenance établies. On l'utilise quand la défaillance n'impacte pas immédiatement la production, que l'équipement dispose d'une redondance opérationnelle, que la planification optimise les ressources et les coûts, ou que le risque reste acceptable à court terme. [3]

1.5 Méthodologie d'une intervention corrective

1.5.1 Détection et signalement de la défaillance

La défaillance peut être détectée par le personnel d'exploitation, les systèmes de supervision automatisés, les inspections de routine ou des anomalies intermittentes.

Dès qu'un problème apparaît, une demande d'intervention est enregistrée dans la GMAO (la gestion de la maintenance assistée par ordinateur), permettant :

- Une description précise de la panne (localisation, symptômes, contexte),
- La transmission automatique de l'information au service maintenance,
- La priorisation selon des règles prédéfinies (criticité, sécurité, impact production).

La GMAO devient ainsi le point d'entrée officiel de toute intervention corrective. [4]

1.5.2 Sécurisation et isolation

Avant toute intervention, la priorité est la sécurité : consignation, arrêt contrôlé, vérification de l'absence d'énergie résiduelle, signalisation de la zone, etc. [5]

La GMAO peut intégrer :

- les procédures de consignation liées à l'équipement.
- les checklists sécurité obligatoires .[5]
- la confirmation par le technicien que les opérations préalables ont bien été effectuées.

Cette étape critique est ainsi standardisée et tracée.

1.5.3 Diagnostic et identification de la cause racine

Le diagnostic technique vise à déterminer l'origine exacte de la défaillance.

La GMAO permet ici de :

- consulter l'historique des pannes du même équipement,
- visualiser les interventions précédentes et les pièces déjà remplacées,
- documenter l'analyse de cause racine directement dans la fiche d'intervention.

Grâce à ces données, le diagnostic est plus rapide et plus fiable. [4]

1.5.4 Choix et exécution de l'intervention

Selon la situation, le responsable maintenance choisit entre :

- dépannage immédiat (maintenance palliative),
- réparation complète (maintenance curative),
- intervention différée si les conditions le permettent. [3]

La GMAO assiste cette prise de décision en affichant par exemple : la disponibilité des techniciens, ou encore le stock de pièces détachées.

Une fois l'intervention lancée, le technicien suit les instructions via la GMAO : démontage, remplacement ou réparation, réglages, nettoyage de la zone.

Chaque action peut être enregistrée en temps réel depuis mobile ou tablette. [4]

1.5.5 Contrôles et remise en service

Avant le redémarrage, une vérification fonctionnelle est réalisée : tests de performance, contrôle de conformité, levée de consignation, remise en service progressive et surveillance.

La GMAO permet de :

- cocher les points de contrôle obligatoires,
- consigner les résultats des tests,
- attester de la remise en service,
- clôturer l'intervention avec un rapport complet.

Elle garantit ainsi une traçabilité totale et facilite le suivi qualité. [4]

1.6 Les différents défauts du moteur, les causes et leur maintenance

Le tableau I.2 présente les différentes pannes possibles et leurs causes et leurs solutions

Défaut	Causes possibles	Remède
Le moteur ne démarre pas	Alimentation coupée	Vérifier et corriger le raccordement
Le moteur ne démarre pas ou difficilement	Moteur prévu en démarrage triangle mais raccordé en étoile	Corriger le raccordement
Mauvais sens de rotation	Moteur mal raccordé	Inverser deux phases du réseau
Le moteur ronfle et absorbe beaucoup de courant	Le frein de déblocage pas (cas d'un moteur frein) Bobinage défectueux Le rotor frotte	Débloquer le frein Ramener le moteur dans un établissement agréé pour réparation
Fusibles sautent ou disjonctent	Court-circuit dans les câbles d'alimentation Court-circuit dans le moteur Câbles mal raccordés Défaut à la terre du moteur	Éliminer le court-circuit Faire éliminer le court-circuit dans un atelier agréé Corriger le raccordement Faire éliminer le court-circuit dans un atelier agréé

Sous charge, vitesse fortement réduite Moteur trop chaud	Surcharge	Faire une mesure de puissance ; si nécessaire installer un moteur plus grand ou réduire la charge
	Chute de tension	Augmenter la section du câble d'alimentation
	Surcharge	Faire une mesure de puissance ; si nécessaire installer un moteur plus grand ou réduire la charge
	Ventilation insuffisante	Dégager les couloirs de ventilation
	Température ambiante trop élevée	Respecter la plage de température autorisée
	Moteur branché en triangle et non en étoile	Corriger le raccordement
	Mauvais contact au niveau du câble d'alimentation (marche temporairement sur deux phases	Supprimer le mauvais contact

Tableau I.2

1.7 Maintenance préventive

Définition AFNOR de la maintenance préventive : « Maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien ». [2]

La maintenance préventive est donc, comme son nom l'indique, de la prévention par l'entretien régulier d'une machine ou d'un bien. Elle consiste à faire des contrôles selon des normes établies et/ou conformément aux instructions du fabricant, mais également en fonction de l'expérience humaine et des historiques d'interventions réalisés sur le bien. [3]

1.7.1 Objectifs de la maintenance préventive

- Augmenter la durée de vie des matériels ;
- Diminuer la probabilité des défaillances en service ;
- Diminuer les temps d'arrêt en cas de révision ou de panne ;
- Prévenir et aussi prévoir les interventions coûteuses de maintenance corrective
- Permettre de décider la maintenance corrective dans de bonnes conditions ;
- Eviter les consommations anormales d'énergie, de lubrifiant ;
- Améliorer les conditions de travail du personnel de production ;
- Diminuer le budget de maintenance ;
- Supprimer les causes d'accidents graves. [4]

On peut distinguer plusieurs types de maintenance préventive, notamment :

1.7.2 Maintenance systématique

La maintenance préventive systématique est effectuée selon un échéancier, en fonction du temps ou du nombre d'unités d'usage, mais sans contrôle préalable du bien.

La fréquence des interventions est établie à compter de la mise en fonctionnement du bien ou à la suite d'une révision partielle ou complète de celui-ci. [2]

Exemple : Le changement d'huile sur une machine peut être défini au bout d'un certain nombre de semaines d'utilisation sans contrôle spécifique préalable. [2]

1.7.2.1 Mise en œuvre de la maintenance systématique

La maintenance préventive repose sur l'utilisation de techniques appropriées de surveillance et de contrôle, visant à évaluer l'état des équipements et à prévenir les défaillances éventuelles. Ces vérifications jouent un rôle crucial dans l'assurance de la fiabilité et de la disponibilité des installations

Contrôle en fonctionnement :

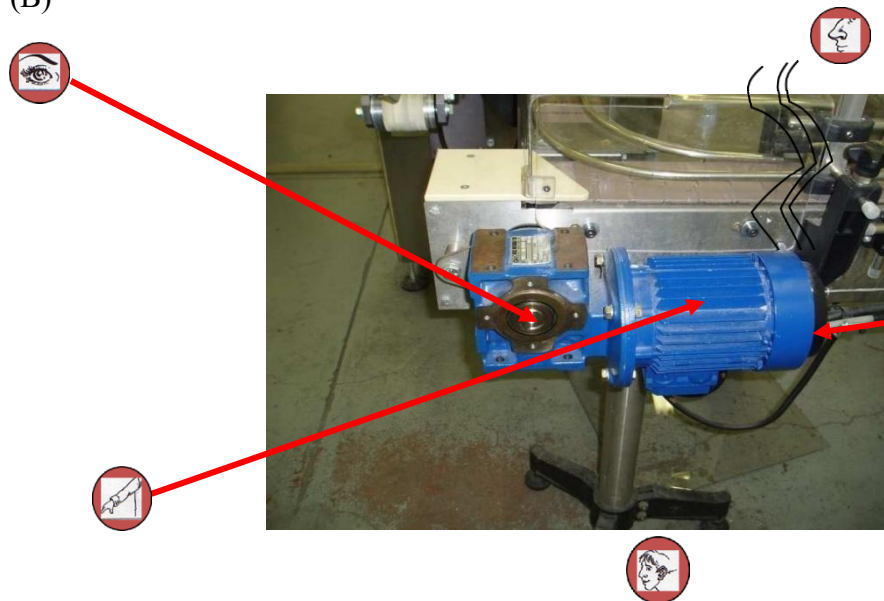
Le contrôle en cours de fonctionnement repose sur l'observation et la vérification de l'état d'une machine alors qu'elle est en marche, sans nécessiter son arrêt. Cette méthode permet d'identifier rapidement toute anomalie détectable par les sens humains, tels que la vue, l'ouïe, l'odorat ou le toucher. [4]

Simple à mettre en œuvre et sans recours à des outils sophistiqués, ce type de contrôle contribue de manière significative à la prévention des pannes et au maintien optimal des équipements

Est-ce que l'arbre du moteur tourne ? (A)

Est-ce qu'il y a une odeur de brûlé ?

(B)



Est-ce que le ventilateur tourne ? (A)

Est-ce que le moteur ne chauffe pas ? (D)

Est-ce que le moteur fait du bruit ? (C)

Figure I.4 : Contrôle sensoriel du moteur

A. Contrôle visuel		Contrôler que : ✓ Le moteur tourne ✓ Le ventilateur fonctionne
B. Contrôle olfactif		Contrôler que le moteur ne chauffe pas
C. Contrôle auditif		Contrôler qu'il n'y a pas de bruits anormaux
D. Contrôle tactile		Vérifier que le moteur ne chauffe pas, la main doit pouvoir rester en contact ($T^{\circ} = 60^{\circ}\text{C max}$)

1.7.2.2 Contrôle avant démontage

Le contrôle préalable au démontage représente une phase cruciale pour examiner l'état global des composants sans avoir à y intervenir directement. Son objectif est d'identifier d'éventuelles anomalies, défauts ou déformations, afin de mieux planifier les actions de maintenance et de limiter les démontages superflus. [3]

1.7.2.2.1 Contrôles mécaniques

Les contrôles mécaniques visent à examiner l'état physique et géométrique des différents composants d'un système. Ils servent à identifier des anomalies telles que l'usure, les déformations, les jeux excessifs ou les désalignements. Ces vérifications s'effectuent à l'aide d'instruments de mesure adaptés, comme le comparateur ou le marbre, dans le but d'assurer la précision et le fonctionnement optimal des éléments mécaniques avant d'entreprendre toute



Figure I.5: Comparateur à cardan



Figure I.6 : Marbre de control

Il y'a deux méthode de contrôle des alignements d'arbre moteurs

Méthode n°1 :

A l'aide du montage (figure I.7), **on va** contrôler la déformation de l'arbre moteur.

- ✓ Placer le comparateur perpendiculairement à l'arbre moteur.
- ✓ Faire appuyer le palper sur l'arbre
- ✓ Régler les aiguilles sur 0.

Faire tourner l'arbre lentement et noter les valeurs extrêmes

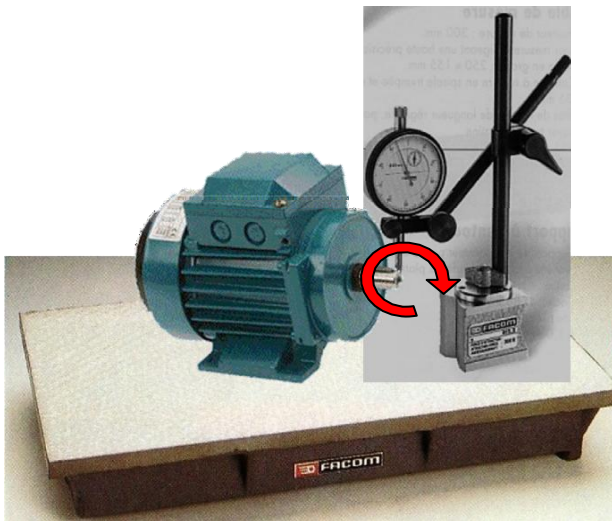


Figure I.7 Dispositif de contrôle du faux-rond de l'arbre moteur

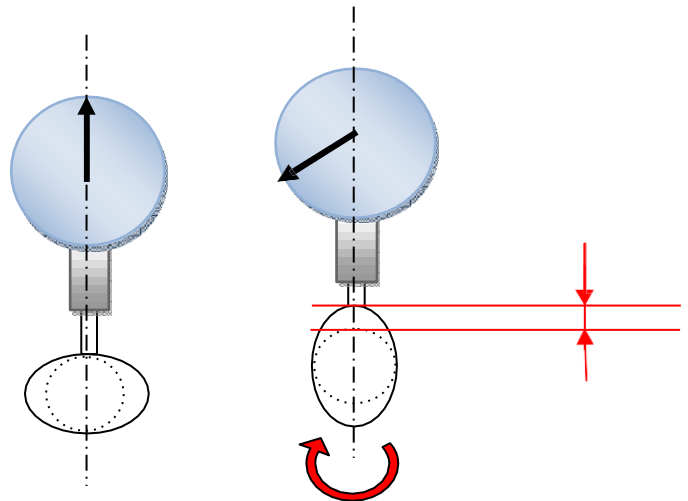


Figure I.8 : Principe de mesure du faux-rond de l'arbre moteur

Valeur attendue : déformation maxi 1/10 mm sur un tour de l'arbre. [5]

Méthode n°2 :

A l'aide du montage (figure I.9), **on va** contrôler la déformation de l'arbre moteur.

- ✓ Placer le comparateur perpendiculairement à l'arbre moteur.
- ✓ Faire appuyer le palper sur l'arbre
- ✓ Régler les aiguilles sur 0.

Faire glisser le palper lentement sur l'arbre et noter les valeurs extrêmes

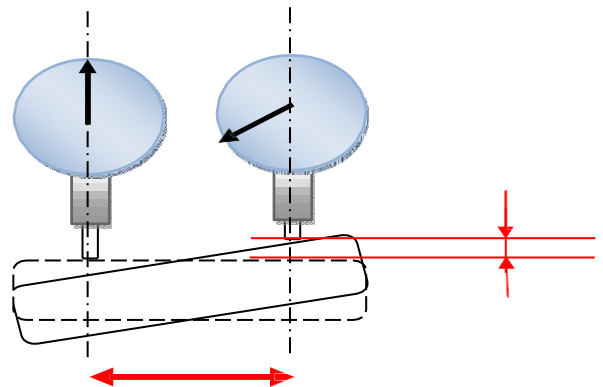
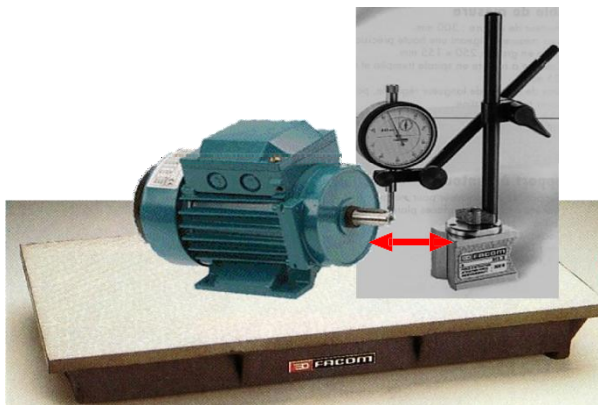


Figure I.9 : Vérification de la flexion

Valeur attendue : déformation maxi 1/10 mm sur un tour de l'arbre

1.7.2.2.2 Contrôle électrique du moteur

Le contrôle électrique d'un moteur vise à examiner l'état des circuits électriques et des enroulements pour s'assurer de leur bon fonctionnement. Cette démarche permet d'identifier d'éventuelles anomalies, telles que des coupures, des courts-circuits ou des problèmes d'isolement. Elle s'effectue dans le respect strict des consignes de sécurité, notamment en coupant l'alimentation, et en utilisant des outils de mesure appropriés comme le multimètre ou le mégohmmètre (figure I.12). [5]

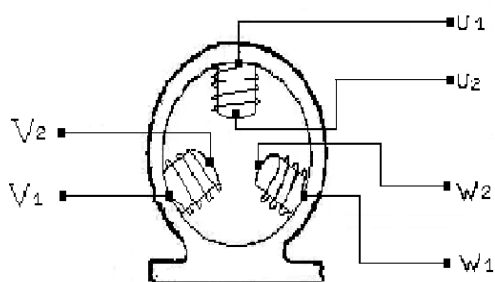


Figure I.10 : Schéma des enroulements

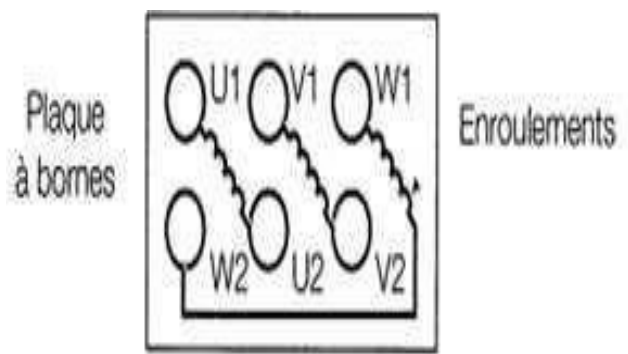


Figure I.11 : plaque à bornier



Figure I.12 : Mégohmmètre

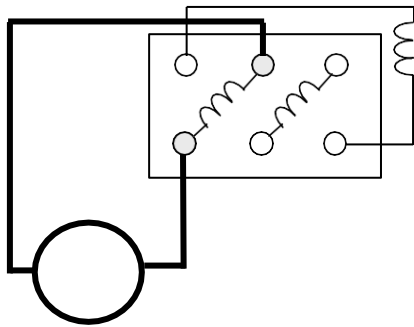
Procéder à des contrôles électriques en 3 étapes :

A. contrôle de continuité des bobines

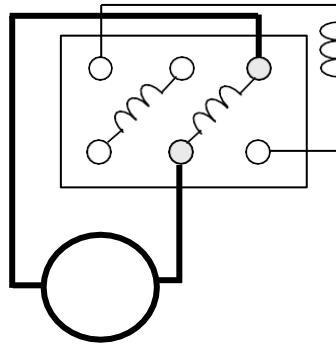
Le contrôle de la continuité des bobines sert à évaluer l'état électrique des enroulements d'un moteur. À l'aide d'un ohmmètre, on mesure la résistance entre les bornes (U1-U2, V1-V2, W1-W2). Une faible résistance indique que la bobine est en bon état de fonctionnement, tandis qu'une résistance infinie ou très élevée révèle une coupure dans l'enroulement. Ce test constitue une étape cruciale pour identifier d'éventuelles défaillances internes avant de remettre le moteur en service. [6]

Matériel utilisé : ohmmètre calibré sur une petite échelle (200 ohms)

Entre U1 et U2



Entre V1 et V2



Entre W1 et W2

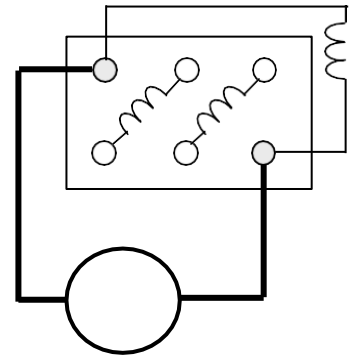


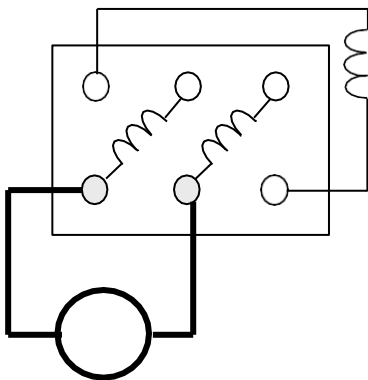
Figure I.13 : Test des enroulements

B. Contrôle d'isolement des bobinages entre eux

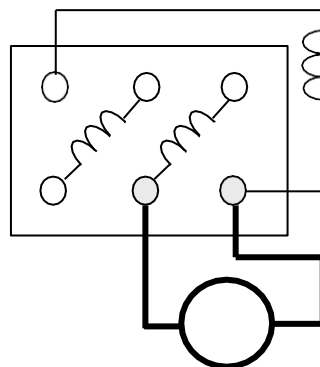
Le contrôle d'isolement des bobinages vise à s'assurer qu'aucun courant ne fuit entre les différentes phases du moteur. Ce test garantit que les enroulements sont bien isolés entre eux. À l'aide d'un ohmmètre réglé sur une plage élevée, on mesure la résistance entre les bornes (U1-V1, V1-W1, U1-W1). Une résistance très élevée ou infinie confirme un bon isolement, tandis qu'une valeur basse révèle un défaut d'isolement, susceptible de provoquer des courts-circuits ou des pannes du moteur. [6]

Matériel utilisé : ohmmètre calibré sur une grande échelle (1 M ohms)

Entre U1 et V1



Entre V1 et W1



Entre U1 et W1

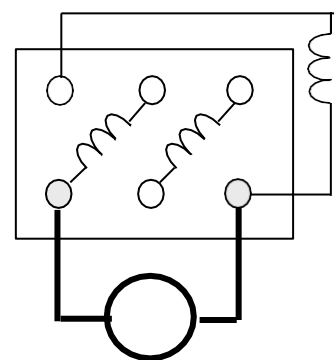


Figure I.14 : Test d'isolement entre phases

C. Contrôle d'isolement entre les bobinages et la masse du moteur

Le contrôle de l'isolation entre les bobines et le châssis du moteur vise à s'assurer qu'il n'y a aucune fuite de courant vers les parties métalliques. Ce test est d'une importance capitale pour garantir la sécurité des utilisateurs et prévenir les pannes électriques de l'équipement. Il est réalisé à l'aide d'un ohmmètre capable d'appliquer une tension électrique élevée, également appelé mégohmmètre, généralement de 500 volts. Une résistance élevée est le signe d'une isolation satisfaisante, tandis qu'une valeur faible indique un défaut potentiel, pouvant entraîner des fuites électriques ou un risque d'électrocution. [6]

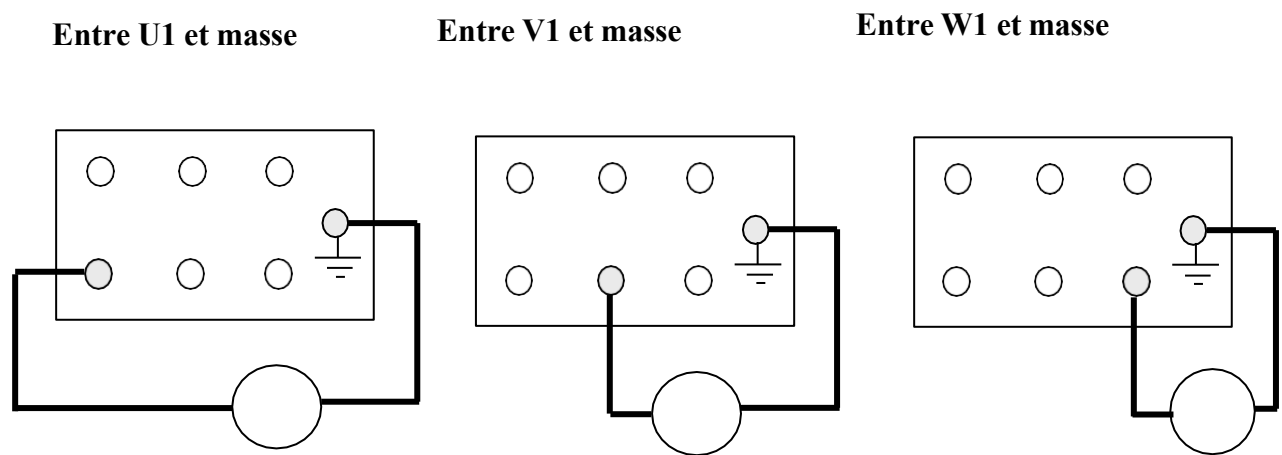


Figure I.15 : Test d'isolement à la masse

1.7.2.3 Contrôle après démontage

Le contrôle après démontage vise à analyser en détail les divers composants du moteur une fois qu'ils ont été démontés. Cette étape est essentielle pour identifier les défauts apparents tels que l'usure, les fissures ou les détériorations. Elle repose principalement sur des vérifications basées sur les sens, notamment l'observation visuelle, l'odorat, l'écoute et le toucher, afin d'évaluer précisément l'état général des pièces comme le rotor, le stator ou encore les roulements. [5]

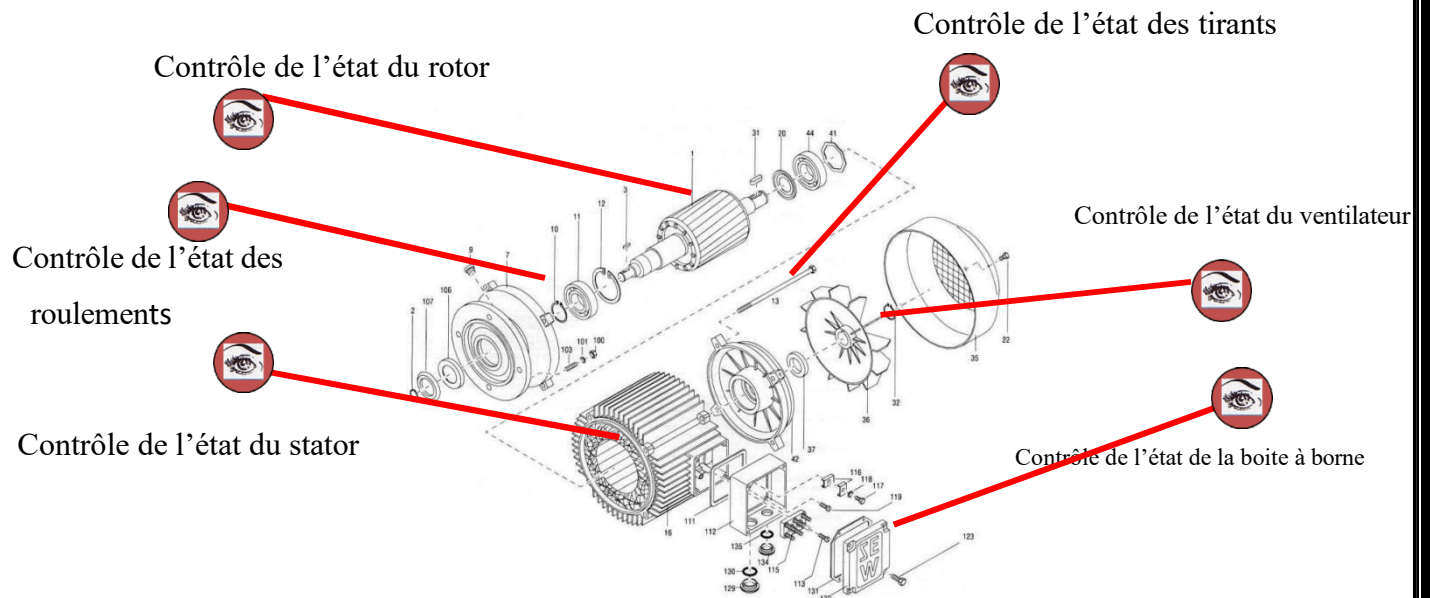


Figure I.16 : Contrôle des pièces internes du moteur

1.8 Traitement des données par les capteurs

Assurer le bon fonctionnement du moteur et éviter les pannes nécessite une surveillance constante de ses paramètres grâce à des capteurs. L'interprétation des données collectées par ces dispositifs permet non seulement d'identifier les anomalies, mais aussi d'améliorer l'efficacité des opérations de maintenance. [5]

1.8.1 Les capteurs utilisés

1.8.1.1 Capteur de température

Le capteur de température est utilisé pour surveiller la chaleur au niveau des enroulements ou des paliers du moteur. Une élévation inhabituelle de la température peut révéler une surcharge, un problème d'isolation ou un dysfonctionnement du système de refroidissement. [6]

1.8.1.2 Capteur de courant

Le capteur de courant sert à mesurer l'intensité électrique utilisée par le moteur. L'étude du courant permet d'identifier des anomalies comme les courts-circuits, les déséquilibres de phases ou les défaillances au niveau du rotor. [6]

1.8.1.3 Capteur de vibration

Le capteur de vibration sert à surveiller l'état mécanique du moteur. Des niveaux élevés de vibrations peuvent indiquer des anomalies telles qu'un déséquilibre, un mauvais alignement ou un problème au niveau des roulements. [5]

1.8.1.4 Capteur de vitesse

Le capteur de vitesse sert à mesurer la rotation du moteur. Une fluctuation inhabituelle pourrait révéler un problème de charge ou un dysfonctionnement du système. [6]

1.8.2 Acquisition et traitement des données

Les données provenant des capteurs sont initialement récoltées à l'aide de systèmes d'acquisition conçus pour convertir les signaux analogiques en données numériques prêtes à être analysées. Par la suite, elles sont traitées grâce à des techniques spécifiques, comme le filtrage pour supprimer les interférences et l'analyse spectrale (FFT) pour détecter d'éventuelles anomalies. Ce procédé offre une meilleure compréhension du fonctionnement du moteur et facilite l'identification précoce des défauts

1.9 Conclusion

Nous avons présenté une description générale du module GL1Z et des méthodes de maintenance des moteurs asynchrones, en nous appuyant sur les connaissances acquises précédemment grâce à ce module.

Passons maintenant au deuxième chapitre, où nous allons étudier et modéliser le moteur asynchrone.

Chapitre 2

Conception et Modélisation de la Machine
Asynchrone

2 Chapitre : Conception et Modélisation de la Machine Asynchrone

2.1 Introduction

La modélisation mathématique d'une machine asynchrone est essentielle pour mieux comprendre comment elle se comporte en mouvement et pour évaluer ses performances. Elle aide aussi à simuler différents modes de fonctionnement, que la machine soit en bon état ou en panne. Dans ce chapitre, on va expliquer comment le moteur asynchrone est construit, en particulier le stator et le rotor, et on va présenter le modèle mathématique qui décrit comment il fonctionne.

2.2 Conception et Constitution Détaillée de la MAS

La Machine Asynchrone (MAS) convertit l'énergie électrique en énergie mécanique par induction électromagnétique. Elle se compose de deux parties principales stator et rotor séparées par un entrefer.

2.2.1 Constitution de la machine Asynchrone à cage d'écureuil

2.2.1.1 Le Stator

C'est la partie fixe, reliée au réseau électrique triphasé.

- **La Carcasse :** Enveloppe extérieure (souvent en fonte ou aluminium) qui sert de support mécanique et de dissipateur thermique (munie d'ailettes de refroidissement).
- **Le Circuit Magnétique Statorique :** Formé d'un empilage de tôles d'acier au silicium (0.3 à 0.5 mm d'épaisseur), isolées par un vernis pour minimiser les pertes par courants de Foucault et hystérésis.
- **Les Encoches :** Rainures découpées à l'intérieur du circuit magnétique.
- **Les Enroulements (Bobinages) :** Trois ensembles de bobines (phases *a*, *b*, *c*) décalées spatialement de 120° électriques. Alimentées en courant alternatif, elles créent un **champ magnétique tournant** à la vitesse de synchronisme (Théorème de Ferraris).
[7]

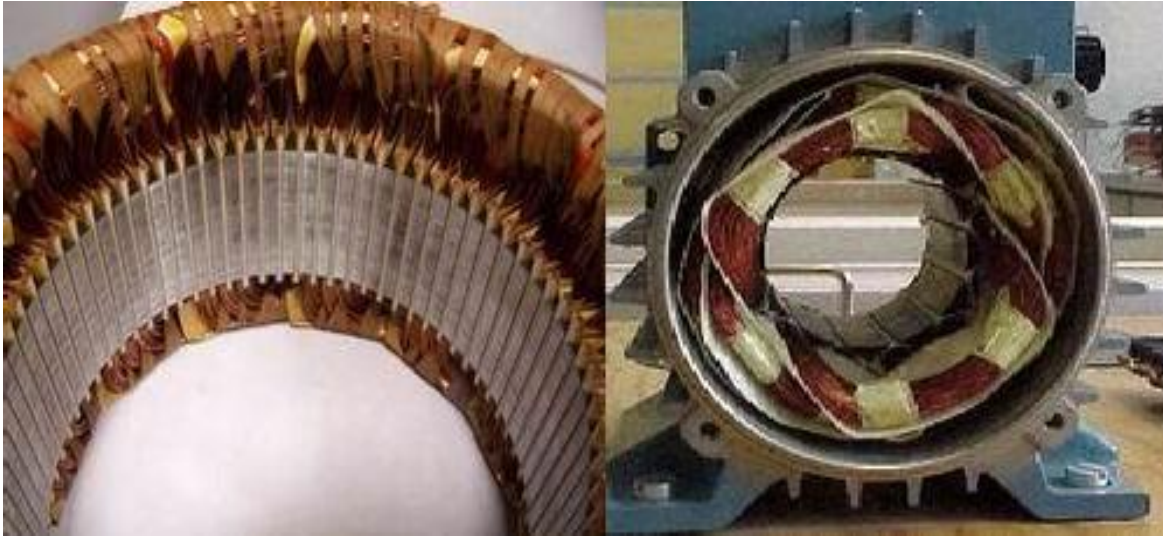


Figure II.1 : Le stator

Le stator d'un moteur triphasé (le plus courant en moyenne et grosse puissance), comme son nom l'indique, est la partie statique du moteur asynchrone. Il se compose principalement :

- De la carcasse,
- Des paliers,
- Des flasques de palier,
- Du ventilateur refroidissant le moteur,
- Le capot protégeant le ventilateur.

2.2.1.2 Le Rotor à Cage d'Écureuil

C'est la partie tournante. Le rotor à cage est privilégié dans l'industrie pour son absence de contacts glissants (pas de balais), ce qui le rend très robuste.

Le Circuit Magnétique Rotorique : Empilage de tôles magnétiques fixées sur l'arbre moteur.

La Cage d'Écureuil : Au lieu de fils de cuivre, les encoches contiennent des **barres conductrices massives** (aluminium ou cuivre).

Les Anneaux de Court-Circuit : Aux deux extrémités, les barres sont soudées à deux anneaux métalliques, les mettant toutes en court-circuit. Le champ tournant du stator induit des courants dans cette cage, créant un champ rotorique qui, en interagissant avec celui du stator, génère le mouvement.

Le rotor est la partie mobile du moteur asynchrone. Couplé mécaniquement à un treuil d'ascenseur par exemple, il va créer un couple moteur capable de fournir un travail de montée et de descente de la cabine d'ascenseur. Il se compose essentiellement :

- D'un empilage de disques minces isolés entre eux et clavetés sur l'arbre du rotor afin de canaliser et de faciliter le passage du flux magnétique.
- D'une cage d'écureuil en aluminium coulé dont les barreaux sont de forme trapézoïdale pour les moteurs asynchrones standards et fermés latéralement par deux "flasques" conductrices. [8]

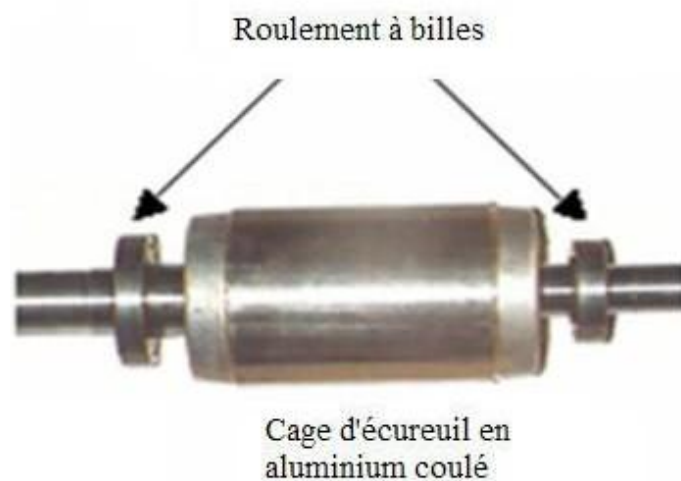
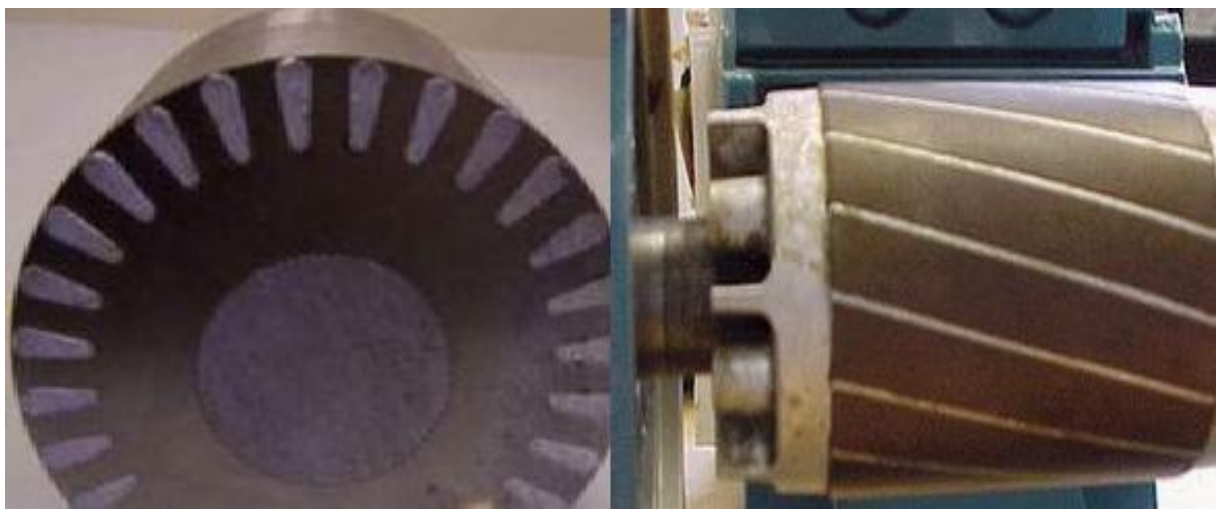


Figure II.2 : Le Rotor à Cage d'Écureuil

2.2.2 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone repose :

D'une part sur la création d'un courant électrique induit dans un conducteur placé dans un champ magnétique tournant. Le conducteur en question est un des barreaux de la cage d'écureuil ci-dessous constituant le rotor du moteur. L'induction du courant ne peut se faire que si le conducteur est en court-circuit (c'est le cas puisque les deux bagues latérales relient tous les barreaux).

D'autre part, sur la création d'une force motrice sur le conducteur considéré (parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique tournant ou variable) dont le sens est donné par la règle des trois doigts de la main droite. [9]

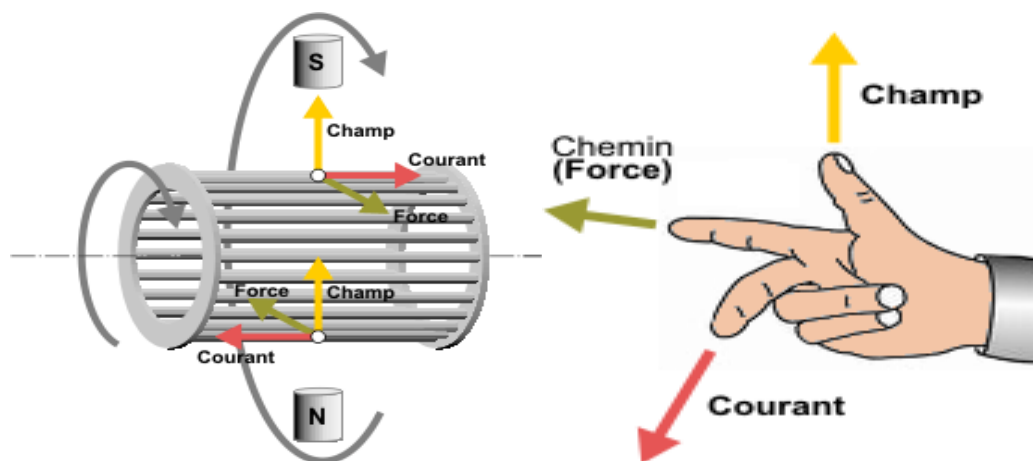


Figure II.3 : Règle de la main droite

Comme montré sur le schéma ci-dessus, le champ tournant, à un instant donné, est orienté vers le haut. En considérant deux conducteurs diamétralement opposés, on constate que les courants induits dans ces deux conducteurs sont en sens inverse et, associés au champ magnétique, créent des forces motrices en sens inverse. Le rotor étant libre de tourner sur l'axe X-Y, les deux forces s'associent pour imprimer aux deux conducteurs un couple permettant la rotation de la cage d'écureuil. Dans un moteur asynchrone, c'est le champ magnétique qui varie sous forme de champ tournant créé dans le stator. [7]

2.3 Les Modèle Mathématique de la MAS

Dans ce chapitre nous nous intéresserons à la modélisation de la machine asynchrone par : La mise en équation de la machine asynchrone à partir d'hypothèses simplificatrices Suivantes :

- La perméabilité du fer est infinie.
- L'enroulement statorique est identique par rapport à l'axe de symétrie.
- Les barres rotoriques sont uniformément distribuées.
- Les saturations, les courants de Foucault, le frottement et l'effet de Peau sont négligés.
- Les ouvertures des encoches et les inclinaisons ne sont pas prises en compte.
- Le rotor est considéré comme un ensemble de mailles, interconnectées entre elles, chacune formée par deux barres adjacentes, reliées par deux portions d'anneaux (fig. II.2). [9]

2.3.1 Mise en équations de la MAS

2.3.1.1 Equations des tensions et flux statoriques

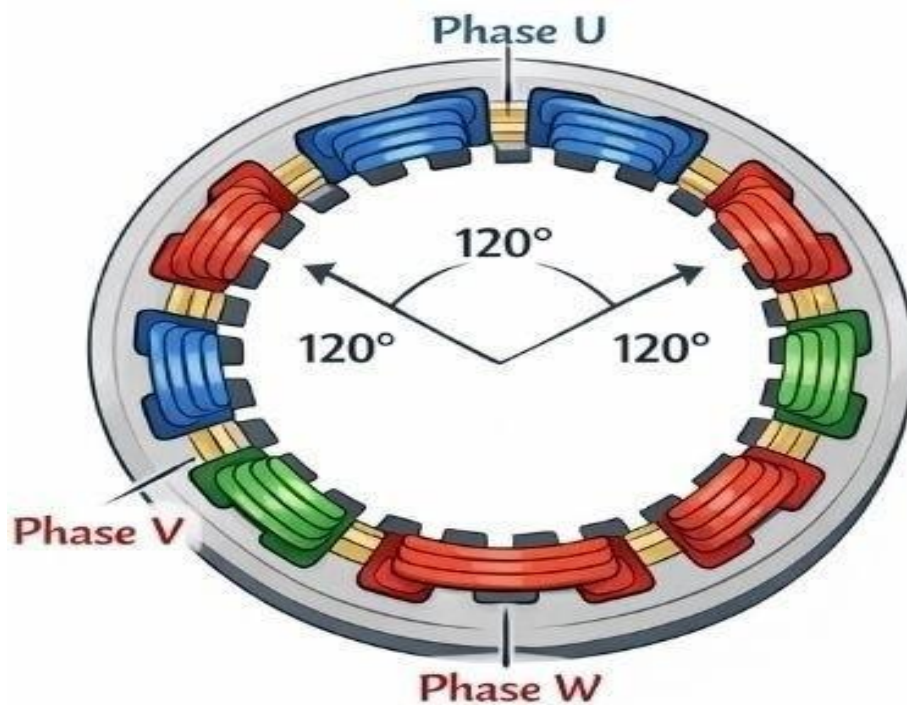


Figure II.4: Schema stator triphasé

Les équations en tensions des trois phases statoriques s'écrivent alors :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d[\psi_s]}{dt} \quad (1)$$

La matrice du flux statorique est donnée par :

$$[\psi_s] = [L_{ss}][I_s] + [L_{sr}][I_r] \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{sa} \\ L_{sb} \\ L_{sc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{ra} \\ M_{rb} \\ M_{rc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Les vecteurs des tensions et des courants de phases statoriques et celui des courants rotoriques sont respectivement donnés par :

$$[V_s] = [v_{sa} \quad v_{sb} \quad v_{sc}]^T \quad (4)$$

$$[I_s] = [i_{sa} \quad i_{sb} \quad i_{sc}]^T \quad (5)$$

$$[I_r] = [i_{r1} \quad i_{r2} \quad i_{r3} \quad \dots \quad i_{rn} \quad i_e]^T \quad (6)$$

- Les valeurs des inductances propres et mutuelles sont indépendantes des intensités des courants.
- Les pertes fer et les pertes par hystérésis et par courants de Foucault sont nulles.
- La répartition dans l'entrefer de la force magnétomotrice et celle du flux sont sinusoïdales.

2.3.1.2 Equations des tensions et flux rotoriques

La cage d'écureuil est constituée de n_b barres, reliées entre elles à chaque extrémité du rotor par les anneaux de court-circuit, elle peut donc se représenter par un circuit maillé ou chaque maille est constituée de deux barres adjacentes, les deux portions d'anneaux les relient à chaque extrémité.

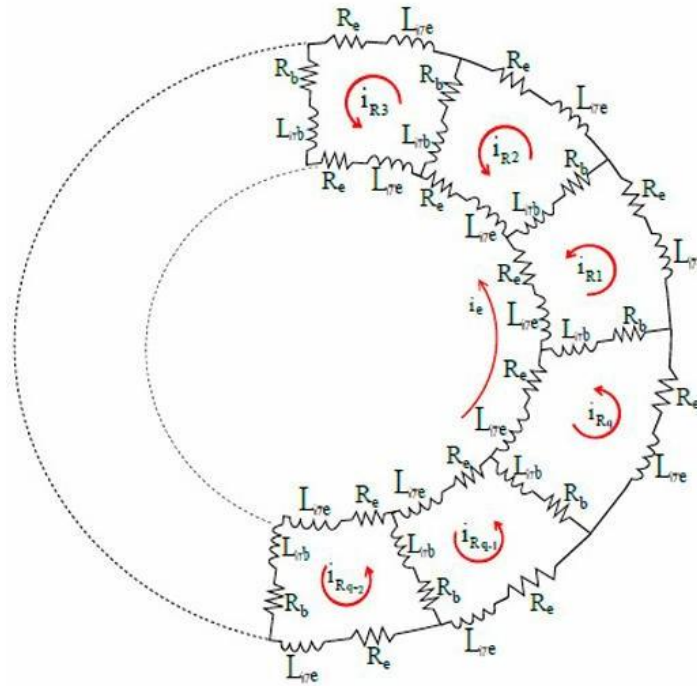


Figure II.5 Circuit équivalent du rotor à cage d'écureuil.

La modélisation de la cage rotorique consiste à écrire les équations des tensions de n_b mailles parcourues par n_b courants indépendants [8]. A partir de la figure II.5 on tire les équations des tensions des mailles rotoriques :

$$[V]_r = [R]_r [I]_r + \frac{d[\psi_r]}{dt} \quad (7) \quad [9]$$

$$[V_r] = [v_{r1} \quad v_{r2} \quad v_{r3} \quad \dots \quad v_{mb} \quad i_e]^T \quad (7.1)$$

Dans le cas d'un moteur à cage, la tension de l'anneau v_e est nulle, ainsi que les tensions des mailles rotoriques. $v_{rk} = 0$

Avec :

$$K=0,1,2,3 \dots n_b$$

Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & 0 & 0 \\ 0 & L_r & 0 \\ 0 & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{sr} \\ M_{sr} \\ M_{sr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Tel que :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]$$

Où :

$[L_s]$: Matrices des inductances statoriques.

$[L_r]$: Matrices des inductances rotoriques.

$[M_{sr}]$: Matrices des inductances mutuelles statoriques.

$[M_{rs}]$: Matrices des inductances mutuelles rotoriques.

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}] = M_0 \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (11)$$

Avec :

θ : Angle électrique définit la position relative instantanée entre les axes statoriques et les axes rotoriques qui sont choisis comme axes des références.

M_0 : Maximum de l'inductance mutuelle entre phase du stator et la phase Correspondent du rotor.

2.3.1.3 Equations mécaniques

L'équation mécanique de la machine est donnée par :

$$C_{em} = J \frac{d\Omega}{dt} + C_r + f\Omega \quad (12) \quad [10]$$

Avec :

C_{em} : le couple électromagnétique.

C_r : le couple résistant.

f : coefficient de frottement.

J : moment d'inertie du rotor.

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, on a expliqué comment est construite la machine asynchrone et on a aussi créé son modèle mathématique. Ce modèle aide à comprendre comment le moteur fonctionne vraiment. C'est un outil précieux pour faire des simulations et étudier les défauts, que l'on verra en détail dans le prochain chapitre.

Chapitre 3

Simulation et Analyse Des Défauts

3 Chapitre : simulation et analyse des défauts

3.1 Introduction Générale du Chapitre

L'objectif principal de ce chapitre est de concevoir et de valider une plateforme de simulation numérique avancée sous l'environnement MATLAB pour analyser le comportement dynamique d'une machine asynchrone triphasée (moteur à induction) en régime sain et en présence de défauts. Contrairement aux approches classiques basées sur des blocs de simulation pré-configurés, ce modèle est entièrement développé par script à partir des équations différentielles fondamentales et matricielles de la machine. Cette approche par programmation directe permet un contrôle absolu sur les paramètres internes du moteur (résistances, inductances propres et mutuelles, inertie) et offre la flexibilité nécessaire pour injecter de manière isolée ou combinée des anomalies sévères.

Afin de structurer notre méthodologie de diagnostic non invasif, deux grandes catégories de perturbations sont introduites dans le système : les anomalies de l'alimentation électrique externe (représentées par des chutes de tension équilibrées de sévérité croissante) et les pannes mécaniques internes au rotor (représentées par des ruptures de barres rotoriques). Les signaux de courant statorique obtenus en régime permanent sont ensuite analysés à travers deux dimensions complémentaires l'Analyse **Fréquentielle par FFT** (pour détecter les signatures spectrales et harmoniques) et l'Analyse **Temporelle** (pour observer les formes d'onde brutes, l'enveloppe RMS et les trajectoires géométriques de Park). Cette double approche permet de dresser une cartographie complète des signatures visuelles de la machine, constituant un jeu de données standardisé idéal pour l'apprentissage et la classification automatique par une intelligence artificielle (telle que Google Teachable Machine).

3.2 Analyse Fréquentielle par FFT

3.2.1 Introduction à l'Analyse Fréquentielle

L'analyse fréquentielle repose sur la Transformée de Fourier Rapide (FFT), un outil mathématique qui extrait les composantes fréquentielles cachées dans un signal temporel brut. En appliquant la FFT aux courants statoriques et en convertissant l'échelle de puissance en décibels (dB) normalisée à 0 dB sur le pic principal, nous mettons en œuvre la technique de surveillance de la signature du courant moteur (MCSA - *Motor Current Signature Analysis*). Cette méthode permet d'identifier l'état du système en associant chaque anomalie à l'émergence ou à la redistribution d'harmoniques spécifiques sur le spectre.

3.2.2 Signature de la Machine Parfaite Référence

Sous des conditions nominales de fonctionnement et d'alimentation stable

($V_m = 220\text{ V}$), le spectre FFT de la machine saine représente l'état idéal d'équilibre électromécanique. Sur le plan théorique comme pratique, le courant est une sinusoïde pure, ce qui se traduit sur le spectre FFT par un pic unique, net et dominant localisé précisément à la fréquence fondamentale du réseau, soit $f_s = 50\text{ Hz}$. Toutes les bandes fréquentielles adjacentes sont idéalement propres. Il convient de préciser que les infimes pics secondaires ou légères oscillations visibles dans le fond du spectre ne traduisent aucune anomalie physique sur ce cas de référence ; ils proviennent uniquement des tolérances numériques du script MATLAB, des pas de calcul du solveur à pas fixe et des effets de troncature mathématique lors de l'application de la FFT. Ce profil constitue donc notre modèle parfait et notre ligne de base pour les comparaisons.

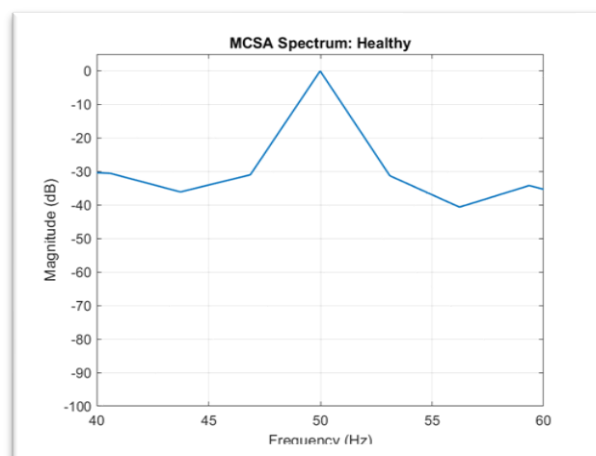


Figure III.1 FFT de la machine saine

3.2.3 Cas de la Chute de Tension d'Alimentation

Pour simuler les instabilités et les baisses de qualité de l'énergie du réseau électrique externe, le script de simulation est configuré pour modifier le paramètre de tension crête d'entrée (V_m) sans altérer la symétrie des phases. Trois scénarios de sévérité distincts sont injectés successivement :

- Une chute de tension de **10%** ($V_m = 198V$)
- Une chute de tension de **20%** ($V_m = 176V$)
- Une chute de tension de **30%** ($V_m = 154V$)

Pour chaque scénario, le moteur fonctionne sous sa charge nominale $T_c = 15 \text{ N. m}$. L'extraction de la FFT est réalisée sur deux fenêtres distinctes : une fenêtre basse fréquence de **100 Hz** pour surveiller la zone de la fréquence fondamentale, et une fenêtre étendue de **1000 Hz** pour analyser le comportement des harmoniques d'ordre supérieur et capter l'ensemble des phénomènes physiques induits.

3.2.4 Commentaires et Interpolation des Figures (Cas de la Chute de Tension)

3.2.4.1 Interpolation dans la bande des 100 Hz (Zoom Fondamental)

Cette fenêtre d'observation centrée sur la zone de 0 à 100 Hz permet de vérifier l'état d'équilibre électrique autour de la fréquence fondamentale de 50 Hz.

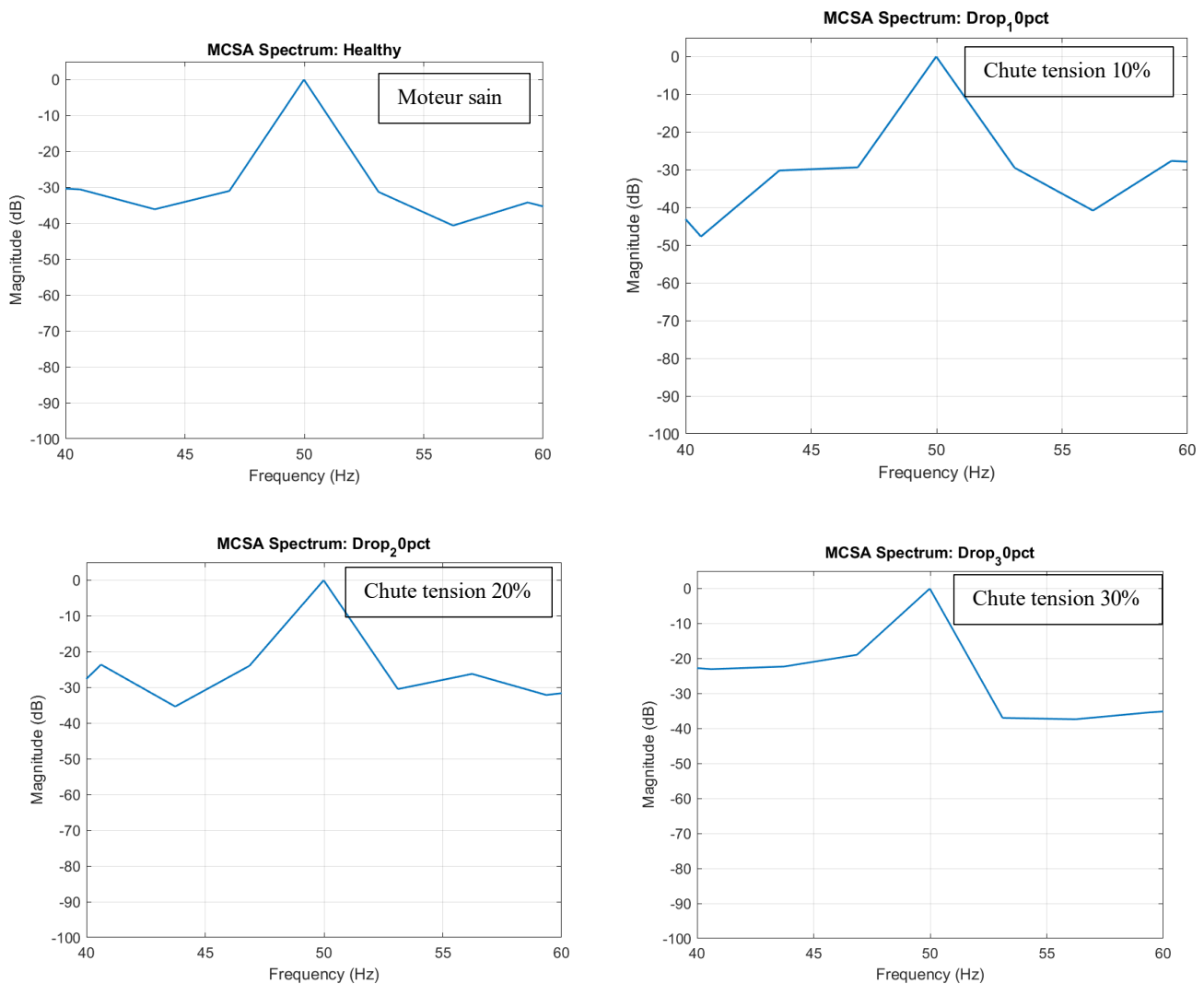


Figure III.2: spectre FFT zoomé de la Chute de Tension (0 - 100 Hz)

Commentaires et Analyse (0 - 100 Hz) : L'interpolation visuelle des quatre spectres FFT montre que la chute de tension équilibrée préserve la pureté harmonique de la zone fondamentale. En faisant abstraction des infimes bruits de calcul du cas sain, on constate qu'aucun pic de modulation parasite n'apparaît aux fréquences de défaut typiques (pas de pics asymétriques à 46 Hz ou 54 Hz). Le spectre conserve un comportement centralisé autour du pic unique de 50 Hz. Cela démontre que tant que la baisse de tension reste parfaitement équilibrée sur les trois phases, le système d'alimentation ne rompt pas la symétrie magnétique de la machine dans sa bande fondamentale.

3.2.4.2 Interpolation dans la bande étendue des 1000 Hz (Haute Fréquence)

L'élargissement du spectre FFT jusqu'à 1000 Hz met en évidence des modifications globales complexes et des anomalies spectrales notables lorsque la sévérité du défaut augmente.

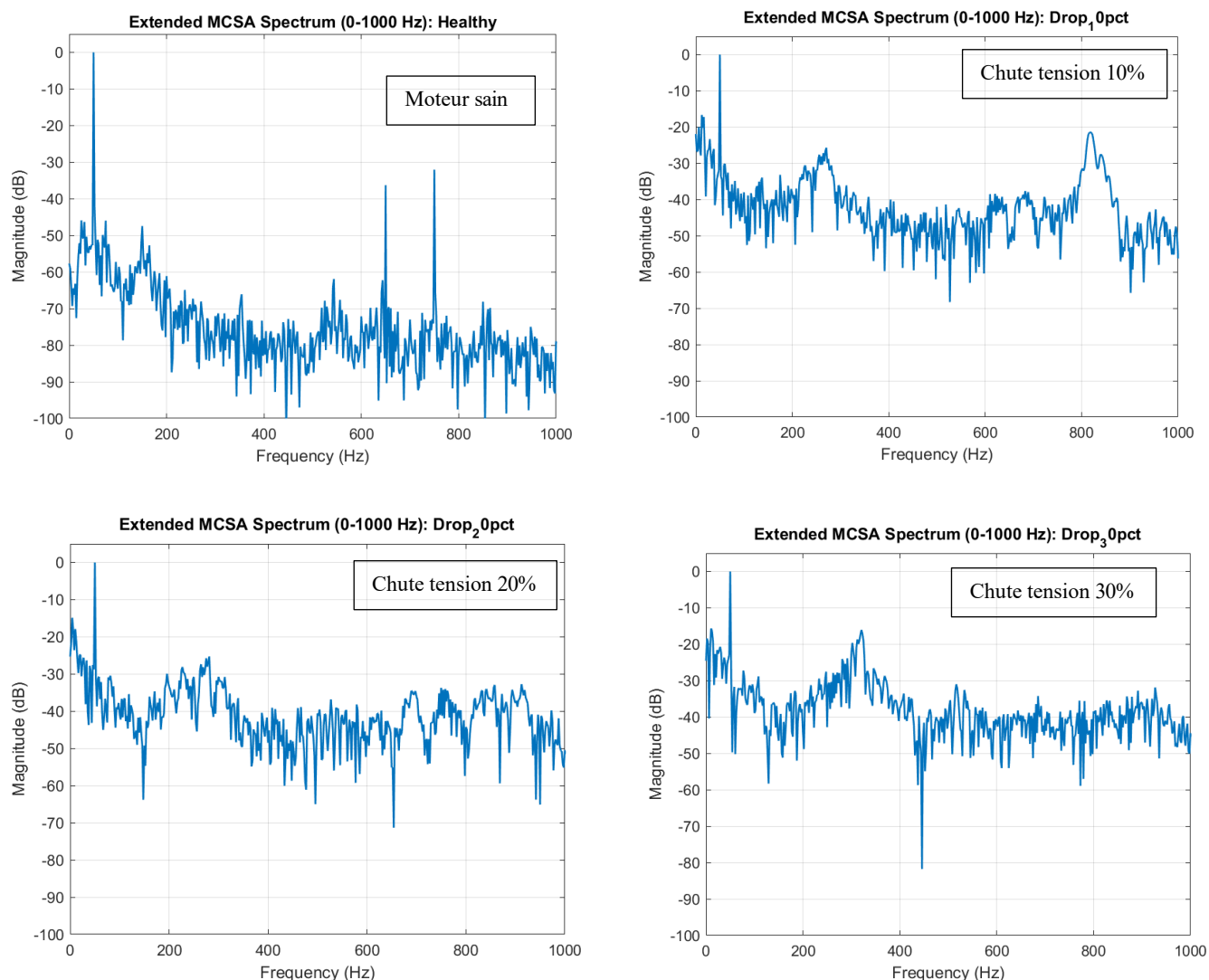


Figure III.3 côte à côte : spectre FFT zoomé du Chute de Tension (0 - 1000 hz)

Commentaires et Analyse Approfondie des Anomalies (0 - 1000 Hz) : En analysant en profondeur le spectre étendu, on observe des déformations géométriques importantes qui s'intensifient avec la sévérité de la chute de tension :

1. **L'émergence des anomalies à haute fréquence :** Alors que la machine saine présente un profil linéaire et parfaitement stable sur toute la plage de 1000 Hz, les cas de chute de tension font apparaître des réorganisations d'énergie majeures. Sur le graphique à **10%**, on distingue une anomalie spectrale très nette sous la forme d'une large "bosse" ou concentration d'énergie localisée entre 800 Hz et 850 Hz.
2. **Amplification et décalage à 20% et 30% :** À **20%** et **30%**, cette distribution d'énergie se modifie, se fragmente et se déplace sur l'axe fréquentiel, créant des ondulations et des variations de plancher harmonique plus prononcées.

3. **Explication physique et comportement du modèle :** Cette déformation globale n'indique pas une défaillance mécanique interne, mais s'explique par un phénomène double. D'une part, lorsque la tension chute sous une charge constante (15 N.m), le moteur subit une baisse de vitesse et donc une augmentation significative de son glissement (s). Ce changement de vitesse décale naturellement les fréquences des harmoniques d'encoches rotoriques naturelles. D'autre part, la forte non-linéarité des équations différentielles du modèle, excitée par une tension faible, engendre des résonances numériques au sein du solveur MATLAB à pas fixe. L'IA peut donc utiliser cette déformation globale haute fréquence comme un descripteur précis pour quantifier le niveau de baisse de la tension réseau.

3.2.5 Conclusion Spécifique aux Scénarios de Chute de Tension

En conclusion, la chute de tension équilibrée se caractérise par une signature spectrale double : une pureté harmonique totale maintenue dans la zone fondamentale des 50 Hz (absence de pics de défaut isolés) combinée à une déformation structurelle globale du plancher spectral à haute fréquence (0 - 1000 Hz) induite par la hausse du glissement et les couplages du solveur. Cette combinaison unique permet d'isoler à 100% les perturbations de tension des autres pannes.

3.2.6 Cas du Défaut de Barres Rotoriques Cassées

Pour analyser le comportement de la machine face à des défaillances mécaniques internes, le modèle mathématique intègre la modification directe de la matrice des résistances du rotor (R_r). En annulant le courant circulant dans des mailles spécifiques de la cage, on simule de manière très précise la rupture de barres successives. Trois scénarios de gravité croissante sont mis en œuvre :

- Rupture de **1 barre rotorique**
- Rupture de **2 barres rotoriques**
- Rupture de **3 barres rotoriques**

Les simulations sont menées dans les mêmes conditions de charge stable (15 N.m). Tout comme pour l'étude précédente, l'analyse FFT est extraite sur une plage zoomée de **100 Hz** et une plage étendue de **1000 Hz** afin de capturer l'ensemble des signatures harmoniques générées par l'asymétrie rotorique.

3.2.7 Commentaires et Interpolation des Figures (Cas des Barres Cassées)

3.2.7.1 Interpolation dans la bande des 100 Hz (Zoom Fondamental)

Cette zone est le secteur clé pour le diagnostic des pannes de cages rotoriques par MCSA.

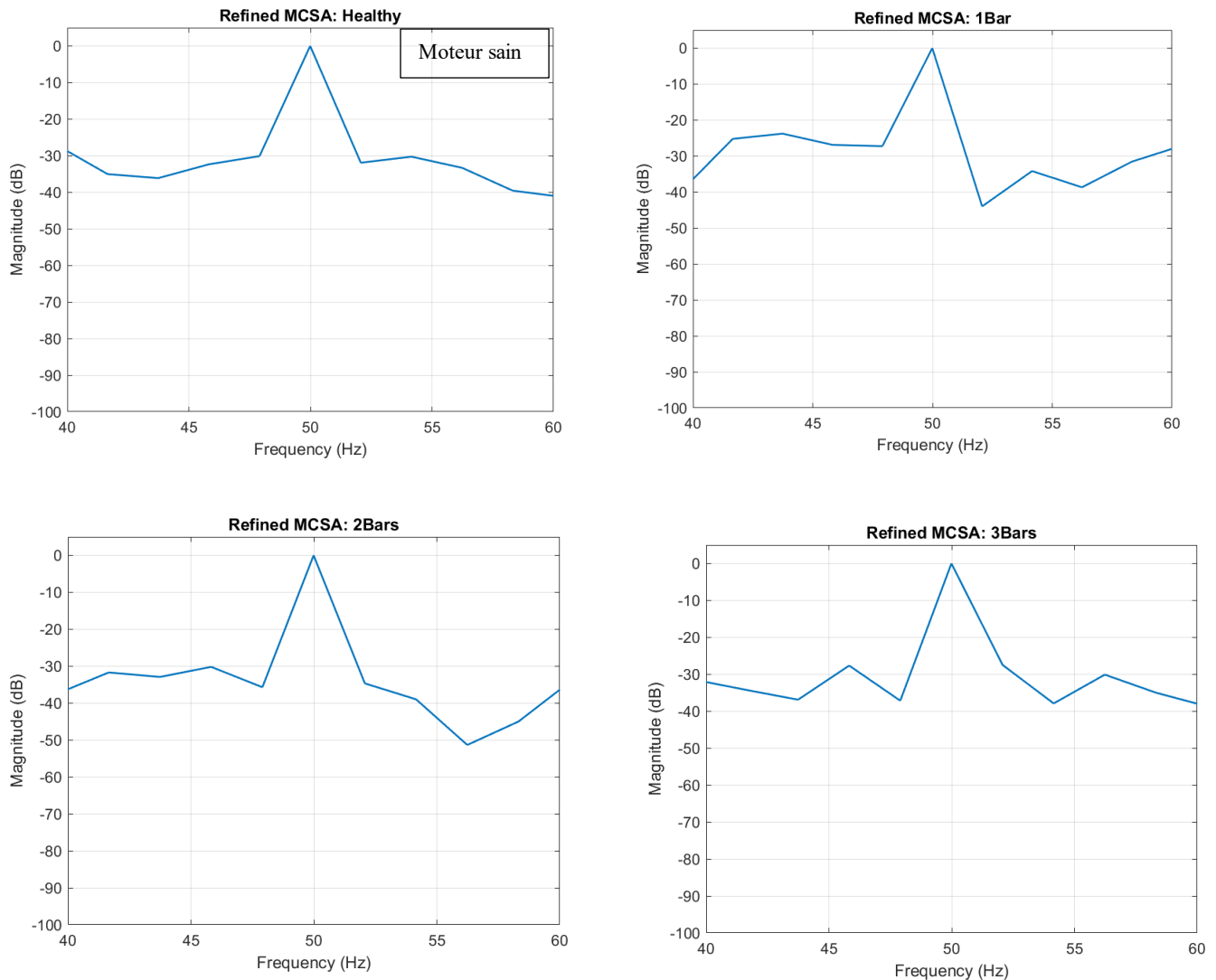


Figure III.4 côte à côte : spectre FFT zoomé du Bars Casses (0 - 100 hz)

Commentaires et Analyse (0 - 100 Hz) : L'interpolation visuelle des spectres met en évidence une rupture totale d'équilibre par rapport au cas de référence parfait. Dès l'apparition d'une seule barre cassée, le spectre FFT voit émerger deux pics harmoniques asymétriques très nets et parfaitement individualisés situés de part et d'autre de la fréquence fondamentale. Ces pics correspondent aux bandes latérales de défaut définies par la relation mathématique $f_{sb} = (1 \pm 2s) f_s$. À mesure que l'on progresse vers deux puis trois barres cassées, la rupture de symétrie

s'accroît : l'amplitude de ces pics parasites s'élève de manière drastique par rapport au bruit de fond (passant d'environ -45 dB à plus de -30 dB). Il s'agit d'un marqueur visuel et mathématique indiscutable du défaut mécanique.

3.2.7.2 Interpolation dans la bande étendue des 1000 Hz (Haute Fréquence)

L'extension de la FFT jusqu'à 1000 Hz permet d'évaluer l'impact des barres cassées sur les harmoniques d'encoches d'ordre supérieur.

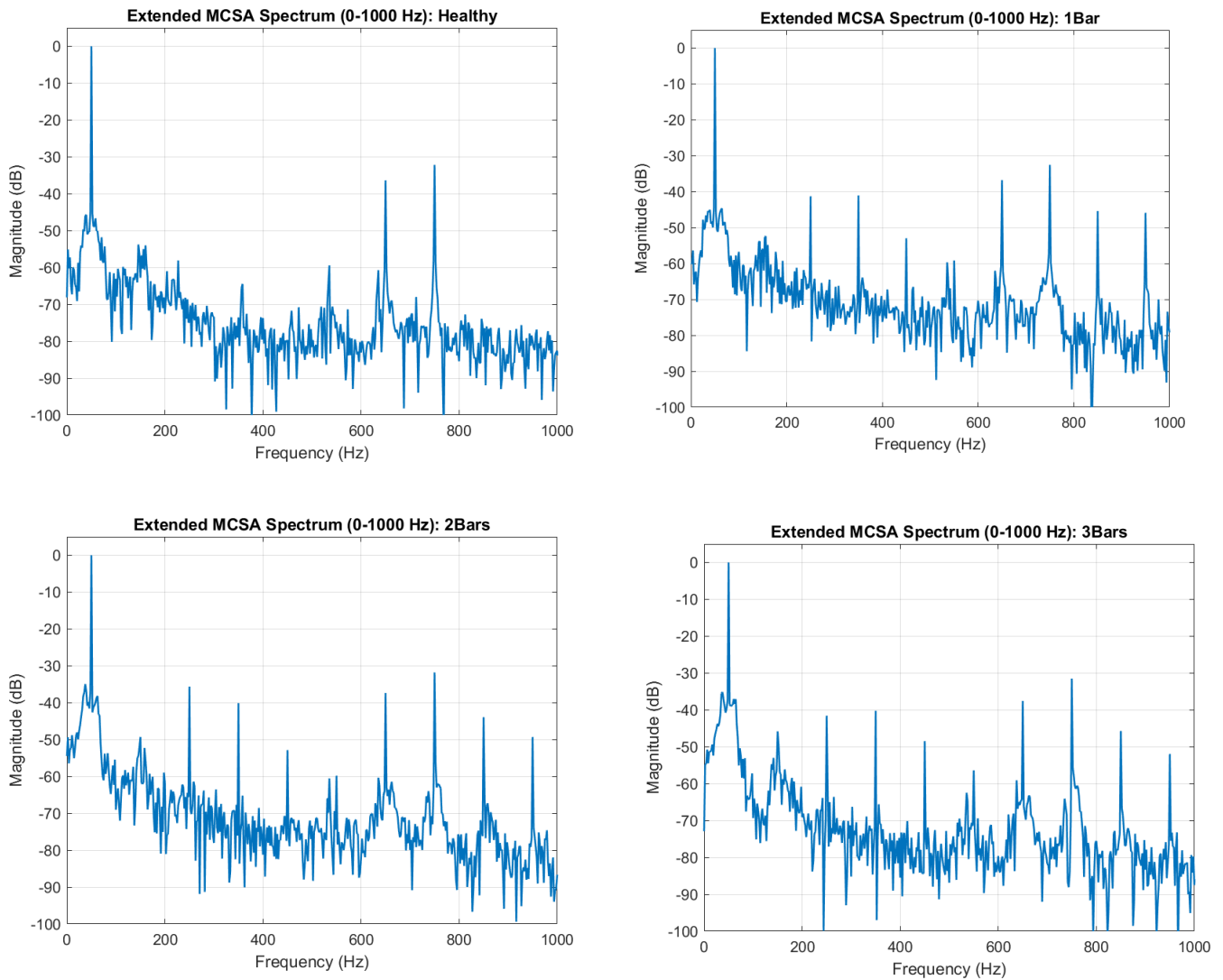


Figure III.5 côte à côte : spectre FFT zoomé du Bars Casses (0 - 1000 hz)

Commentaires et Analyse Approfondie (0 - 1000 Hz) : À haute fréquence, l'interpolation des courbes révèle que le défaut mécanique n'induit pas une simple distorsion diffuse du plancher comme la chute de tension, mais génère un véritable **peigne d'harmoniques discret**. Des familles de pics secondaires apparaissent de manière cyclique autour des zones de 100 Hz, 200 Hz et se prolongent jusqu'à 1000 Hz, suivant la loi des harmoniques d'ordre supérieur $fsb_high = (1 \pm 2ks)fs$. La hauteur de chaque raie de ce peigne est directement corrélée au nombre de barres rompues, traduisant graphiquement la distorsion sévère subie par le champ magnétique dans l'entrefer de la machine.

3.2.8 Conclusion Spécifique aux Scénarios de Barres Cassées

Le défaut de barres cassées se traduit par une signature fréquentielle unique caractérisée par l'apparition systématique et localisée de raies de défaut nettes aux fréquences de modulation $(1 \pm 2)fs$. autour du mode fondamental, complétée par un peigne d'harmoniques discret s'étendant jusqu'à 1000 Hz. Ces indicateurs pointus permettent d'identifier le défaut et de quantifier sa sévérité avec exactitude.

3.2.9 Conclusion Générale de l'Analyse des Spectres FFT

L'analyse fréquentielle par FFT s'avère être un outil de discrimination d'une efficacité remarquable. Elle permet de séparer distinctement les deux grandes familles de défauts : la chute de tension maintient la pureté de la zone centrale à 50 Hz mais altère globalement la haute fréquence par glissement, tandis que les barres cassées imposent des pics de défaut pointus et localisés à des positions fréquentielles strictes. La FFT fournit ainsi des signatures visuelles hautement différenciées, prêtes pour une classification automatique sans ambiguïté.

3.3 Analyse Temporelle

3.3.1 Introduction à l'Analyse Temporelle

Bien que le domaine fréquentiel excelle dans l'identification des harmoniques, l'analyse temporelle apporte une vision complémentaire indispensable en se focalisant sur l'évolution directe des amplitudes des signaux au cours du temps. En examinant les formes d'onde brutes des courants, l'évolution de leur enveloppe de valeur efficace (RMS) et les figures géométriques générées dans le plan biphasé par la transformation de Concordia/Park, nous pouvons capter des variations de symétrie et de puissance en temps réel, offrant un autre jeu d'empreintes visuelles pour notre outil de diagnostic.

3.3.2 Interpolation et Analyse des Formes d'Onde et des Enveloppes RMS

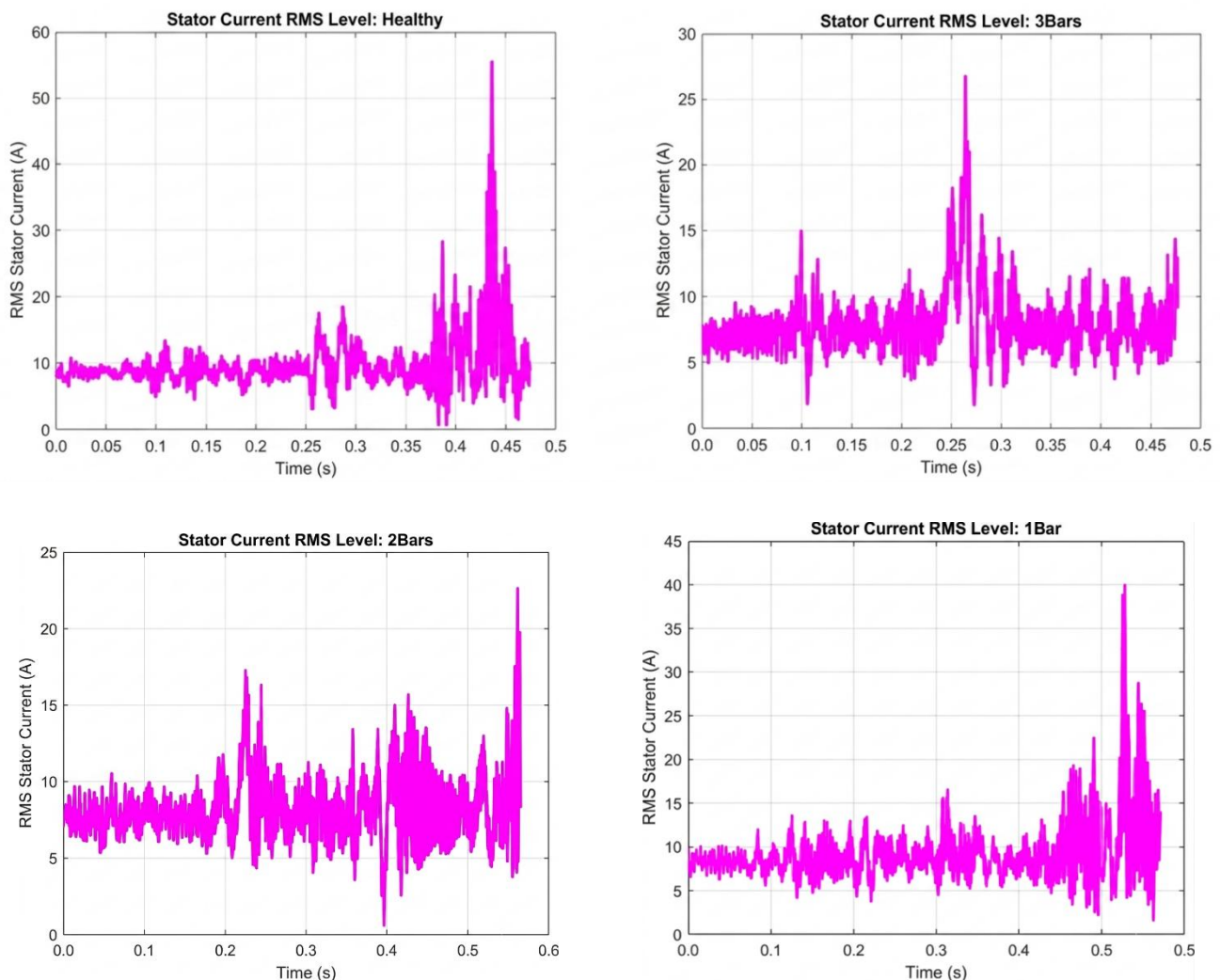


Figure III.6 évolution de l'enveloppe RMS temporelle, Barres Casses

Commentaires et Comparaison Temporelle : L'analyse des caractéristiques temporelles permet de dissocier immédiatement les défauts selon leur impact sur l'enveloppe du signal :

Comportement avec Barres Cassées : À l'inverse, le défaut mécanique rompt la régularité temporelle. Les ondes de courant subissent une fluctuation de leur amplitude de crête. L'enveloppe RMS calculée n'est plus du tout une ligne plate: elle présente une ondulation continue et cyclique (phénomène de *ripple*) oscillant à la basse fréquence de glissement $2s \text{ } f_s$ (avec s est le glissement et f_s fréquence du réseau). Cette ondulation temporelle traduit le passage répété des barres rompues devant les enroulements du stator.

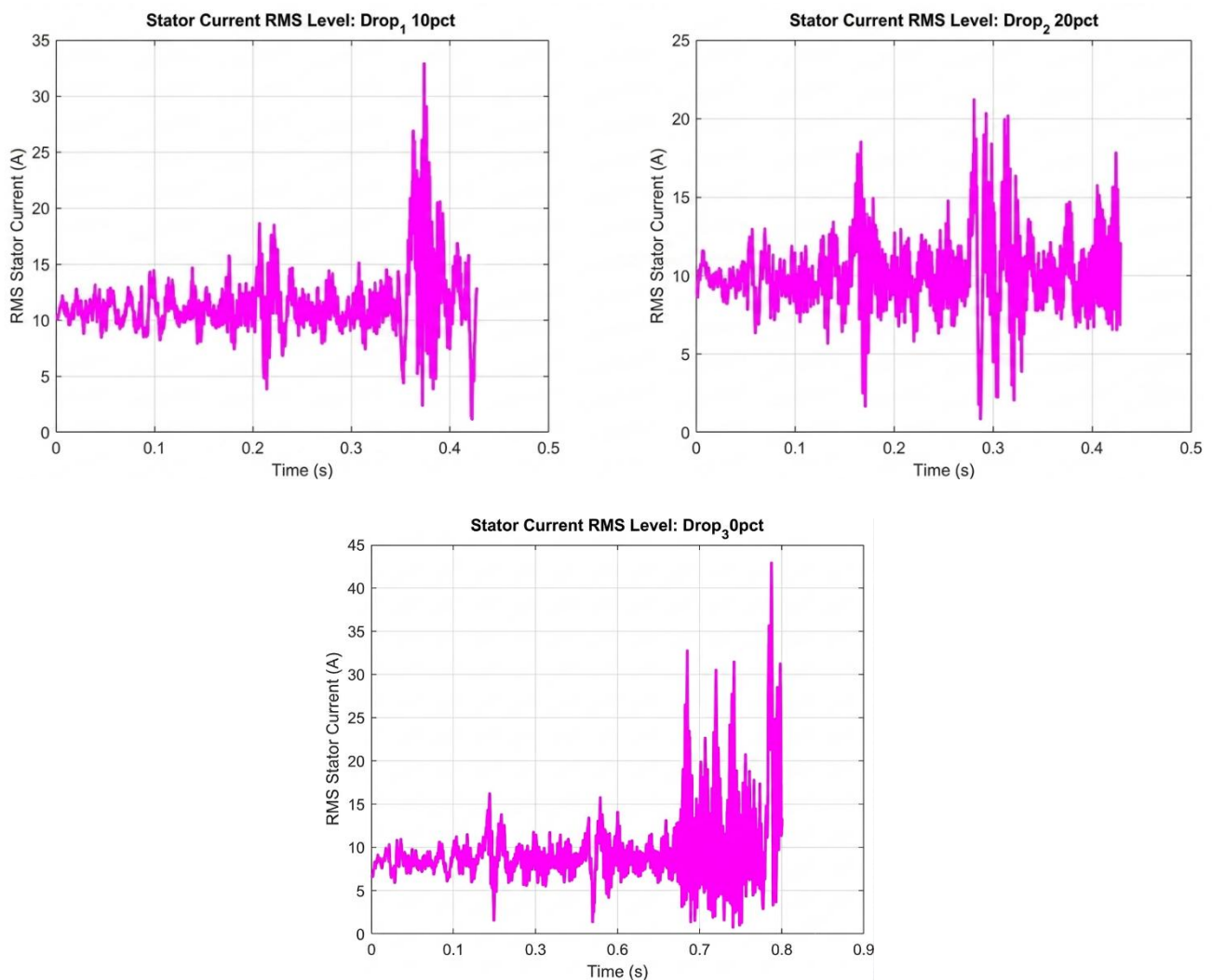


Figure III.7 évolution de l'enveloppe RMS temporelle , Chute de Tension

Comportement sous Chute de Tension : Lors d'une baisse de tension, les formes d'onde des courants statoriques restent des sinusoïdes parfaites et lisses. L'enveloppe RMS qui en découle demeure une ligne rigoureusement droite, plate et stable, exempte de toute oscillation. Cependant, cette ligne subit un saut scalaire brutal vers le bas sur l'axe vertical, proportionnel au pourcentage de la baisse de tension (10%, 20% ou 30%).

3.3.3 Interpolation et Analyse des Trajectoires du Vecteur de Park

La transformation de Concordia/Park projette les trois courants statoriques (i_a, i_b, i_c) dans un plan orthogonal bidimensionnel ($\alpha - \beta$), transformant les signaux temporels en figures géométriques spatiales.

Commentaires et Comparaison Géométrique : Le plan de Park fournit le livrable visuel le plus puissant pour une classification par intelligence artificielle (comme Google Teachable Machine), car il convertit les signatures physiques en formes géométriques simples à discriminer:

La Machine Saine : Elle dessine une trajectoire de référence parfaite sous la forme d'un cercle unique, d'un grand rayon nominal, dessiné par un trait d'une finesse et d'une netteté absolues.

La Chute de Tension : L'alimentation restant équilibrée, le tracé ne subit aucune déformation, aucune ovalisation, ni aucun élargissement flou. La trajectoire reste un cercle parfait et mince, mais son diamètre **réduit de façon concentrique**. Plus le pourcentage de chute de tension augmente (10% à 30%), plus le cercle rétrécit, formant un ensemble de cercles concentriques emboîtés dont le rayon indique directement la santé du réseau électrique.

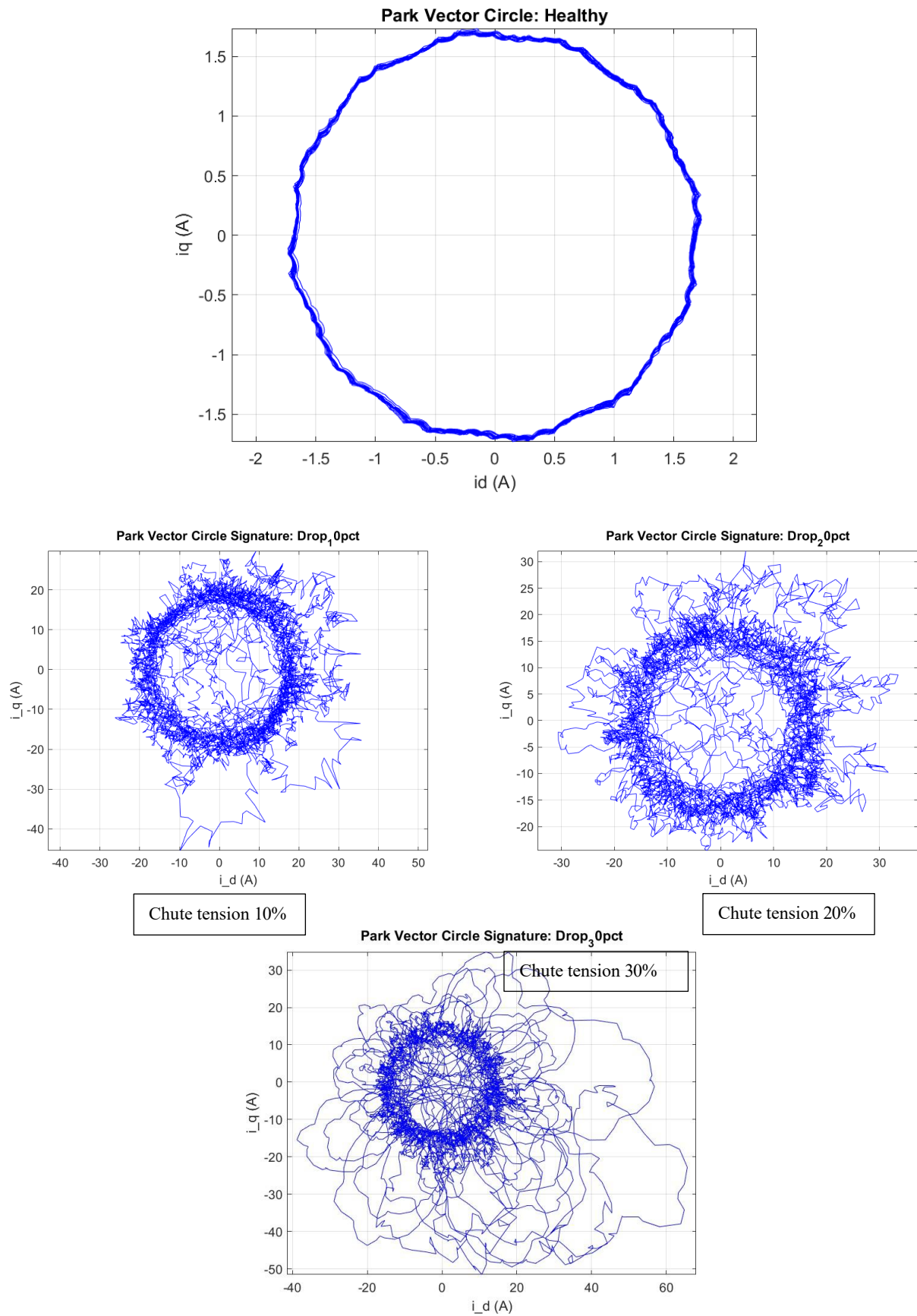


Figure III.8 Trajectoires géométriques de Park , Chute de Tension

Les Barres Cassées : La rupture mécanique induit une modulation d'amplitude constante qui brise la régularité du cercle. Le tracé commence à dévier, se superpose de manière désordonnée et s'élargit pour former un anneau **épais, dense et flou**. L'épaisseur de cet anneau géométrique est directement proportionnelle au nombre de barres cassées dans le rotor.

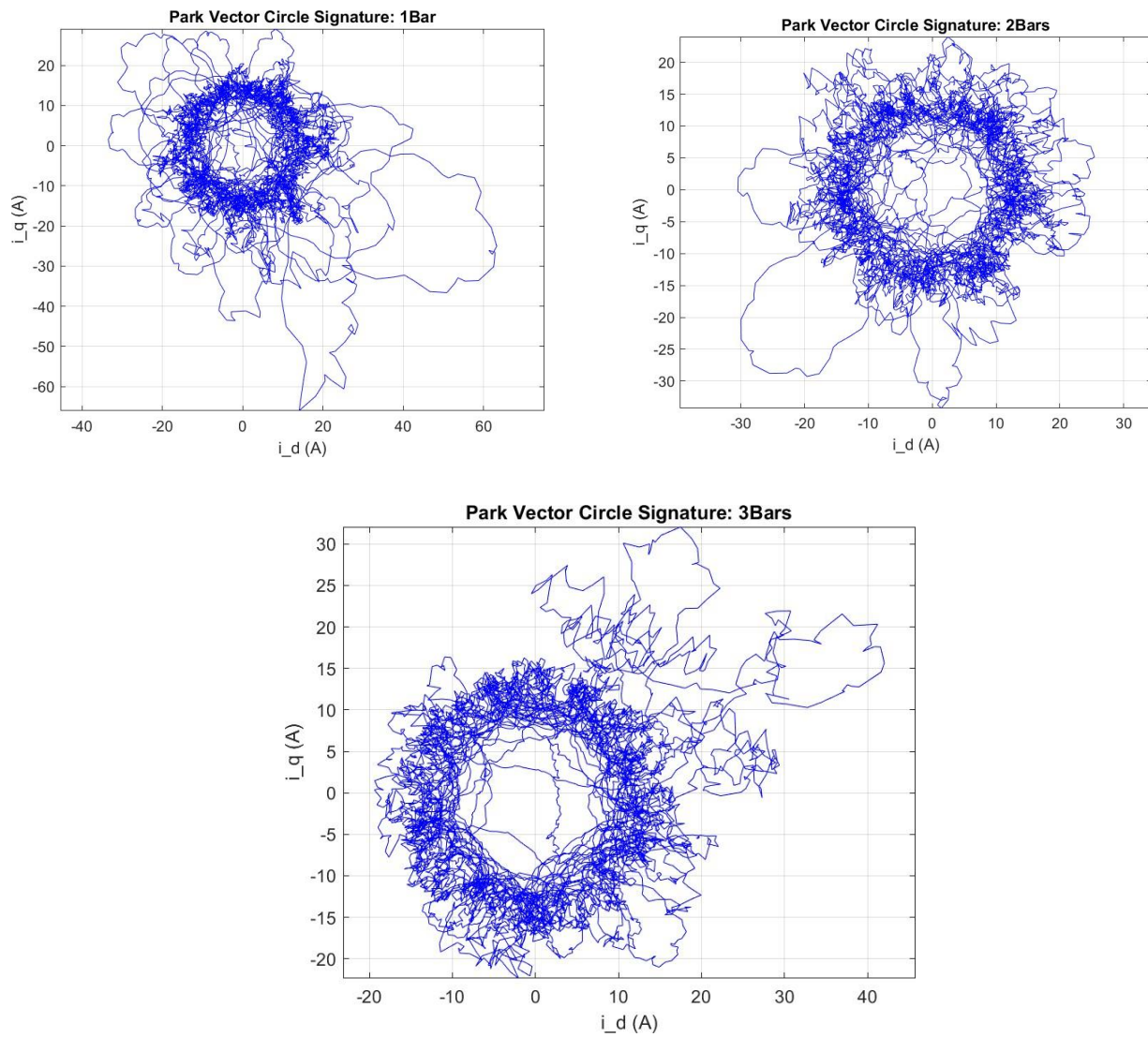


Figure III.9 trajectoires géométriques de Park , Barres Casses

Conclusion

Ce troisième chapitre a permis de valider avec succès le déploiement de notre modèle mathématique par script MATLAB et de caractériser précisément les signatures des défauts étudiés. Grâce à l'utilisation conjointe de l'analyse fréquentielle par FFT et de l'analyse temporelle, nous avons démontré qu'un défaut électrique externe (chute de tension) et une panne mécanique interne (barres cassées) génèrent des signatures visuelles totalement distinctes et hautement discriminantes.

Dans le domaine fréquentiel, la FFT isole les barres cassées par des pics de défaut nets à des fréquences strictes, tandis que la chute de tension modifie globalement le profil haute fréquence sans altérer la zone des 50 Hz. Dans le domaine temporel, la chute de tension engendre des cercles de Park concentriques de diamètres réduits mais parfaitement nets, alors que les barres cassées produisent des trajectoires épaisses et floues associées à des ondulations de l'enveloppe RMS. Ce catalogue de formes géométriques et de spectres est désormais parfaitement optimisé pour être soumis à un algorithme d'apprentissage automatique en utilisant l'intelligence artificielle ouvrant la voie au diagnostic automatisé et intelligent qui sera développé dans la suite de ce travail.

Chapitre 4

Diagnostic intelligent par apprentissage
automatique

4 Chapitre : Diagnostic Intelligent par Apprentissage Automatique

4.1 Introduction du Chapitre

L'objectif de ce chapitre est de concrétiser notre démarche de diagnostic non invasif en automatisant la reconnaissance des défauts étudiés dans le Chapitre 3. Si l'analyse humaine des signaux permet d'identifier les anomalies, l'intégration de l'Intelligence Artificielle (IA) permet d'automatiser ce processus en temps réel. Nous explorerons dans un premier temps les concepts de base du Machine Learning et du Deep Learning, ainsi que la plateforme Google Teachable Machine. Ensuite, nous détaillerons la constitution de notre base de données multi-charges (0,15 et 30 $N.m$) pour l'approche fréquentielle (1000 Hz et 100 Hz) et l'approche géométrique (Park à 15 $N.m$).

4.2 Concepts Fondamentaux : Machine Learning vs. Deep Learning

4.2.1 Le Machine Learning Classique

Le Machine Learning (ML) classique englobe les algorithmes capables d'apprendre à partir des données, mais il nécessite une étape préliminaire humaine appelée extraction de caractéristiques (*Feature Extraction*). L'ingénieur doit calculer lui-même des indicateurs ou repérer manuellement des amplitudes exactes de pics avant de les soumettre à un classificateur.

4.2.2 Le Deep Learning et la Classification d'Images

Le Deep Learning (DL) s'appuie sur des réseaux de neurones artificiels profonds, notamment les Réseaux de Neurones Convolutifs (**Convolutional Neural Network CNN**). Sa force majeure réside dans sa capacité à effectuer l'extraction de caractéristiques et la classification en une seule étape. En convertissant nos signaux physiques (courants) en images matricielles (Spectres FFT ou Trajectoires de Park), le CNN traite l'image comme une matrice de pixels et détecte automatiquement les formes, les contours et les variations géométriques majeures sans aucune intervention humaine.

4.3 Architecture et Fonctionnement de Google Teachable Machine

Pour notre application, nous utilisons la plateforme Google Teachable Machine (basée sur *TensorFlow.js*). Cet outil utilise une technique de Deep Learning appelée Transfer Learning (Apprentissage par Transfert). Elle s'appuie sur un modèle de vision par ordinateur pré-entraîné sur des millions d'images (*MobileNet*). Lorsque nous injectons nos graphiques, le modèle réorganise ses dernières couches de neurones pour se spécialiser instantanément sur nos signatures de moteurs (Sain, Chute de Tension, Barres Cassées).

4.4 Protocole de Collecte et Constitution Statistique du Dataset

4.4.1 Dataset Fréquentiel (FFT) : Structure Multi-Charge à 1000 Hz et 100 Hz

Pour concevoir une IA robuste face aux conditions industrielles réelles, le modèle doit apprendre à ignorer l'impact de la charge mécanique pour ne cibler que le défaut électrique ou mécanique. C'est pourquoi toutes nos figures FFT intègrent trois états de fonctionnement : à vide (0 N.m), à charge nominale (15 N.m) et en surcharge (30 N.m).

Nous avons ainsi constitué deux sous-datasets fréquentiels distincts :

- Le 1er Dataset (Spectre Étendu à 1000 Hz) : Offre une vue globale de la bande passante de la simulation.
- Le 2ème Dataset (Spectre Résolu à 100 Hz) : Concentre la fenêtre graphique sur la zone basse fréquence.

Pour chacun de ces deux datasets (1000 Hz et 100 Hz), la répartition statistique des figures est strictement la suivante :

- Classe "Sain" (Healthy) : 6 figures au total (3 figures à 1000 Hz et 3 figures à 100 Hz, correspondant aux charges 0, 15 et 30 N.m).
- Classe "Chute de Tension" (Voltage Drop) : 18 figures au total (9 figures à 1000 Hz et 9 figures à 100 Hz, combinant les gravités de chute 10%, 20%, 30% avec les charges 0, 15 et 30 N.m).
- Classe "Barres Cassées" (Broken Bars) : 18 figures au total (9 figures à 1000 Hz et 9 figures à 100 Hz, combinant le nombre de barres cassées 1, 2, 3 avec les charges 0, 15 et 30 N.m).

4.4.2 La Règle Technique des Titres Graphiques (Apprentissage vs. Test)

Une nuance méthodologique cruciale a été appliquée lors de l'organisation de ce dataset dans Google Teachable Machine :

- Pendant la phase d'apprentissage (Training) : Il est tout à fait correct de conserver les titres et les axes générés par MATLAB sur les figures. Cela aide à structurer visuellement l'environnement des classes. (Figure IV.1)

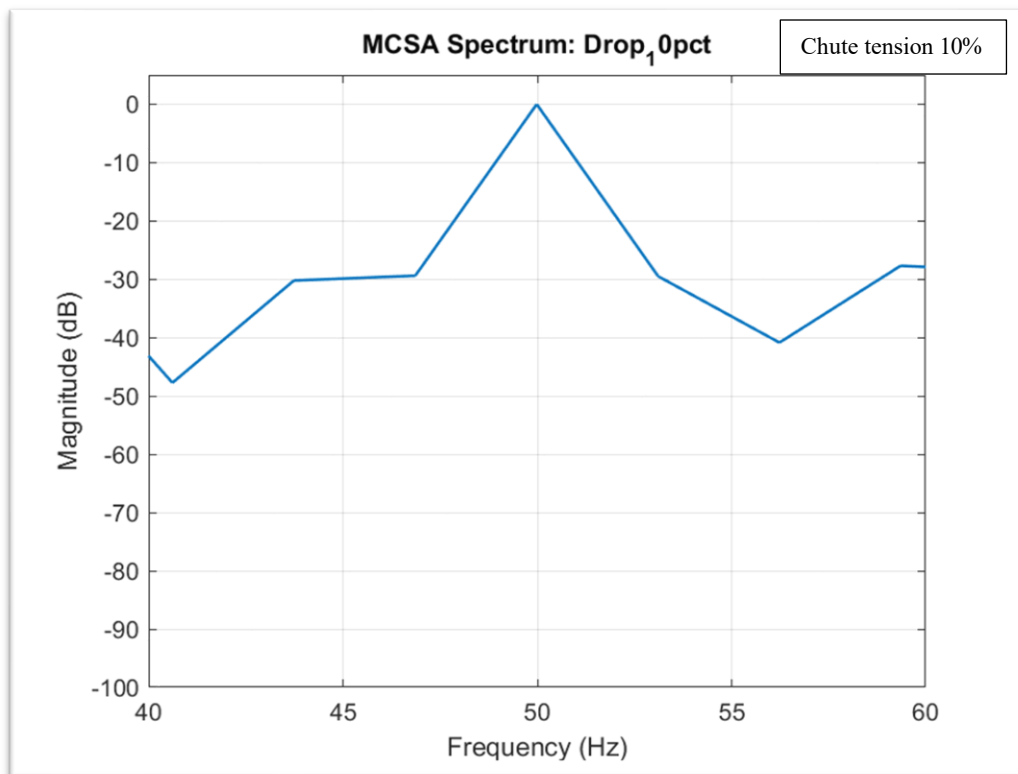


Figure IV.1 figure du MATLAB complète

- Pendant la phase de test (Validation à l'aveugle) : Pour tester réellement l'IA, nous devons utiliser exclusivement des figures recadrées, contenant uniquement la courbe du graphique, sans aucun titre textuel. Si nous laissons le titre (ex: "Drop 10%"), l'IA tricherait en lisant le texte alphanumérique au lieu d'analyser la forme de la courbe bleue, ce qui fausserait la validité du diagnostic. (Figure IV.2)

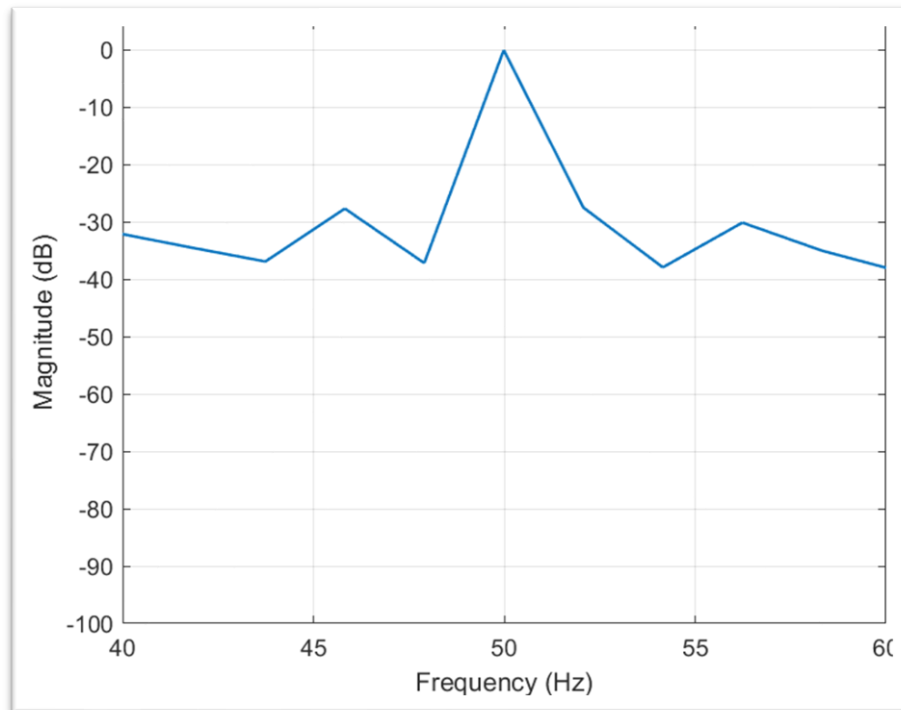


Figure IV.2 figure du MATLAB recadrée

4.4.3 Dataset Géométrique (Approche par Vecteur de Park à 15 N.m)

En parallèle à la FFT, nous introduisons un dataset basé sur la signature spatiale du courant, extrait à charge nominale (15 N.m) :

- Classe Sain : Échantillon présentant un cercle parfait au tracé fin.
- Classe Chute de Tension : Échantillons présentant des cercles concentriques de diamètres réduits.
- Classe Barres Cassées : Échantillons caractérisés par un anneau orbital flou et épais.

4.5 Présentation de l'Interface Utilisateur de Google Teachable Machine

Avant d'exposer nos résultats, il est essentiel de détailler l'environnement de développement logiciel utilisé pour l'entraînement. L'interface de Google Teachable Machine s'organise de manière intuitive en trois grands panneaux horizontaux de gauche à droite, qui dictent le flux de travail de notre diagnostic :

1. **Le Panneau des Classes (Colone de Gauche - *Gather*)** : Permet de créer, nommer et structurer nos catégories de pannes (Healthy, Voltage_Drop, Broken_Bars). C'est ici que l'on effectue le téléversement des images MATLAB par glisser-déposer (*Upload*).
2. **Le Module de Contrôle (Panneau Central - *Train*)** : Gère les hyperparamètres de calcul et affiche la progression de l'apprentissage du réseau convolutif en temps réel.
3. **Le Module de Diagnostic (Colonne de Droite - *Preview*)** : Permet de tester le modèle entraîné à l'aide de fichiers d'images externes et affiche instantanément les jauges de probabilité sous forme de pourcentages.

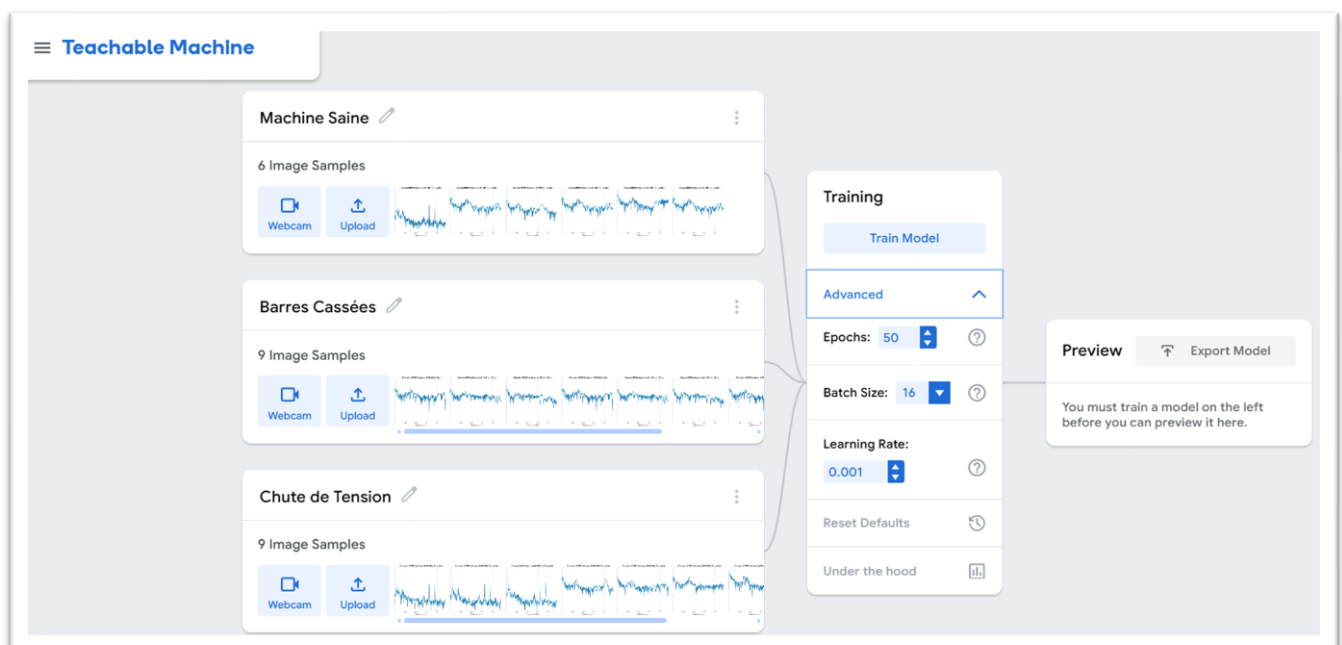


Figure IV.3 L'interface de Google Teachable Machine

4.6 Analyse Comparative des Échelles : Spectre 1000 Hz vs. 100 Hz

Avant de présenter les interfaces finales, il est fondamental d'expliquer le comportement du réseau de neurones face aux deux échelles de fréquences. Les deux approches sont scientifiquement correctes, mais leur sensibilité logicielle diffère :

- Le cas du spectre à 1000 Hz (Approche Sensible) : À cette échelle large, l'IA parvient à donner la bonne réponse et à cibler la bonne classe de défaut. Cependant, les pourcentages de confiance affichés sur l'interface oscillent et ne sont pas maximaux. En effet, la variation de la charge de 0 à 30 N.m déplace horizontalement le plancher de bruit numérique du solveur MATLAB. Comme ce bruit occupe 90% des pixels de l'image, il perturbe la certitude du réseau convolutif.

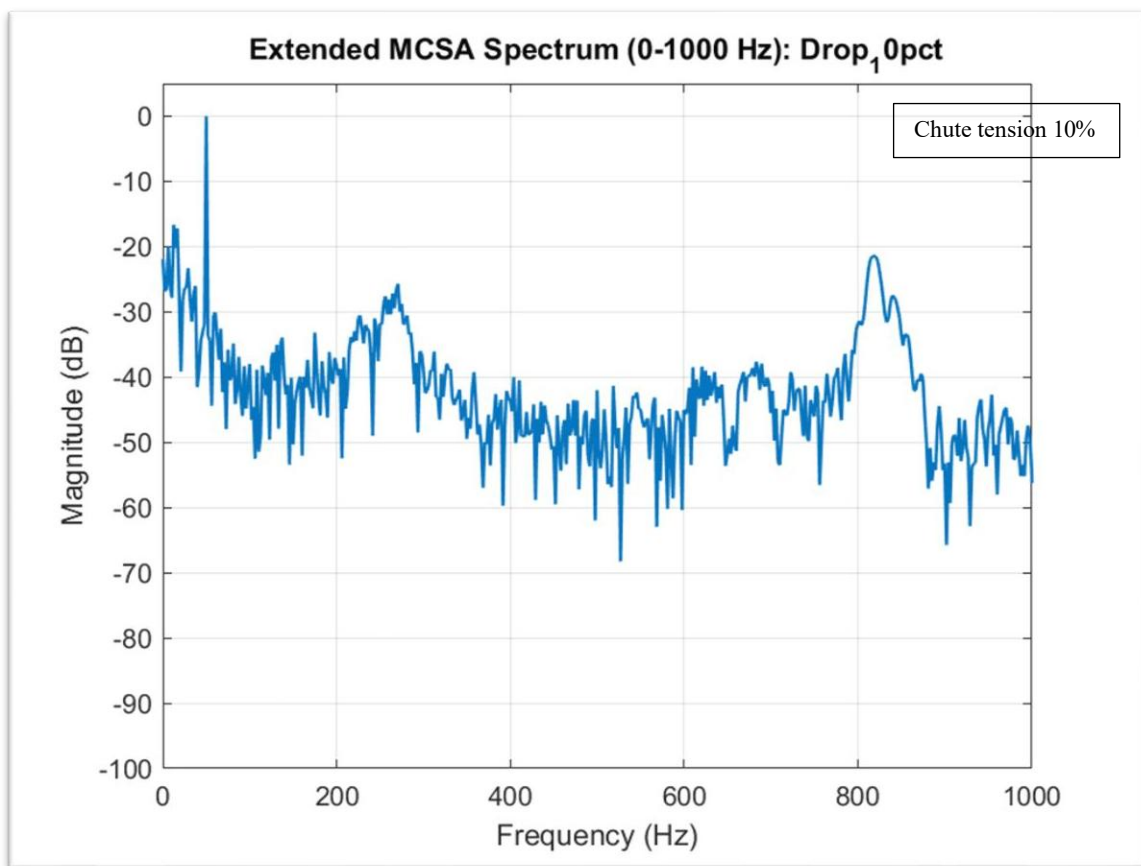


Figure IV.4 Spectre 1000 Hz (Approche Sensible)

- Le cas du spectre à spectre à 100 Hz (Approche Précise) : En restreignant la fenêtre à 100 Hz, on élimine tout le bruit haute fréquence du solveur. L'attention visuelle de l'IA se focalise uniquement sur la zone des 50 Hz (la fréquence fondamentale et ses premières harmoniques). Les descripteurs géométriques deviennent massifs et stables. C'est pourquoi nous privilégions cette échelle à 100 Hz pour obtenir des scores de confiance maximaux et nets à 100%.

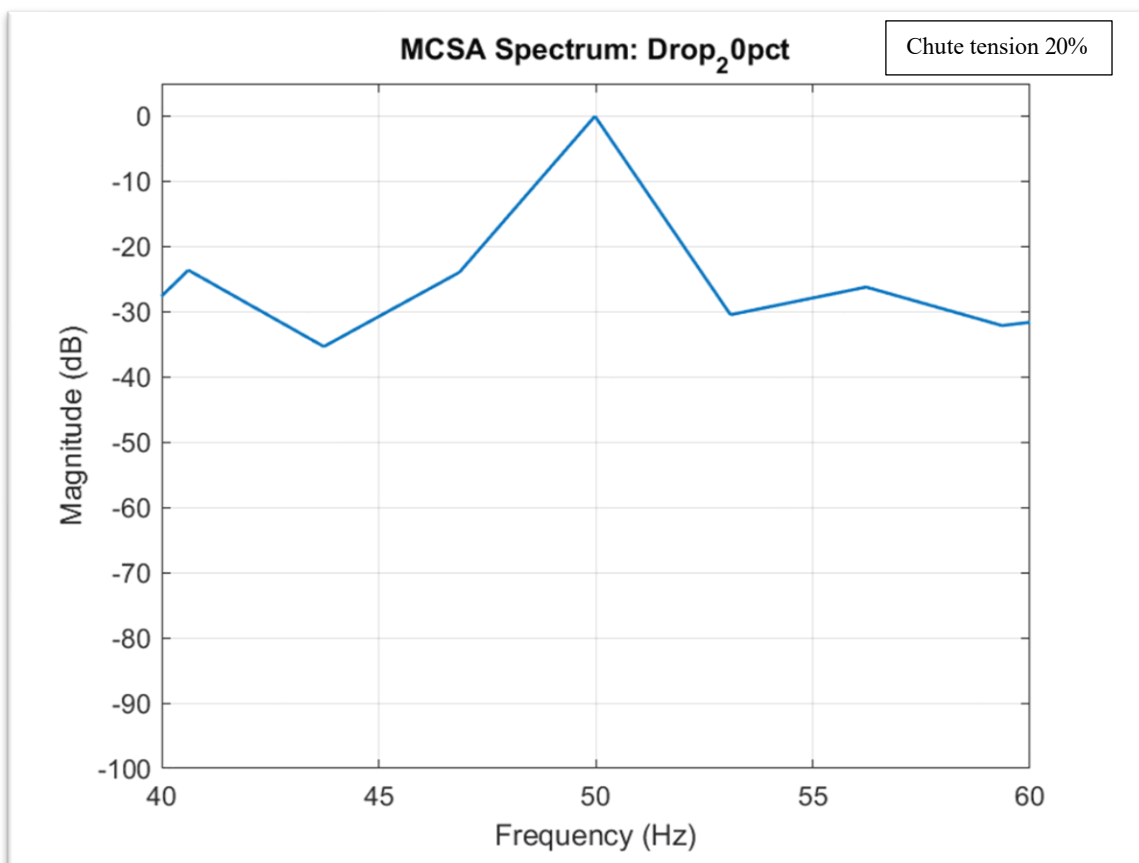


Figure IV.5 Spectre 100 Hz (Approche Précise)

4.7 Implémentation Pratique et Discussion des Résultats

4.7.1 Déploiement des Phases sur Google Teachable Machine

L'implémentation de nos deux approches (FFT et Vecteur de Park) a suivi rigoureusement les trois phases de la plateforme :

1. Phase "Gather" (Collecte) : Création des classes (Healthy, Voltage_Drop, Broken_Bars) et importation de nos lots de figures respectifs.



Figure IV.6 interface de classification optimisée FFT à 1000 Hz



Figure IV.7 interface de classification optimisée FFT à 100 Hz

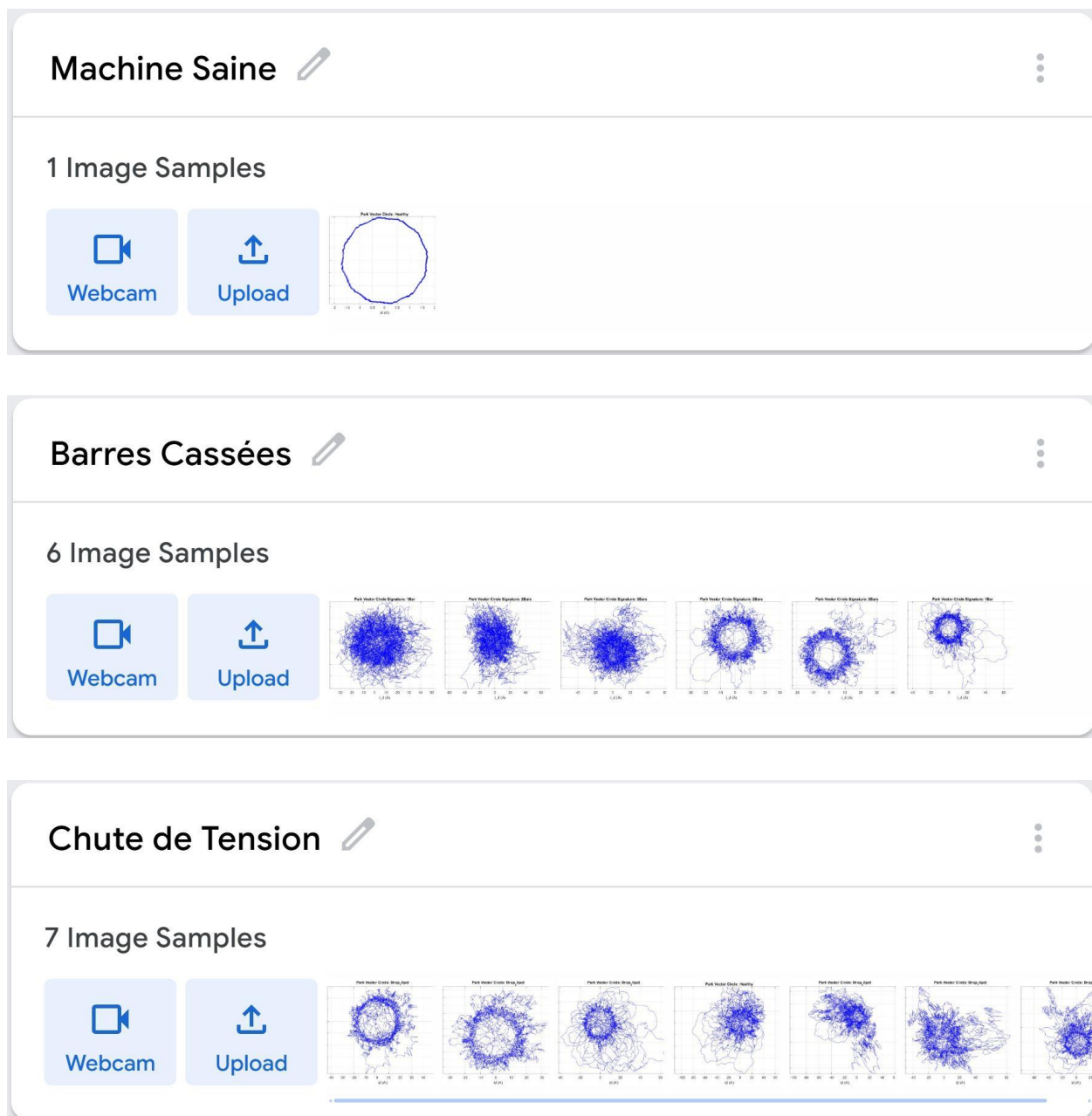


Figure IV.8 interface de classification vecteur de Park à 15 N.m

2. Phase "Train" (Entraînement) : Calcul des poids du réseau convolutif avec les hyperparamètres (Epochs: 50, Batch Size: 16, Learning Rate: 0.001).

The image shows a 'Training' configuration panel. At the top is a 'Train Model' button. Below it is an 'Advanced' section header with an upward arrow. The section contains three hyperparameter settings: 'Epochs' set to 50 with a vertical slider, 'Batch Size' set to 16 with a dropdown menu, and 'Learning Rate' set to 0.001 with a vertical slider. Each setting has a help icon (question mark in a circle). At the bottom of the panel are two options: 'Reset Defaults' with a circular arrow icon and 'Under the hood' with a bar chart icon.

Figure IV.9 interface de Phase "Train"

3. Phase "Preview" (Test) : Soumission de nouvelles figures de test anonymes et sans titre pour valider le modèle.

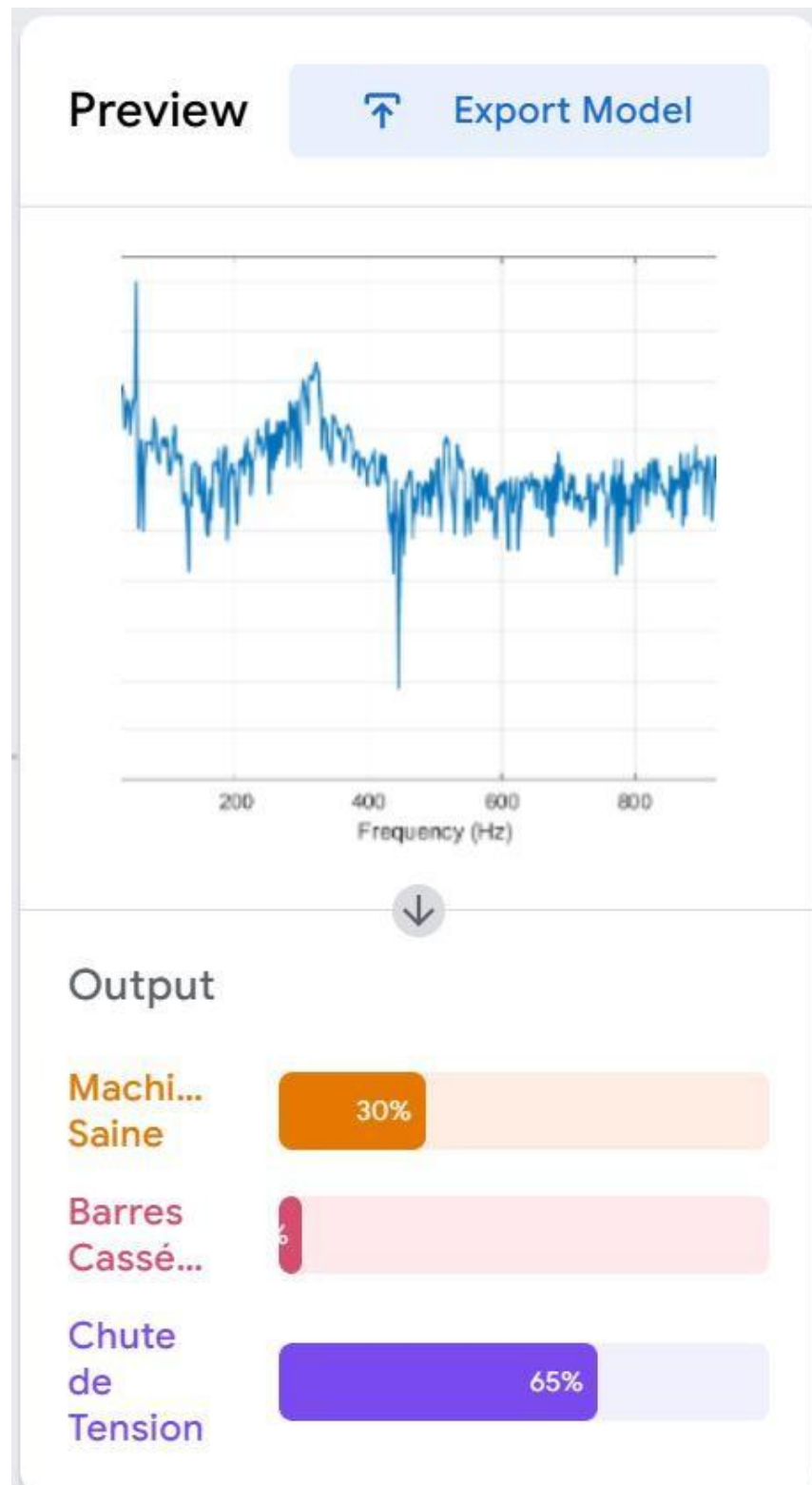


Figure IV.10 interface de Phase "Preview"

4.7.2 Intérêt Industriel Stratégique : Le cas de SONATRACH

Dans un contexte industriel concret, l'approche fréquentielle (FFT) s'avère nettement supérieure et plus avantageuse que l'approche de Park, en particulier pour des compagnies pétrolières et gazières majeures comme SONATRACH.

Les grandes industries de ce secteur possèdent d'immenses bases de données historiques (Big Data) contenant des milliers d'enregistrements de signaux temporels et de spectres fréquentiels collectés sur site depuis des décennies via la maintenance conditionnelle classique. Déployer un modèle de Deep Learning basé sur la FFT permet à SONATRACH d'exploiter directement et instantanément ce gisement d'informations existant sans modifier leurs infrastructures de capteurs, transformant leurs archives de données en un système automatisé de maintenance prédictive de pointe.

4.8 Test du Système sur une Figure Aléatoire Inconnue

Pour valider définitivement la fiabilité de notre outil avant son intégration globale, nous avons généré une simulation MATLAB totalement aléatoire et isolée du dataset d'apprentissage. Le graphique obtenu a été nettoyé de son titre conformément à notre protocole, puis injecté dans le module de test en temps réel.(Figure IV.11)

Exemple 1 (1000 Hz):

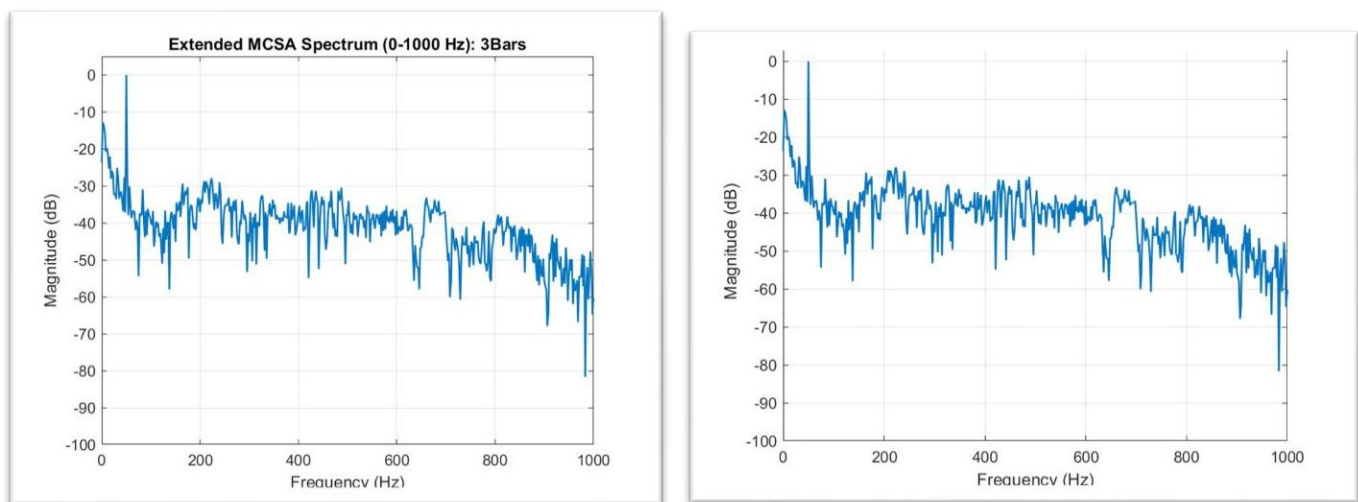
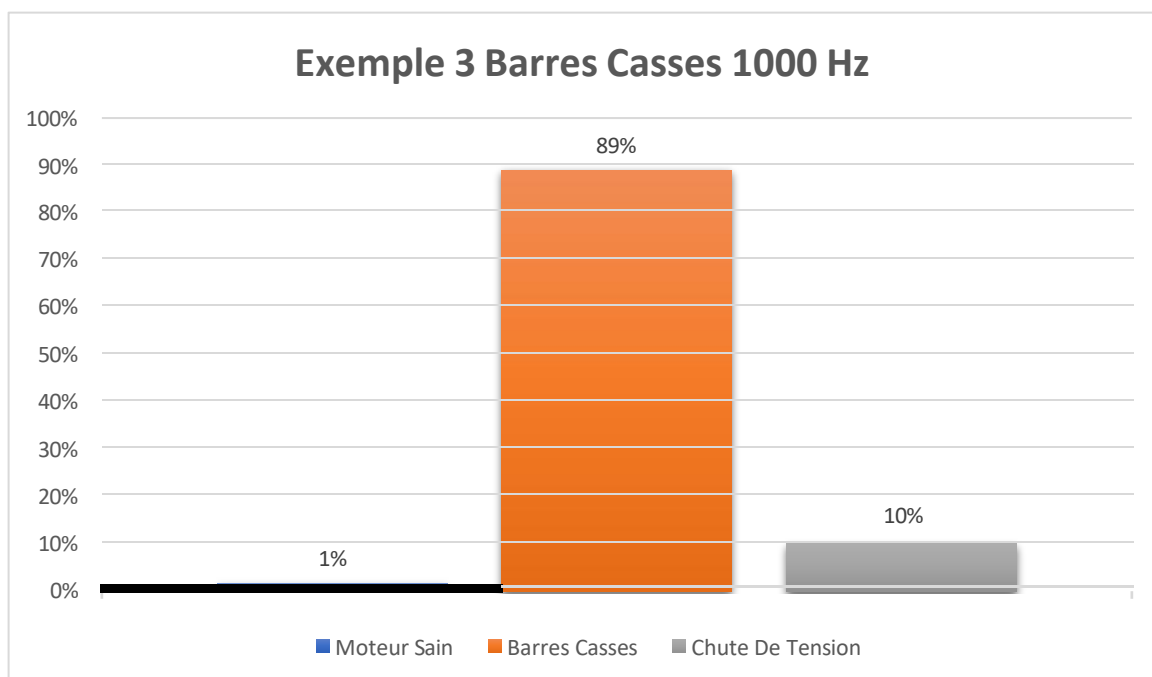


Figure IV.11 Figure Aléatoire Inconnue / recadrée (Exemple 3 Barres Casses 1000 Hz)



Histogramme IV.1 : Résultat Du L'exemple 3 Barres Casses 1000 Hz

On y voit la courbe test anonyme chargée au centre, et les jauges de prédiction à droite affichant instantanément le bon diagnostic avec un score de confiance de 89%.

Exemple 2 (1000 Hz) :

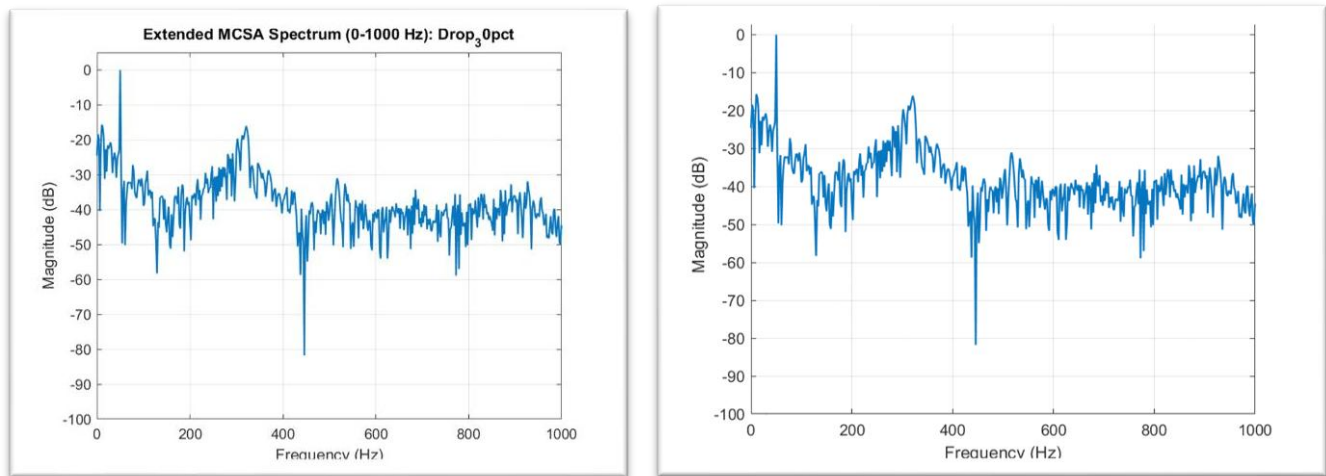
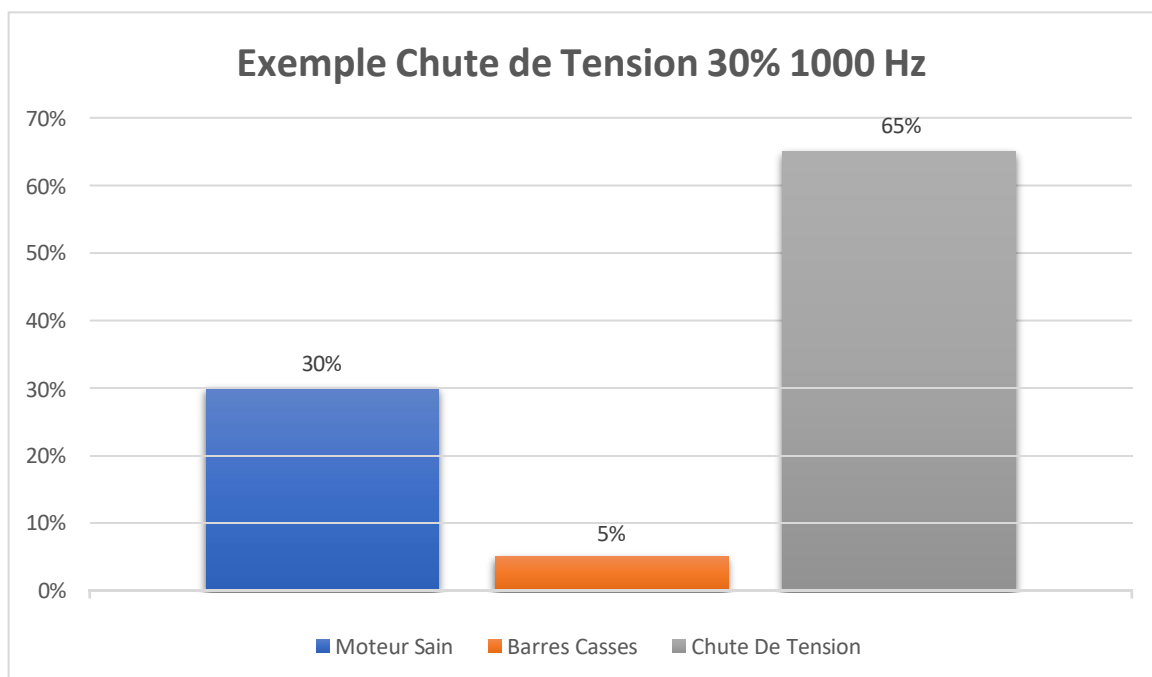


Figure IV.12 Figure Aléatoire Inconnue / recadrée (Exemple Chute de Tension 30% 1000 Hz)



Histogramme IV.2 : Résultat Du L'exemple Chute de Tension 30% 1000 Hz

Exemple 3 (100 Hz) :

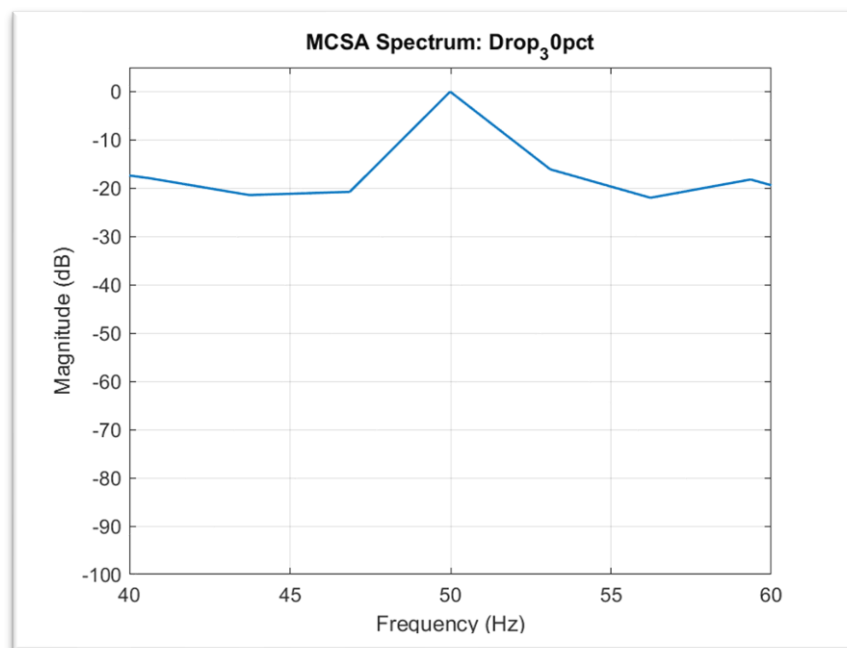
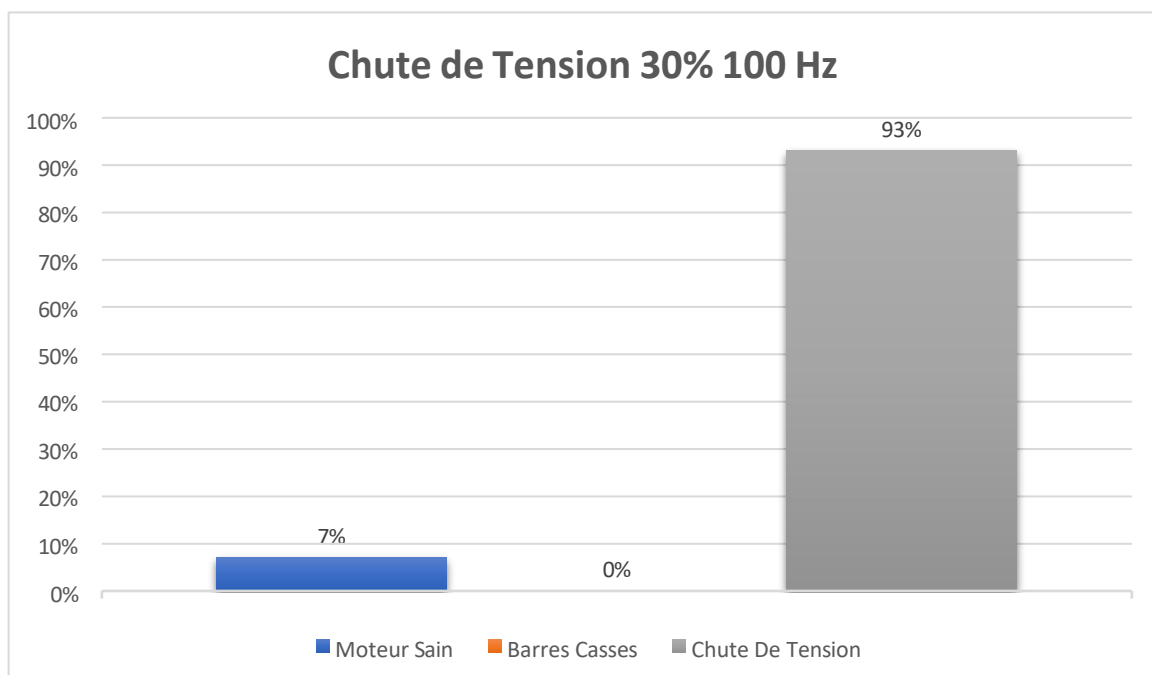


Figure IV.13 Figure Aléatoire Inconnue / recadrée (Exemple Chute de Tension 30% 100 Hz)



Histogramme IV.3 : Résultat Du L'exemple Chute de Tension 30% 100 Hz

Exemple 4 (100 Hz) :

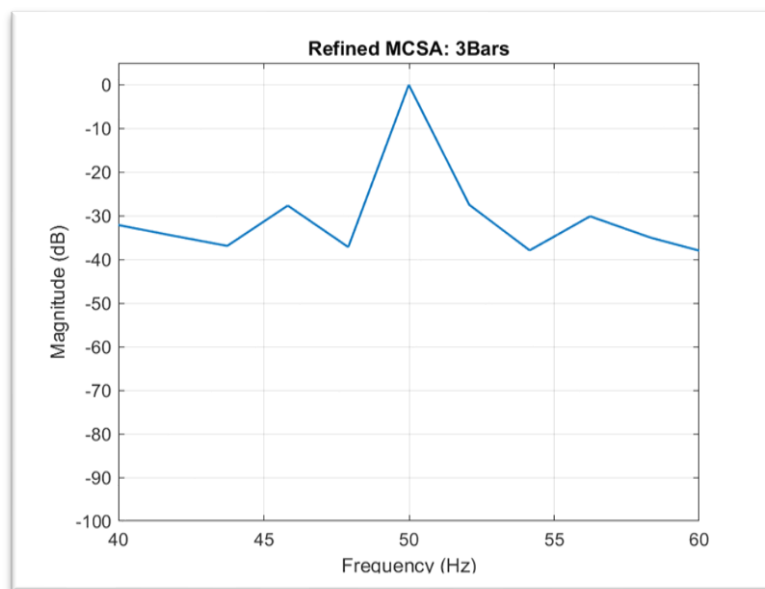
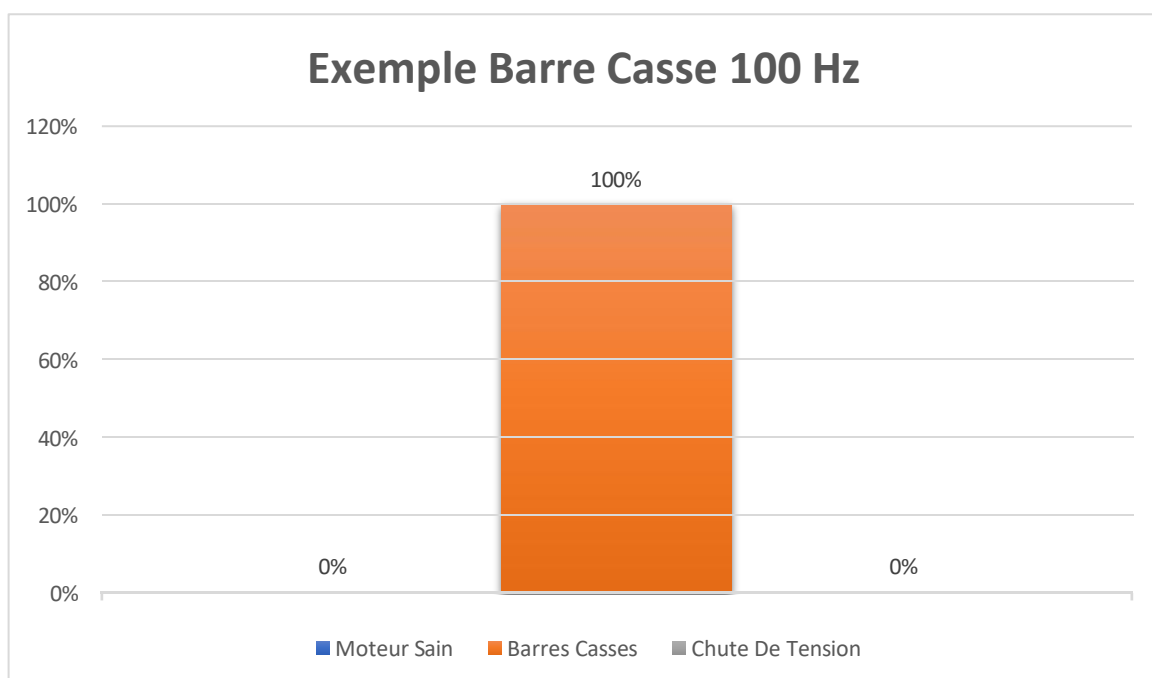


Figure IV.14 Figure Aléatoire Inconnue / recadrée (Exemple 3 Bars Casses 100 Hz)



Histogramme IV.4 : Résultat Du L'exemple 3 Bars Casses 100 Hz

Exemple 5 (100 Hz) :

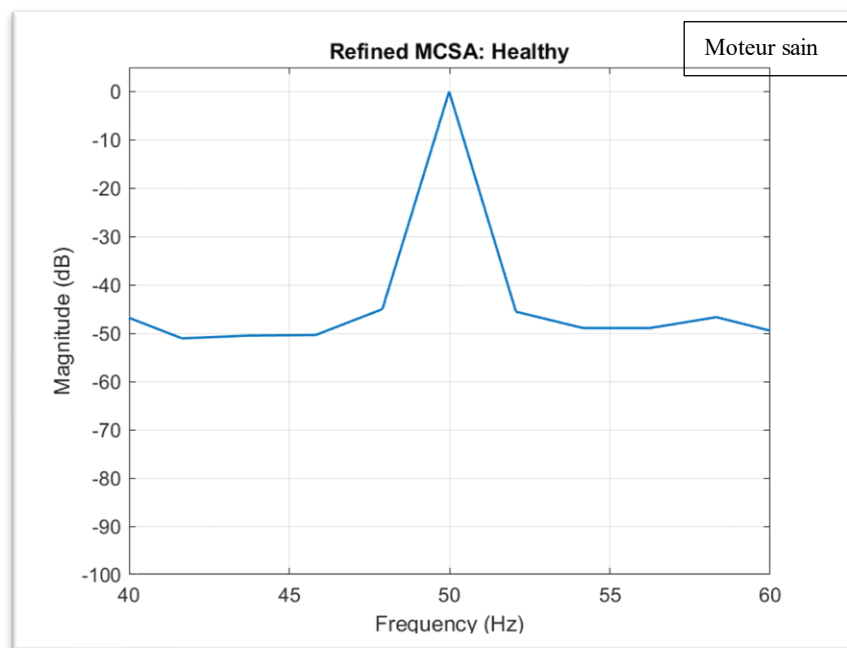
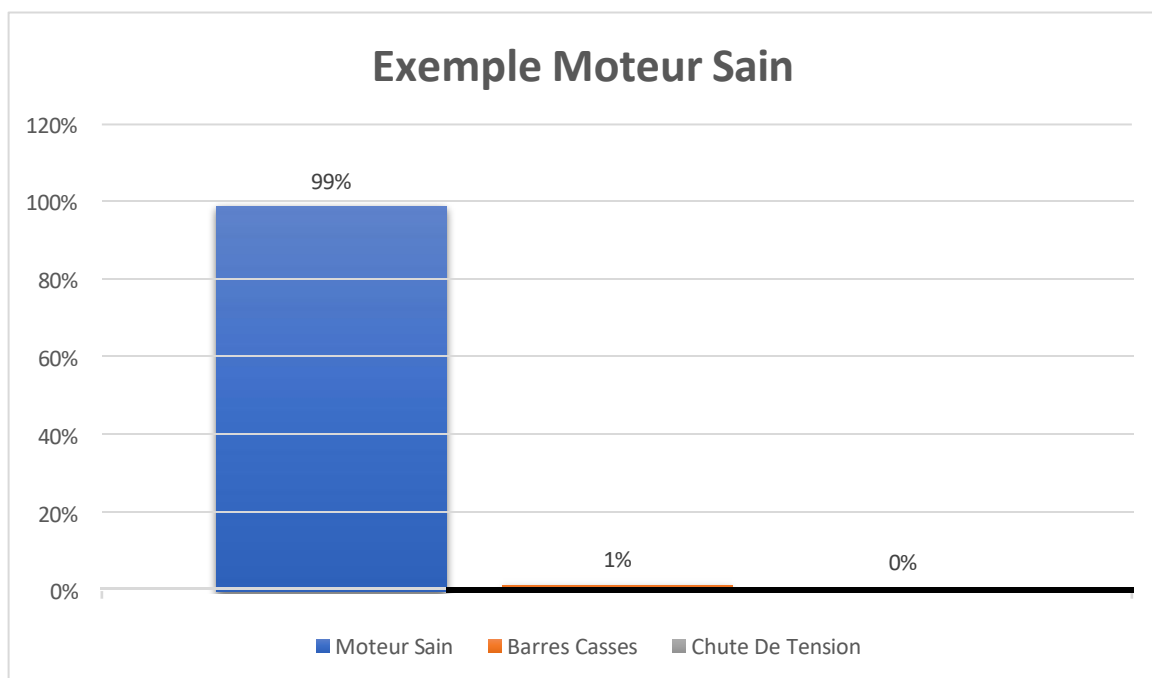


Figure IV.15 Figure Aléatoire Inconnue / recadrée (Exemple Healthy 100 Hz)



Histogramme IV.5 : Résultat Du L'exemple Healthy 100 Hz

4.9 Interprétation des Résultats et Discussion

Les essais pratiques démontrent une complémentarité parfaite entre le traitement de signal et la vision par ordinateur. L'IA n'analyse pas la physique des équations, mais la topologie des lignes. Le passage réussi du spectre étendu au spectre ciblé à 100 Hz prouve que la filtration visuelle des données est la clé de la robustesse en environnement multi-charge.

4.10 Conclusion du Chapitre

Ce quatrième chapitre a démontré la faisabilité et l'efficacité de l'IA pour le diagnostic automatique du moteur asynchrone. En combinant nos simulations MATLAB (Chapitre 3) à la puissance de classification de Google Teachable Machine, nous avons validé un système capable de surmonter les variations de charge mécanique pour identifier précisément l'état de la machine. L'adaptation de l'échelle à 100 Hz et la pertinence industrielle du modèle FFT ouvrent la voie à une intégration directe dans les architectures de surveillance des grandes entreprises.

Conclusion Générale

Le moteur asynchrone est l'une des machines électriques les plus utilisées dans l'industrie moderne grâce à sa robustesse, sa simplicité de construction, son faible coût et sa grande fiabilité. Selon diverses études industrielles, les moteurs asynchrones représentent une part importante de la consommation mondiale d'énergie électrique et constituent l'élément principal de nombreux procédés de production.

Malgré leurs nombreux avantages, les moteurs asynchrones sont soumis à plusieurs types de défauts pouvant affecter leurs performances et leur durée de vie. Parmi les défaillances les plus courantes figurent les défauts des barres cassées du rotor, problèmes liés à l'alimentation électrique. Ces défauts peuvent entraîner une diminution du rendement, des arrêts imprévus de production et, dans certains cas, des dommages irréversibles de la machine.

Les coûts associés à la maintenance corrective et aux arrêts non planifiés représentent une charge économique considérable pour les entreprises industrielles. Ainsi, les stratégies traditionnelles de maintenance préventive, basées sur des intervalles de temps fixes, ne permettent pas toujours de détecter efficacement les défauts à leur stade initial.

Face à ces limitations, la maintenance prédictive s'est imposée comme une solution performante permettant de surveiller l'état réel des équipements et d'anticiper les défaillances avant leur apparition. Cette approche repose sur l'analyse des données de fonctionnement telles que les courants, les vibrations, les températures ou les signaux acoustiques. Avec les progrès récents de l'intelligence artificielle, notamment dans les domaines de l'apprentissage automatique (Machine Learning) et de l'apprentissage profond (Deep Learning), il est désormais possible d'extraire automatiquement des informations pertinentes à partir de grandes quantités de données et d'améliorer considérablement la précision du diagnostic et du pronostic des défauts.

Dans ce contexte, l'intégration des techniques d'intelligence artificielle dans la maintenance prédictive des moteurs asynchrones constitue une voie prometteuse pour réduire les coûts de maintenance, augmenter la disponibilité des équipements et améliorer la fiabilité des systèmes industriels.

Ce projet de fin d'études a permis de couvrir l'intégralité de la chaîne de développement d'un système de diagnostic moderne et intelligent pour les machines asynchrones, un composant vital de l'industrie contemporaine.

Dans un premier temps, l'établissement d'un modèle mathématique rigoureux par script MATLAB nous a offert une réplique numérique fidèle et flexible du moteur, capable de simuler des anomalies complexes de réseau (chutes de tension) et des ruptures mécaniques critiques (barres rotoriques cassées) sous différents états de charge. Dans un deuxième temps, le traitement de signal par FFT et l'analyse spatiale de Park ont mis en lumière des signatures uniques, prouvant que chaque défaut possède sa propre empreinte digitale temporelle et fréquentielle.

En fin nous proposons pour futur travaux les perspectives suivantes :

- Introduction d'autres défauts électriques et mécaniques même combinés ;
- Utilisation des méthodes performantes sur le traitement des signaux ;
- Employés des méthodes de diagnostics avancées en utilisant l'intelligence artificielle.

Bibliographie

5 Références bibliographiques

- [1] Documents techniques internes du complexe GL1Z, rapports de maintenance et données d'exploitation recueillies durant le stage
- [2] AFNOR, *NF EN 13306:2018 – Maintenance : Terminologie de la maintenance*, AFNOR, Paris, France 2018.
- [3] Monchy, F., *Maintenance industrielle : Maintenance des équipements industriels*, 3e édition, Dunod, Paris, France, 2010.
- [4] Aubert, B., *Maintenance des systèmes industriels*, Eyrolles, Paris, France, 2009.
- [5] ABB, Siemens & Schneider Electric, *Documentation technique des moteurs asynchrones triphasés, Catalogues et manuels techniques*, 2023.
- [6] IEC, IEC 60034 – Rotating Electrical Machines, International Electrotechnical Commission, Genève, Suisse, 2022.
- [7] *Electric Machinery Fundamentals*, 5th Edition, McGraw-Hill, 2012.
- [8] *Electrical Machines, Drives and Power Systems*, 6th Edition, Pearson Education, 2006.
- [9] *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, Wiley-IEEE Press, 2013.
- [10] *Techniques de l'Ingénieur – Machines électriques*, Techniques de l'Ingénieur, Paris, France, 2023.