République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Yahia Farès Médéa
Faculté de la technologie
Département de Génie mécanique



Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme Master
Filière : Electromécanique
Spécialité : Mécatronique

Thème

Surveillance de l'état des machines tournantes de la centrale électrique de Berrouaghia SKE-SPA

Présenté par
M. Taha Yacine Senouci

Proposé et dirigé par
Pr. Mouloud BOUMAHDI
Dr. Abdelkader MAHDAD (SKE)

Juin 2024

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur le Professeur Mouloud Boumahdi, qui m'a fait l'honneur de diriger ce travail de recherche. Je lui suis reconnaissant pour sa confiance, ses conseils précieux, sa disponibilité constante et sa patience exemplaire tout au long de ce processus.

Je suis également reconnaissant envers Monsieur le Docteur ……., qui a accepté avec bienveillance de présider notre jury de mémoire. Je lui adresse mes hommages les plus respectueux pour son temps et son expertise.

Un grand merci également à Monsieur le Docteur ……., pour sa participation active au sein de notre jury. Vos commentaires et suggestions ont été d'une grande valeur pour l'enrichissement de ce travail.

Je souhaite également adresser mes remerciements chaleureux à Monsieur le Docteur Abdelkader MAHDAD pour leur accompagnement précieux durant mon stage à la centrale électrique de Berrouaghia (SKB SPA Shariket Kahraba Berrouaghia). Votre soutien et vos conseils ont été déterminants dans la réussite de cette expérience pratique.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail. Votre encouragement et votre soutien ont été une source de motivation inépuisable.

الملخص

لتحسين صيانة الآلات الدوارة في محطة توليد الكهرباء في البرواقية، يقترح هذا العمل منهجية مراقبة متقدمة. الهدف الرئيسي هو المراقبة المستمرة لحالة هذه الآلات بناءً على قاعدة بيانات الاهتزازات واستخدام تقنية التنبؤ الإحصائي المعتمدة على طريقة هولت للاتجاه الخطي. يهدف هذا النهج إلى التنبؤ بالحالة المستقبلية للآلات الدوارة لضمان متانة وموثوقية المعدات على المدى الطويل. توضح النتائج الأولية التي تم الحصول عليها أن هذه الطريقة تجعل من الممكن تقديم تنبؤات مستقبلية واعدة، من خلال التركيز على معلمتين رئيسيتين لنموذج هولت. وبالتالي توفر هذه النتائج منظورًا مشجعًا لتنفيذ الصيانة الاستباقية، مما يجعل من الممكن توقع الأعطال المحتملة ومنعها.

الكلمات المفتاحية: مراقبة الحالة، تحليل الاهتزازات، الآلات الدوارة، نموذج هولت

Résumé

Pour optimiser la maintenance des machines tournantes dans la centrale électrique de Berrouaghia, ce travail propose une méthodologie de surveillance avancée. L'objectif principal est de surveiller en continu l'état de ces machines en s'appuyant sur une base de données vibratoires et en utilisant une technique de prévision statistique fondée sur la méthode de tendance linéaire de Holt. Cette approche vise à prédire l'état futur des machines tournantes afin d'assurer la durabilité et la fiabilité à long terme des équipements. Les résultats préliminaires obtenus démontrent que cette méthode permet d'émettre des prévisions futures prometteuses, en se concentrant sur deux paramètres clés du modèle de Holt. Ces résultats offrent ainsi une perspective encourageante pour la mise en œuvre d'une maintenance proactive, permettant d'anticiper et de prévenir les dysfonctionnements potentiels.

Mots clés : surveillance conditionnelle, analyse vibratoire, machines tournantes, modèle de Holt

Abstract

To optimize the maintenance of rotating machines in the Berrouaghia power plant, this work proposes an advanced monitoring methodology. The main objective is to continuously monitor the condition of these machines based on a vibration database and using a statistical forecasting technique based on Holt's linear trend method. This approach aims to predict the future state of rotating machines to ensure the long-term durability and reliability of the equipment. The preliminary results obtained demonstrate that this method makes it possible to make promising future forecasts, by focusing on two key parameters of the Holt model. These results thus offer an encouraging perspective for the implementation of proactive maintenance, making it possible to anticipate and prevent potential malfunctions.

Keywords: condition monitoring, vibration analysis, rotating machines, Holt modelListe des figures

Liste des tableaux

Tableau 1. 1 : Avantages et inconvénients des capteurs de vibration.....25
Tableau 2. 1 : Caractéristiques de la centrale.....28

Tableau 3. 2 : Seuils d'intervention 50
Tableau 3. 2 Estimation des paramètres de prévision.....56

Liste des figures

Figure 1. 1 : Méthodes de maintenance 5
Figure 1. 2 : Courbe de surveillance de l'état d'un équipement 6
Figure 1. 3 : Techniques de maintenance conditionnelle 7
Figure 1. 4 : Identification des défauts mécaniques 8
Figure 1. 5 : Défauts identifiés par la thermographie infrarouge 9
Figure 1. 6 : Fissure identifiée par détection ultrasonore 10
Figure 1. 7 : Présentation d'un signal dans les domaines : temporel et fréquentiel 14
Figure 1. 8 : Seuils d'intervention 15
Figure 1. 9 : Méthodologie de surveillance 16
Figure 1. 10 : Surveillance On-line, système d'acquisition fixe 17
Figure 1. 11 : Surveillance offline, système acquisition portable 17
Figure 1. 12 : Investissement et mise en œuvre de deux types de surveillance. 18
Figure 1. 13 : Catégories de capteurs de vibration 19
Figure 1. 14 : Principe du capteur à courants de Foucault 21
Figure 1. 15 : Positionnement des capteurs de déplacement 21
Figure 1. 16 : Structure d'un vélocimètre 22
Figure 1. 17 : Schéma de principe d'un accéléromètre 23
Figure 1. 18 : Positionnement des capteurs d'accélération 24
Figure 1. 19 : Comparaison des plages de fréquences et gamme dynamique des trois types de capteurs 24

Figure 2. 1 : *Situation de S.K.E* 28
Figure 2. 2 : Photo de la centrale 29
Figure 2. 3 : Schéma d'une turbine 30
Figure 2. 4 : Générateur électrique 30
Figure 2. 5 : Transformateurs 31
Figure 2. 6 : L'installation de Centrale thermoélectrique à turbine à gaz 32
Figure 2. 7 : Transformation énergétique 32

Figure 2. 8 : Cycle idéal d'une turbine à gaz 33
Figure 2. 9 : Cycle d'une turbine à gaz 34
Figure 2. 10 : Schéma descriptif d'un groupe de turbine à gaz 35
Figure 2. 11 : Caractéristiques techniques de la turbine à gaz 35
Figure 2. 12 : Rotor 38
Figure 2. 13 : Stator 38
Figure 2. 14 : Chambre de combustion 39
Figure 2. 15 : Bruleur 40

Figure 3. 1 : Moteur 355C 46
Figure 3. 2 : Plaquette d'identification du moteur **WEG 355c** 46
Figure 3. 3 : Seuils d'intervention 47
Figure 3. 4 : Prévision par LED pour n= 60 jours, α=0.5 et β=0.5, MSE= 0.0692 51
Figure 3. 5 : Prévision par LED pour n= 60 jours, α=0.2 et β=0.2 ; MSE= 0.2461 51
Figure 3. 6 : Prévision par LED pour n= 180 jours, α=0.5 et β=0.5, MSE= 0.0692 52
Figure 3. 7 : Prévision par LED pour n= 60 jours, α=0.5 et β=0.5, MSE= 0.0587 53
Figure 3. 8 : Prévision par LED pour n= 60 jours, α=0.2 et β=0.2, MSE= 0.0121 54
Figure 3. 9 : Prévision par LED pour n= 60 jours, α=0.2 et β=0.2, MSE= 0.1337 54
Figure 3. 10 : Prévision par LED pour n= 60 jours, α=0.3 et β=0.3, MSE= 0.0649 55
Figure 3. 11 : Prévision par LED pour n= 60 jours, α=0.2 et β=0.2, MSE= 0.0734 55
Figure 3. 12 : Prévision par LED pour n= 60 jours, α=0.3 et β=0.3, MSE= 0.0830 56

Table des matières

الملخص iii

Résumé iii

Abstract iv

Liste des tableaux v

Liste des figures vi

Table des matières viii

Introduction Générale 1

Chapitre 1 2

1.1 Introduction 2

1.2. La maintenance 2

1.3. Objectifs de la maintenance 2

1.4. Méthodes de maintenance 3

1.5 Choix d'une stratégie de maintenance 4

1.6 Processus de maintenance conditionnelle 4

1.6.1 Détection du défaut 4

1.6.2 Diagnostic 6

1.6.3 Pronostic 6

1.7 Outils de maintenance préventive conditionnelle et prévisionnelle 6

1.7.1 L'analyse Vibratoire 7

1.7.2 L'analyse d'huile 8

1.7.3 La thermographie infrarouge 9

1.7.4 La détection ultrasonore 10

1.7.5 L'analyse de courant 10
1.8 Analyse vibratoire 11
1.8.1 Les étapes de l'analyse vibratoire 12
1.8.2 Notions de base de l'analyse vibratoire 12
1.8.2.1 Source des vibrations 13
1.8.2.2 Paramètres de vibration 13
1.8.2.3 Présentation graphique des vibrations 13
1.8.2.4 Indicateur de vibrations 14
1.8.2.5 Traitement des données 15
1.8.2.6 Méthodologie de surveillances 16
1.8.2.7 Catégories de surveillance des machines tournantes 16
1.9 Technologies de l'analyse vibratoire 18
1.9.1 Capteurs 18
1.9.2 Catégories de capteurs de vibration 19
1.9.2.1 Capteur de déplacement (Proximètre) 20
1.9.2.2 Capteur de vitesse (Vélocimétre) 21
1.9.2.3 Capteurs d'accélération 22
1.9.2.4 Évaluation comparative des capteurs de vibrations 24
1.10. Conclusion 26
Chapitre 2 : Vue d'ensemble sur la Centrale électrique de BERROUAGHIA 27
2.1 Introduction 27
2.2. Présentation de la société SONELGAZ 27
2.3. Description de la centrale de Berroughia 27
2.3.1. Situation géographique 27
2.3.2. Superficie 28
2.3.3. Principales caractéristiques de la centrale 28
2.3.4. Évacuation de l'énergie électrique 28
2.3.5. Principales caractéristiques techniques de la centrale 29
2.4 Aperçu de l'installation de la centrale thermoélectrique à turbine à gaz 29
2.4.1 Turbine à gaz 29

2.4.2 Générateur électrique....30
2.4.3 Transformateur électrique....31
2.5 Principe de fonctionnement du processus de production d'énergie électrique à partir d'une turbine à gaz....31
2.6 Fonctionnement thermodynamique de la turbine à gaz....33
2.7 Caractéristiques de fonctionnement de la turbine à gaz....34
2.8 L'installation de la centrale électrique de Berrouaghia.....36
2.8.1 Station de gaz....36
2.8.2 Système de ravitaillement en carburant....36
2.8.3 Section compresseur avec système de filtrage d'air....37
2.8.4 Chambre de combustion....38
2.8.5 Système de lubrification du turbo-alternateur....41
2.8.6 Générateur....42
2.8.7 Installations complémentaires....43
2.9 Conclusion....44
Chapitre 3 : Surveillance d'une machine tournante à SPE....45
3.1 Introduction....45
3.2 Description de la machine tournante à surveiller....45
3.3 Méthodologie de surveillance....47
3.3.1 Collection des données....47
3.3.2 Méthodes de tendance linéaire de Holt....47
3.3.3 Algorithme de la méthode de tendance linéaire de Holt....49
3.3.4 Préparation des données....50
3.3.5 Seuils d'intervention....50
3.4 Résultats d'analyse....50
3.5 Conclusion....57
Conclusion Générale....58
Références....59

Annexes.....60

Introduction Générale

Une maintenance optimale des machines tournantes est essentielle pour assurer une production continue et prolonger leur durée de vie. Les méthodes traditionnelles sont souvent réactives, entraînant des pertes économiques. Il est crucial d'équiper les chaînes de production de systèmes de diagnostic fiables pour détecter les défauts avant une défaillance totale. L'analyse vibratoire est la méthode privilégiée, captant les vibrations générées par les défauts et les traitant dans les domaines temporel, fréquentiel et temps-fréquence pour détecter, identifier et localiser les défauts d'origines diverses.

L'objectif de notre travail est de surveiller l'état d'une machine tournante sélectionnée parmi celles du parc de la centrale électrique de **BERROUAGHIA** en utilisant une base de données issue de l'analyse vibratoire des machines tournantes et une méthode de prévision statistique à partir d'une série temporelle. Cette approche vise à assurer la santé à long terme des machines tournantes, en évitant ainsi les incidents et les arrêts imprévus.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres, suivi d'une conclusion générale.

Le premier chapitre aborde des notions générales sur la surveillance conditionnelle des machines tournantes, comprenant une étude description sur la maintenance et ses différents types, en mettant particulièrement l'accent sur la maintenance conditionnelle.

Le deuxième chapitre fournit une description générale de la centrale électrique de BERROUAGHIA, ainsi que la stratégie de surveillance par analyse vibratoire appliquée aux équipements du parc de ladite centrale électrique.

Enfin, le troisième chapitre expose la stratégie de surveillance selon l'approche proposée dans cette étude. Ce mémoire se conclut par une synthèse générale, incluant notre avis .

Chapitre 1 : Fondamentaux de la maintenance préventive et prédictive

1.1 Introduction

Dans le secteur industriel, les machines tournantes deviennent de plus en plus sophistiquées. Pour garantir la production souhaitée et la sécurité de fonctionnement de ces machines, il est essentiel d'adopter une stratégie de maintenance efficace.

Ce chapitre abordera certaines notions relatives à la maintenance des machines tournantes.

1.2. La maintenance

La maintenance englobe toutes les actions visant à maintenir ou rétablir le bon fonctionnement d'un équipement, conformément à la norme AFNOR X60-010-1994. Cela inclut des activités techniques, administratives et de gestion pour maintenir un état ou des conditions spécifiques de sécurité opérationnelle et assurer une fonction déterminée. **[4]**

Les actions de maintenance comprennent le dépannage, la réparation, le réglage, la révision, le contrôle et la vérification d'équipements matériels et immatériels. Un service de maintenance peut également participer à des études d'amélioration des processus industriels, tout en tenant compte de contraintes telles que la qualité, la sécurité, l'environnement et le coût.

1.3. Objectifs de la maintenance [4]

Les objectifs de la maintenance peuvent être regroupés en deux catégories :

Objectifs financiers

- Réduire au minimum les coûts associés à la maintenance.
- Gérer les activités de maintenance dans le cadre d'un budget prédéfini.

Objectifs opérationnels

- Préserver de manière optimale l'état des équipements.
- Maximiser la disponibilité des équipements tout en minimisant les coûts.
- Allonger la durée de vie des équipements.
- Effectuer des entretiens de manière économique et planifier leur remplacement à des intervalles prédéfinis.
- Assurer un fonctionnement sûr et efficace en permanence.
- Éliminer les pannes de manière optimale et avec le meilleur rapport coût-efficacité.

- Maintenir une présentation globalement satisfaisante des équipements.

1.4. Méthodes de maintenance

Il existe plusieurs méthodes de maintenance, dont voici les principales (Figure 1.1):

Maintenance préventive

Elle consiste à effectuer des actions de maintenance régulières et planifiées sur l'équipement, avant l'apparition d'un dysfonctionnement, afin de prévenir les pannes et de prolonger la durée de vie de l'équipement.

Maintenance corrective

Elle est réalisée après l'apparition d'un dysfonctionnement ou d'une panne, et vise à réparer l'équipement pour le remettre en état de fonctionnement.

Maintenance conditionnelle

Appelée aussi maintenance basée sur l'état réel de la machine. Elle consiste à surveiller l'état de l'équipement à l'aide de capteurs et de mesures, et à effectuer des actions de maintenance uniquement lorsque l'état de l'équipement indique qu'une intervention est nécessaire.

Cette approche de maintenance est appliquée aux composants critiques qui, en cas de panne, pourraient entraîner une perte de production importante ou des coûts d'arrêt imprévus et significatifs. Les équipements ciblés par cette forme de maintenance sont ceux dont l'impact d'une panne serait catastrophique pour la production.

Maintenance prédictive (ou prévisionnelle)

Ce type est une extension de la maintenance conditionnelle. Elle utilise des techniques avancées telles que l'analyse des données, l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique pour prédire l'apparition d'un dysfonctionnement et planifier les actions de maintenance en conséquence.

1.5 Choix d'une stratégie de maintenance

La sélection d'une stratégie de maintenance industrielle doit tenir compte de plusieurs facteurs pour répondre aux besoins spécifiques de chaque entreprise. Les éléments clés à considérer pour une maintenance efficace incluent :

- La criticité des équipements
- La fréquence d'utilisation des équipements

- L'évaluation des conséquences des pannes
- Les compétences des équipes de maintenance
- L'évaluation des coûts de maintenance

Une fois la stratégie de maintenance choisie, sa mise en œuvre implique :

- La sélection des indicateurs de performance (descripteurs)
- L'acquisition des outils de maintenance les plus adaptés
- La formation des équipes de maintenance sur les indicateurs et outils choisis

1.6 Processus de maintenance conditionnelle [4]

La maintenance conditionnelle, également connue sous le nom de maintenance basée sur l'état réel de la machine (Figure 1.2), est une approche avancée qui permet aux industriels de maximiser l'efficacité de leurs équipements tout en minimisant les coûts de maintenance et les temps d'arrêt non planifiés. Cette approche comporte les étapes suivantes : Détection du défaut, diagnostic et pronostic

.

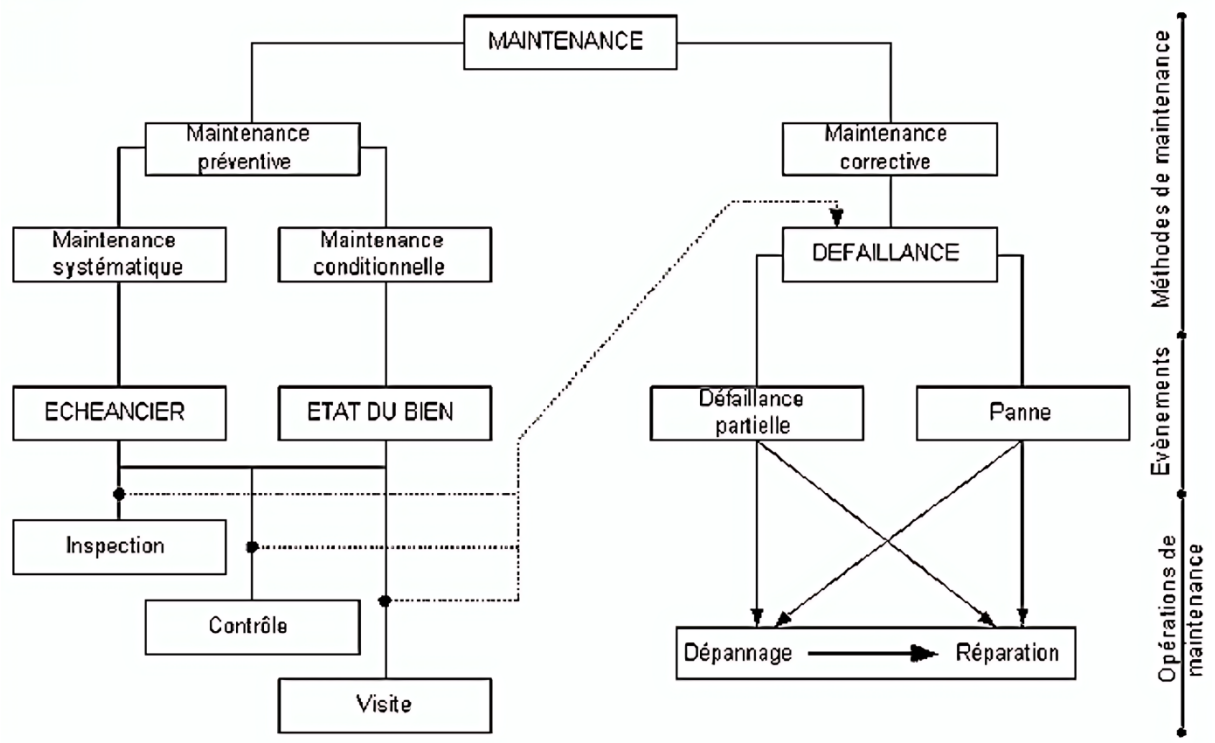


Figure 1. 1 Méthodes de maintenance

1.6.1 Détection du défaut

Initialisation : Lors de la mise en service d'une machine ou après une réparation, des données de base sont collectées. Ces données incluent des paramètres tels que la

vibration, la température, et d'autres indicateurs de performance.

Surveillance continue : Ces données initiales servent de référence pour la surveillance continue du fonctionnement de la machine. Les paramètres sont surveillés en temps réel ou à des intervalles réguliers, permettant ainsi de détecter toute déviation par rapport au comportement normal.

1.6.2 Diagnostic

Identification du problème : Dès qu'une anomalie est détectée, le système analyse la déviation par rapport signal la machine bon santé. Cela peut impliquer l'utilisation des outils comme le FFT, le cepstre, le spectre d'enveloppe, d'autres outils de diagnostic.

Évaluation de la gravité : Une fois le défaut identifié, son impact sur le fonctionnement de la machine et sa gravité sont évalués. Cela aide à planifier les actions de maintenance de manière plus ciblée et efficace.

1.6.3 Pronostic

Prévision des pannes : L'analyse de tendance consiste à examiner l'évolution des paramètres au fil du temps pour prédire quand une panne pourrait survenir. Cette approche permet d'anticiper les besoins de maintenance et de planifier les interventions de manière proactive, évitant ainsi les arrêts imprévus.

Planification de la maintenance : Sur la base des informations recueillies, les mainteneurs peuvent planifier les réparations ou les remplacements nécessaires à l'avance, pendant les périodes d'arrêt programmé ou à des moments qui minimisent l'impact sur la production.

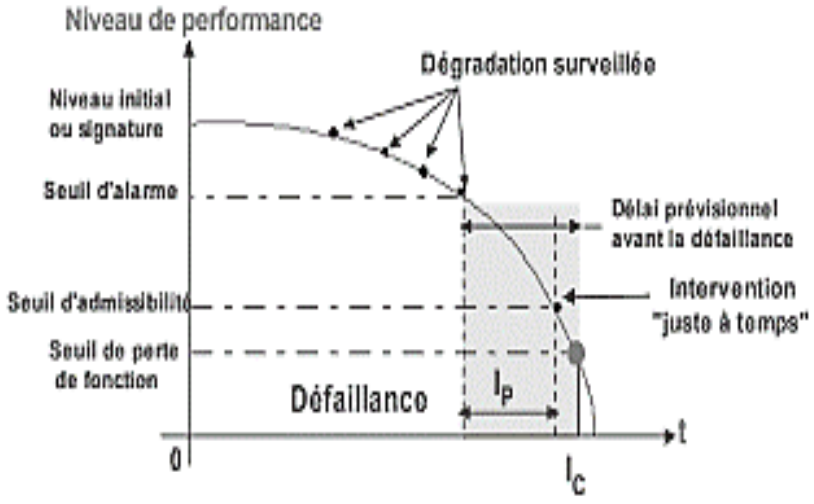


Figure 1. 2 Courbe de surveillance de l'état d'un équipement

1.7 Outils de maintenance préventive conditionnelle et prévisionnelle

L'état de santé d'une machine peut être évalué par diverses analyses permettant de quantifier la dégradation de ses composants, tels que :

- **L'analyse vibratoire** pour détecter des défauts mécaniques, tels que des déséquilibres, des défauts d'alignement, etc.
- **L'analyse d'huile** pour détecter des particules d'usure
- **La thermographie infrarouge** pour identifier des fuites, des serrages insuffisants, etc.
- **La détection ultrason** pour détecter les signaux acoustiques émis par des matériaux ou structures sous contrainte (par exemple, des fissures dans un matériau).
- **L'analyse de courant** pour repérer des barres rotoriques cassées sur un moteur

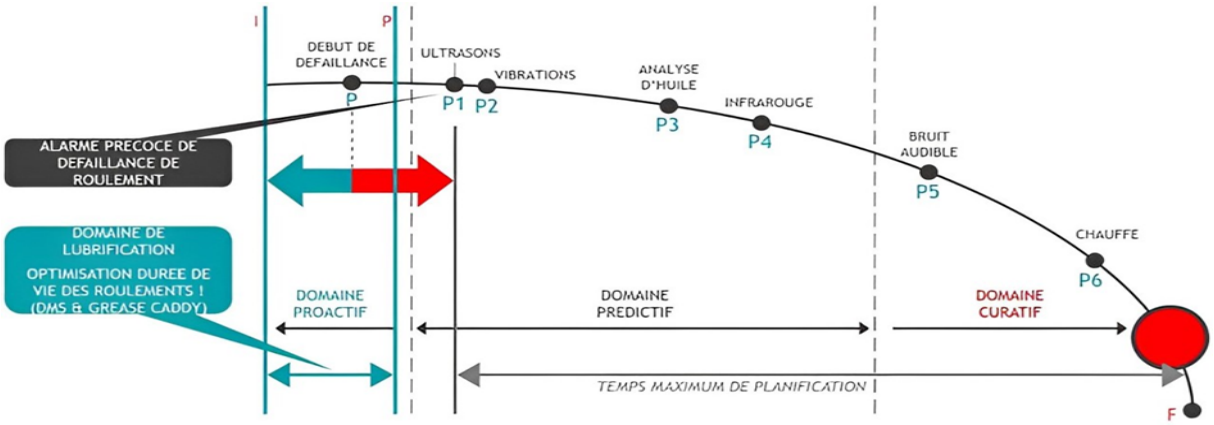


Figure 1. 3 Techniques de maintenance conditionnelle

1.7.1 L'analyse Vibratoire

L'analyse vibratoire est une technique de diagnostic en maintenance préventive, conditionnelle et prévisionnelle utilisée pour surveiller les vibrations des équipements industriels tels que les moteurs, pompes, turbines, compresseurs, etc. Elle consiste à mesurer les vibrations mécaniques générées par ces équipements et à les analyser pour détecter les signes d'usure, déséquilibre, mauvaise lubrification ou autres anomalies indiquant des problèmes potentiels.

L'analyse vibratoire repose sur le fait que tout équipement en mouvement génère des vibrations reflétant les forces internes, qui varient en fonction de l'état de l'équipement. Les vibrations sont mesurées à l'aide de capteurs tels que des accéléromètres, vélocimètres ou sondes de proximité, et les données sont traitées et

interprétées par des analyseurs de vibration. Elle permet de détecter les signes d'usure avant que les pannes ne se produisent, permettant aux entreprises de planifier et programmer les opérations de maintenance avant les arrêts d'équipement.

L'analyse vibratoire permet de surveiller l'apparition et l'évolution de défauts tels que :

- Défauts de roulements (usure, corrosion)
- Défauts de lubrification (huile, graisse)
- Défauts de balourd (déséquilibre)
- Défauts de denture sur les engrenages (usure, fissures)
- Défauts d'alignement (parallèle, angulaire)
- Tenue mécanique des liaisons
- Modifications des fréquences de résonance
- Fissuration d'arbre
- Défauts magnétiques (moteurs électriques)

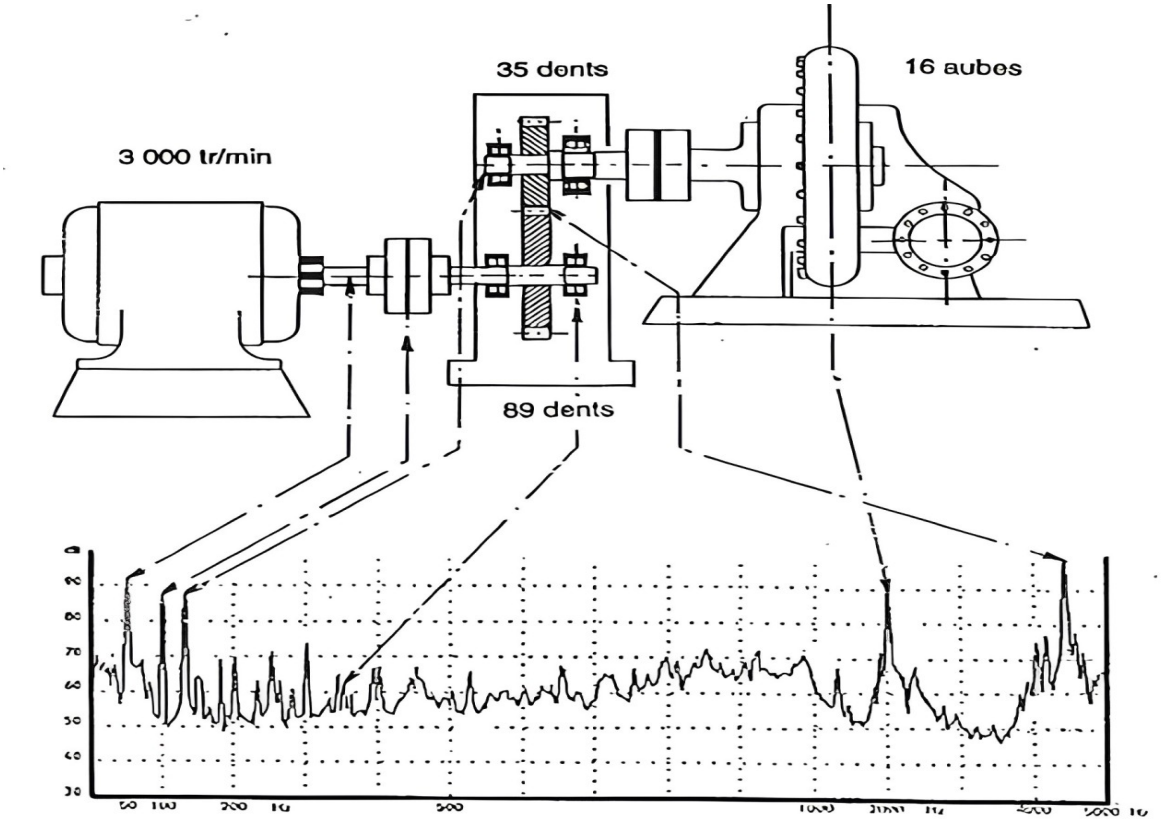


Figure 1. 4 Identification des défauts mécaniques

Il est recommandé de réaliser régulièrement des analyses vibratoires sur les machines tournantes pour surveiller leur état et détecter les signes de détérioration avant qu'ils ne deviennent critiques.

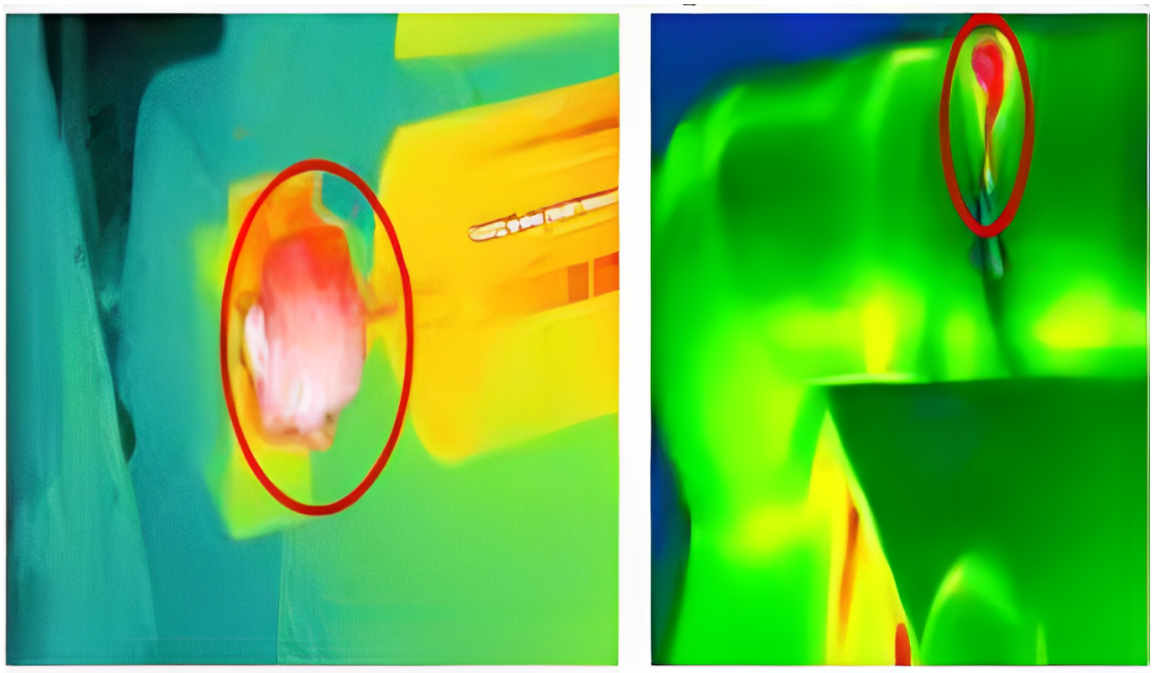
1.7.2 L’analyse d’huile

La surveillance de la qualité des lubrifiants dans les équipements est cruciale pour diagnostiquer leur état. En analysant les caractéristiques physicochimiques de l'huile, en contrôlant sa pollution interne et externe, et en surveillant l'usure des machines, on peut détecter divers problèmes. Parmi les paramètres surveillés figurent la viscosité, l'indice d'acide, l'indice de base, et la teneur en particules métalliques. Cette surveillance permet d'identifier la contamination de l'huile par des éléments externes ou la dégradation de l'huile elle-même, ce qui peut réduire son efficacité et endommager l'équipement. Des capteurs peuvent être installés pour détecter les débris ferreux et alerter en cas d'usure excessive. L'analyse d'huile, recommandée une à deux fois par an pour les machines critiques, complète l'analyse vibratoire pour diagnostiquer les défauts mécaniques.

1.7.3 La thermographie infrarouge

La thermographie infrarouge est une méthode de diagnostic non intrusive qui utilise une caméra thermique pour détecter les variations de température et identifier les points chauds, indiquant d'éventuels problèmes. Elle s'applique aux équipements électriques et mécaniques, ainsi qu'aux fours réfractaires, équipements réfrigérés et calorifuges, réduisant ainsi les coûts énergétiques.

Les défauts couramment détectés incluent les surcharges, déséquilibres de phase et défauts de connexion dans les installations électriques, les surchauffes dues à la friction excessive, désalignement, problèmes de lubrification ou usure excessive dans les équipements mécaniques, les fuites dans les systèmes de refroidissement ou de chauffage, et les problèmes de refroidissement causés par des obstructions ou dysfonctionnements des ventilateurs. La thermographie infrarouge nécessite une caméra thermique, également appelée caméra infrarouge, qui mesure le rayonnement électromagnétique émis par les équipements.



Défaut sur un palier Fuite sur une canalisation

Figure 1. 5 Défauts identifiés par la thermographie infrarouge

1.7.4 La détection ultrasonore

La détection ultrasonore est une méthode de maintenance préventive et prédictive qui analyse les sons à haute fréquence émis par les équipements en fonctionnement. Elle est utilisée pour identifier les défauts électriques et mécaniques. Dans l'inspection des machines tournantes, elle permet de repérer les défauts de roulements, d'engrenages, les problèmes de lubrification, détecter les fissures et les ruptures dans les composants, ainsi que les composants desserrés. De plus, elle est un outil efficace pour identifier et localiser les fuites dans les réseaux d'air comprimé, de gaz ou sous vide, contribuant ainsi à la sobriété énergétique. Les détecteurs ultrasonores sont équipés d'un microphone, d'un amplificateur et d'un écran ou d'un casque pour afficher ou rendre audible le signal. Les caméras ultrasonores, particulièrement utiles dans les environnements bruyants ou avec de multiples sources de fuites, rendent les ultrasons visibles.

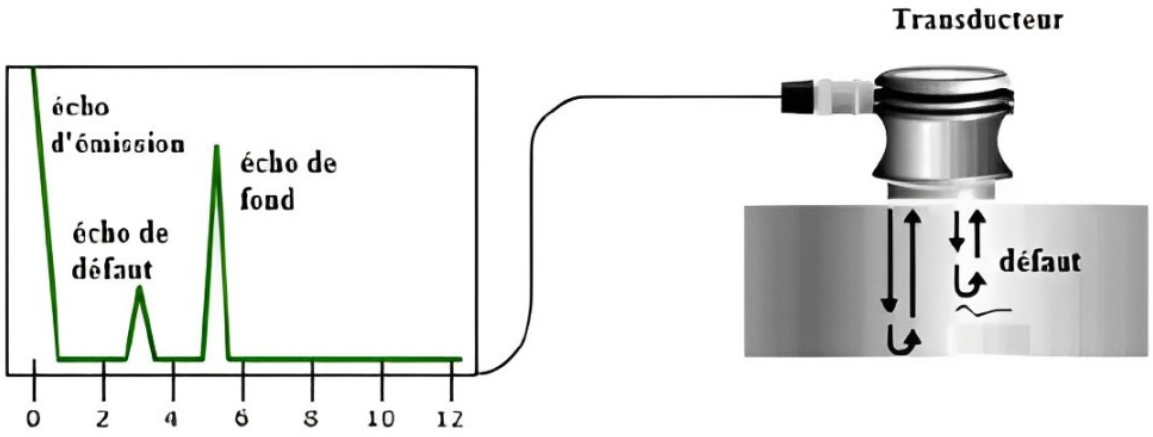


Figure 1. 6 Fissure identifiée par détection ultrasonore

1.7.5 L'analyse de courant

L'analyse des courants électriques est une méthode de diagnostic avancée en maintenance préventive et prévisionnelle. Elle vise à mesurer et à analyser les courants dans les équipements électriques pour identifier les anomalies et les problèmes de fonctionnement. Appliquée à des équipements tels que moteurs, transformateurs, générateurs et variateurs de fréquence, cette technique révèle que plus de 50% des pannes de moteurs sont d'origine électrique, non mécanique. Elle permet de détecter divers défauts électriques, tels que surcharges, déséquilibres, problèmes de qualité d'alimentation, courts-circuits, défauts d'isolation et problèmes de contact. De plus, elle aide à identifier des dysfonctionnements mécaniques comme les problèmes de lubrification ou les vibrations excessives, qui affectent les courants électriques. L'analyse se fait à l'aide d'appareils spécialisés, comme les analyseurs de courant, qui mesurent l'amplitude, la fréquence, la forme d'onde et la phase des courants.

Il est difficile de choisir les outils de diagnostic les plus appropriés pour un équipement spécifique et de déterminer le moment idéal pour réaliser les analyses et inspections. Cependant, en combinant différentes techniques de diagnostic, on peut maximiser la fiabilité et la durée de vie des équipements, réduire les temps d'arrêt et améliorer la rentabilité globale de l'entreprise.

1.8 Analyse vibratoire

L'analyse vibratoire implique la mesure et l'analyse des vibrations générées par les machines en rotation, comme les moteurs, les pompes, les compresseurs, etc. Ces vibrations servent d'indicateurs importants de l'état de fonctionnement des machines et peuvent dévoiler des problèmes tels que des désalignements, des déséquilibres, des roulements endommagés, etc. Maîtriser les principes fondamentaux de l'analyse vibratoire est crucial pour interpréter correctement les données recueillies et prendre des décisions éclairées en matière d'entretien. **[3]**

L'analyse vibratoire offre de nombreux avantages aux entreprises :

- Détection précoce des défauts, permettant une intervention rapide et la prévention de pannes majeures.
- Diagnostic approfondi des équipements, facilitant l'identification des problèmes sous-jacents et la planification des réparations.
- Surveillance continue en temps réel, assurant une maintenance proactive et optimisée.
- Possibilité de surveillance à distance, réduisant les coûts de déplacement et augmentant la flexibilité.

L'analyse vibratoire présente également quelques inconvénients

- Interprétation parfois complexe des spectres vibratoires, nécessitant des compétences spécialisées pour une analyse précise.
- Coût relativement élevé pour la mise en place et le maintien d'un système de surveillance continue, bien que les économies potentielles sur la maintenance et la réduction des temps d'arrêt puissent compenser ces dépenses.

1.8.1 Les étapes de l'analyse vibratoire [2]

Les étapes de l'analyse vibratoire se déroulent comme suit :

1. **Collecte des données**

Des capteurs de vibration sont placés sur les machines en rotation pour mesurer leurs vibrations. Les données recueillies sont ensuite capturées à l'aide d'instruments de mesure spécialisés.

2. **Analyse des données**

Les données de vibration sont analysées à l'aide de logiciels d'analyse vibratoire avancés. Des techniques telles que l'analyse fréquentielle, temporelle et spectrale sont utilisées pour extraire des informations sur l'état de fonctionnement de la machine.

3. **Interprétation des résultats**

Des experts en maintenance interprètent les résultats de l'analyse vibratoire pour identifier les signaux d'alerte, les tendances de dégradation et formuler des recommandations d'action.

4. Planification de la maintenance

En fonction des résultats de l'analyse vibratoire, des actions de maintenance préventive sont planifiées, telles que l'équilibrage des rotors, le remplacement des roulements ou le réalignement des machines.

1.8.2 Notions de base de l'analyse vibratoire [2]

L'analyse vibratoire repose sur l'étude des vibrations mécaniques générées par les machines en fonctionnement. Les vibrations sont des oscillations mécaniques qui se produisent autour d'une position d'équilibre. Lorsqu'une machine tourne, elle génère des vibrations qui peuvent être mesurées et analysées pour identifier des problèmes tels que des déséquilibres, des désalignements, des défaillances de roulements, et des défauts d'engrenages.

1.8.2.1 Source des vibrations

Les sources d'excitation vibratoire dans les machines tournantes peuvent être classées en différentes catégories :

- Forces périodiques (balourd)
- Forces transitoires (variations de charge)
- Forces impulsionnelles (chocs)
- Forces aléatoires (frottements)

Les phénomènes à l'origine des vibrations dépendent de la constitution de la machine et de ses paramètres de fonctionnement. Les plus courants sont présentés dans ce chapitre, ainsi que leurs manifestations typologiques, afin de permettre leur identification et leur suivi dans le cadre d'un programme de maintenance conditionnelle.

1.8.2.2 Paramètres de vibration [3]

Les principaux paramètres utilisés en analyse vibratoire sont :

Amplitude

L'amplitude indique la grandeur maximale de la vibration, souvent mesurée en millimètres ou microns pour les déplacements, en millimètres par seconde pour les

vitesses, et en mètres par seconde carrée pour les accélérations.

Fréquence

La fréquence des vibrations est mesurée en Hertz (Hz) et correspond au nombre d'oscillations par seconde.

Phase

La phase indique le décalage dans le temps entre deux signaux vibratoires et est mesurée en degrés.

1.8.2.3 Présentation graphique des vibrations [5]

Signature

Tous les équipements rotatifs génèrent des signaux de vibration unique, appelé signature. Ces signaux présentent l'amplitude (axe Y) en fonction du temps (axe X).

Spectre

Le spectre trace l'amplitude (axe Y) par rapport à la fréquence (axe X) des signaux individuels. Il est obtenu en appliquant la transformée de Fourier rapide (FFT) sur le signal vibratoire. La FFT décompose le signal en ses composants fréquentiels, permettant d'identifier les sources de vibration.

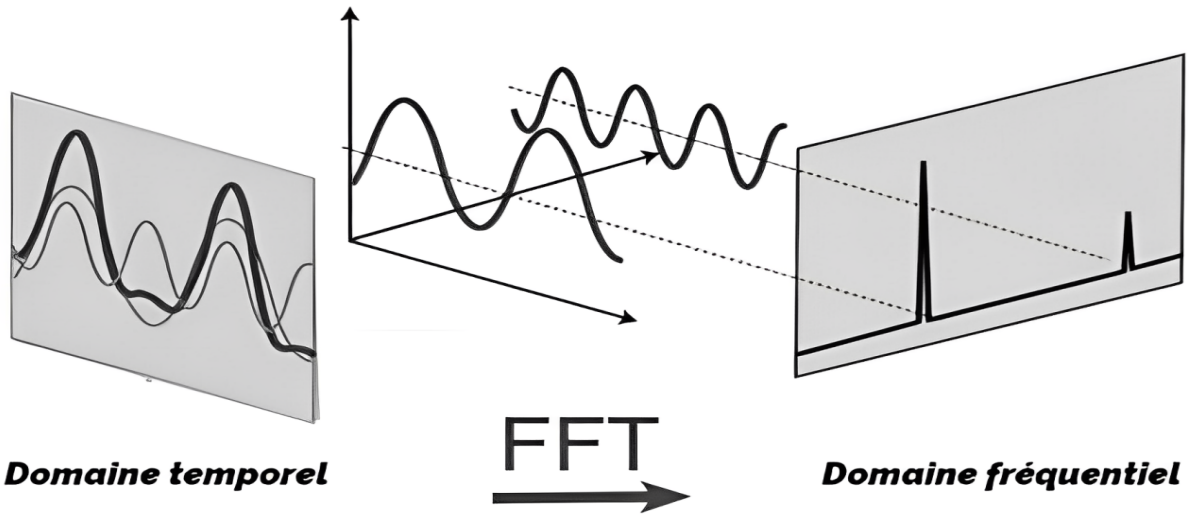


Figure 1. 7 Présentation d'un signal dans les domaines : temporel et fréquentiel

1.8.2.4 Indicateur de vibrations [5]

La reconnaissance des vibrations est essentielle pour identifier l'origine d'une anomalie dans les machines tournantes. Voici quelques indicateurs couramment utilisés

pour caractériser les vibrations :

RMS (Root Mean Square) : L'indicateur RMS est la racine carrée de la moyenne des carrés des valeurs d'amplitude du signal vibratoire. Il donne une idée de l'amplitude globale des vibrations. Mathématiquement, il est défini comme suit :

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i^2} \quad (1.1)$$

où N est le nombre d'échantillons et x_i est la valeur de l'échantillon *i.*

Kurtosis : Le kurtosis mesure la forme de la distribution des amplitudes des vibrations. Une valeur élevée de kurtosis indique une distribution plus pointue (avec des pics plus prononcés) et peut être associée à des défauts localisés. Mathématiquement, le kurtosis est donné par :

$$Kurtosis = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \left(\frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}\right)^4 \quad (1.2)$$

où $\bar{x}$ est la moyenne et σ est l'écart type des amplitudes.

Valeur crête (Peak Value) : La valeur crête représente l'amplitude maximale du signal vibratoire. Elle est utile pour détecter des événements transitoires ou des pics soudains. Mathématiquement, elle est simplement la valeur maximale du signal.

Ces indicateurs peuvent être extraits à partir des signaux vibratoires en utilisant des techniques de traitement du signal. En plus de ces indicateurs, d'autres mesures telles que le spectre de fréquence, et l'analyse en ondelette peuvent également être utilisées pour une analyse plus approfondie et spécifique des anomalies.

1.8.2.5 Traitement des données

Chaque indicateur de vibration a un seuil basé sur la nature des défauts, le type de machine et les conditions de fonctionnement. Tant que l'indicateur reste sous ce seuil, l'équipement est en bon état, sans besoin d'investigation, d'arrêt ou de correction. Choisir le seuil est crucial : une valeur trop basse entraîne des alarmes injustifiées, tandis qu'une valeur trop élevée empêche la détection précoce des défauts, risquant des pannes non détectées. Les systèmes de surveillance ont généralement deux seuils :

Seuil d'alarme : Déclenche un diagnostic pour identifier l'anomalie.

Seuil de danger : Déclenche l'arrêt de l'équipement pour sécurité.

Les seuils d'intervention peuvent être déterminés de deux manières principales : soit en se référant à la norme ISO 10816, qui établit des seuils généraux applicables à

différentes catégories de machines (telles que les pompes, les ventilateurs, les compresseurs, etc.), soit par les industriels eux-mêmes, dans le cadre de leur expertise spécifique en analyse des vibrations. Ces derniers peuvent ajuster les seuils recommandés par la norme pour mieux correspondre aux particularités de leurs équipements et de leurs conditions d'exploitation.

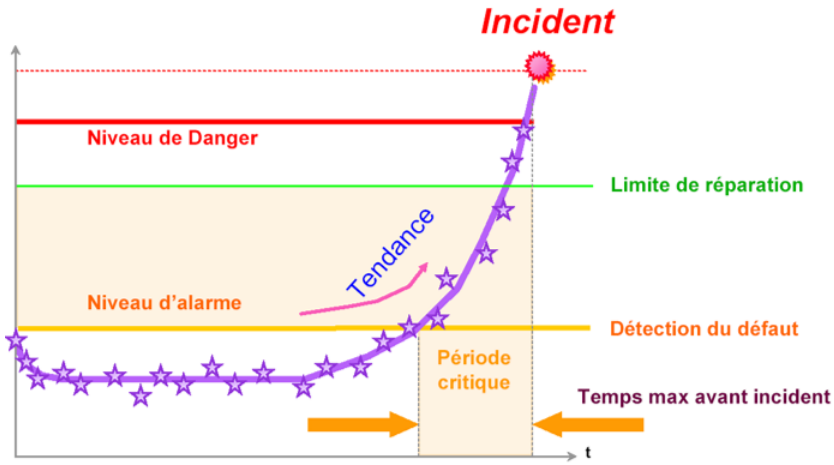


Figure 1. 8 Seuils d'intervention

1.8.2.6 Méthodologie de surveillances [4]

La figure 3.10 présente les différentes étapes de la méthodologie de surveillance d'un équipement.

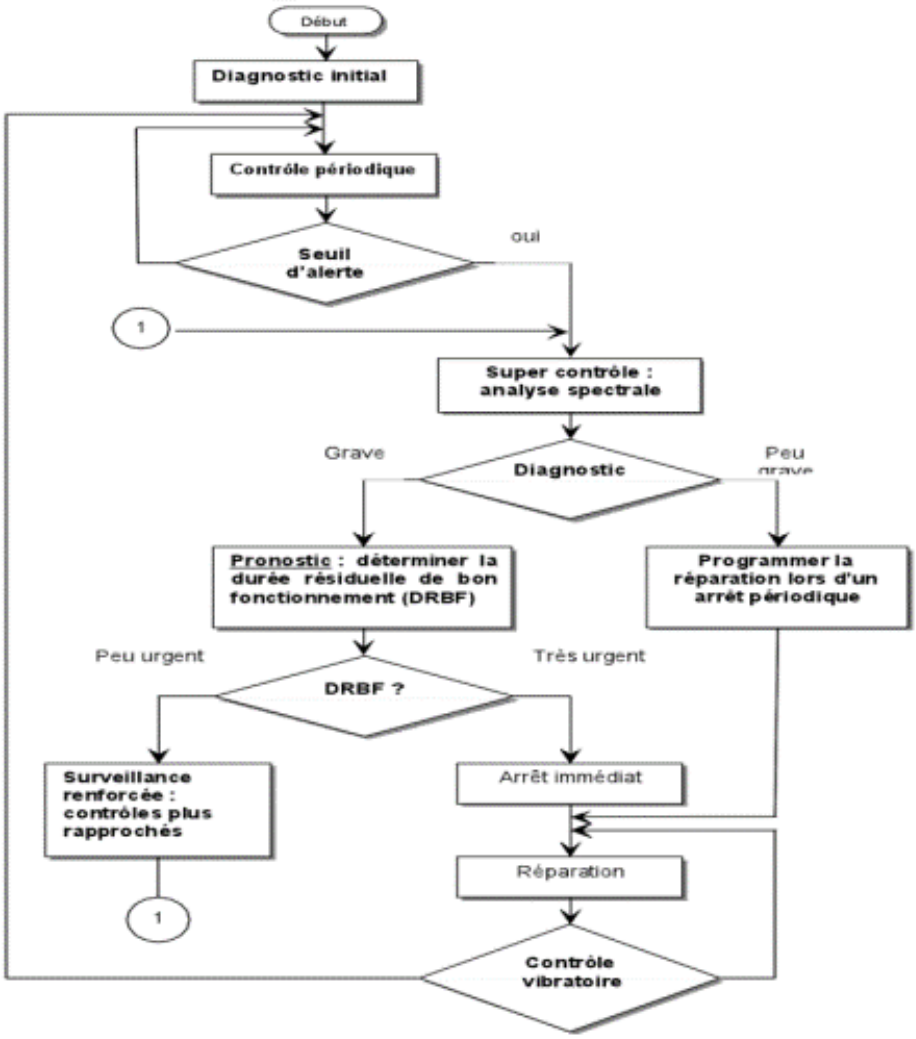


Figure 1. 9 Méthodologie de surveillance

1.8.2.7 Catégories de surveillance des machines tournantes

Il existe deux catégories de surveillance des machines tournantes : en ligne et hors

La surveillance en ligne (ou continue)

La surveillance en ligne (Figure 1.11) est conçue pour déclencher des alertes immédiates en cas de changement soudain, permettant ainsi de prendre des mesures rapides. Pour être efficace, ces systèmes doivent présenter plusieurs caractéristiques essentielles : fiabilité, stabilité à long terme, insensibilité aux conditions environnementales et robustesse pour fonctionner sans faille dans des environnements exigeants.

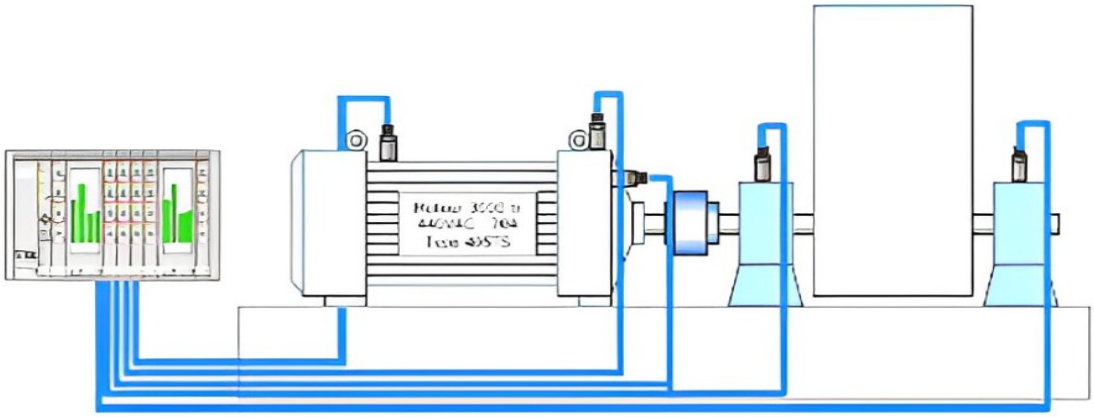


Figure 1. 10 Surveillance On-line, système d'acquisition fixe

Surveillance hors ligne (ou périodique)

La surveillance hors ligne consiste en un suivi périodique des paramètres opérationnels, réalisé en dehors du contexte de fonctionnement normal. Dans ce cadre, les mesures sont effectuées à des intervalles prédéfinis par un opérateur équipé d'un collecteur de données portable, souvent informatisé, tel que le Schenck Vibrotest V160, par exemple. L'investissement en capteurs est minimisé puisqu'un seul capteur portable est généralement suffisant pour réaliser les mesures nécessaires.

Contrairement à la surveillance continue, la surveillance périodique est préconisée pour les machines qui présentent un risque de panne faible, pour les dégradations qui évoluent progressivement, et dans les situations où un contrôle mensuel ou bimensuel est considéré comme adéquat. Cette approche implique donc une analyse préliminaire de la criticité des défauts potentiels, suivie d'un ajustement de la fréquence de surveillance en fonction des résultats obtenus.

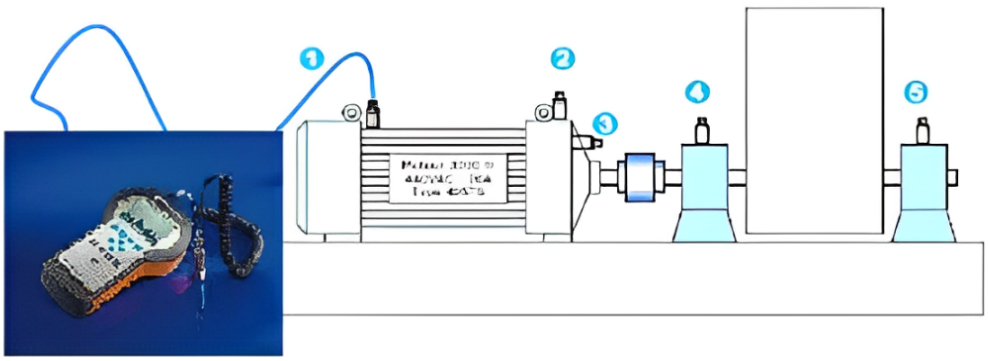


Figure 1. 11 Surveillance offline, système acquisition portable

Mise en œuvre des investissements pour les deux types de surveillance

- En ligne : Les coûts d'investissement sont élevés tandis que les coûts de mise en œuvre sont bas.
- Hors ligne : Les coûts d'investissement sont bas, mais les coûts de mise en œuvre sont élevés.

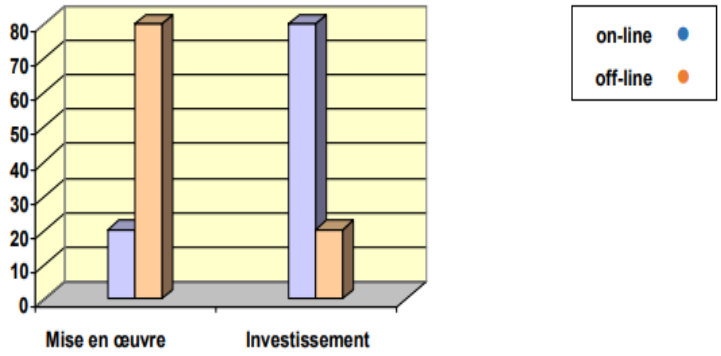


Figure 1. 12 Investissement et mise en œuvre de deux types de surveillance.

1.9 Technologies de l'analyse vibratoire

La surveillance vibratoire peut être réalisée à l'aide de deux technologies distinctes

Mesure directe du déplacement des éléments tournants

Cette méthode utilise des capteurs à courants de Foucault, mais les aspects liés aux mesures. La technologie associée à cette approche est largement utilisée dans la surveillance des machines à paliers hydrauliques (à joint d'huile), généralement réalisée en temps réel (on-line). Les capteurs enregistrent continuellement les mouvements des arbres, permettant ainsi la détection immédiate de problèmes par l'activation d'alertes.

Mesure de l'accélération subie par les éléments fixes de la machine

Dans ce cas, les méthodes utilisées sont plus abordables pour les structures de petite taille. À l'aide d'un accéléromètre connecté à un système de collecte de données, le technicien recueille les vibrations éprouvées par les carter des machines. Cette technique convient aussi bien à la surveillance en temps réel (on-line) qu'à la surveillance périodique réalisée lors de visites selon un calendrier prédéfini.

1.9.1 Capteurs [1]

Le capteur, indépendamment du type de signal qu'il génère (accélération, vitesse, déplacement, etc.), représente le premier élément de la chaîne de mesure. Son rôle consiste à convertir le mouvement vibratoire en un signal électrique.

Les caractéristiques principales d'un capteur incluent :

- Sa sensibilité.
- Sa dynamique.
- Sa bande passante.
- Sa résistance à la température.
- Ses paramètres d'influence.
- Sa masse et ses dimensions.
- Fréquence de résonance

1.9.2 Catégories de capteurs de vibration

Un capteur de vibration est un transducteur capable de convertir en signal électrique le niveau de vibrations qu'il subit à un instant donné. Dans l'industrie, pour la maintenance préventive basée sur l'analyse vibratoire, on utilise principalement des capteurs de déplacement, des capteurs de vitesse et des capteurs d'accélération.

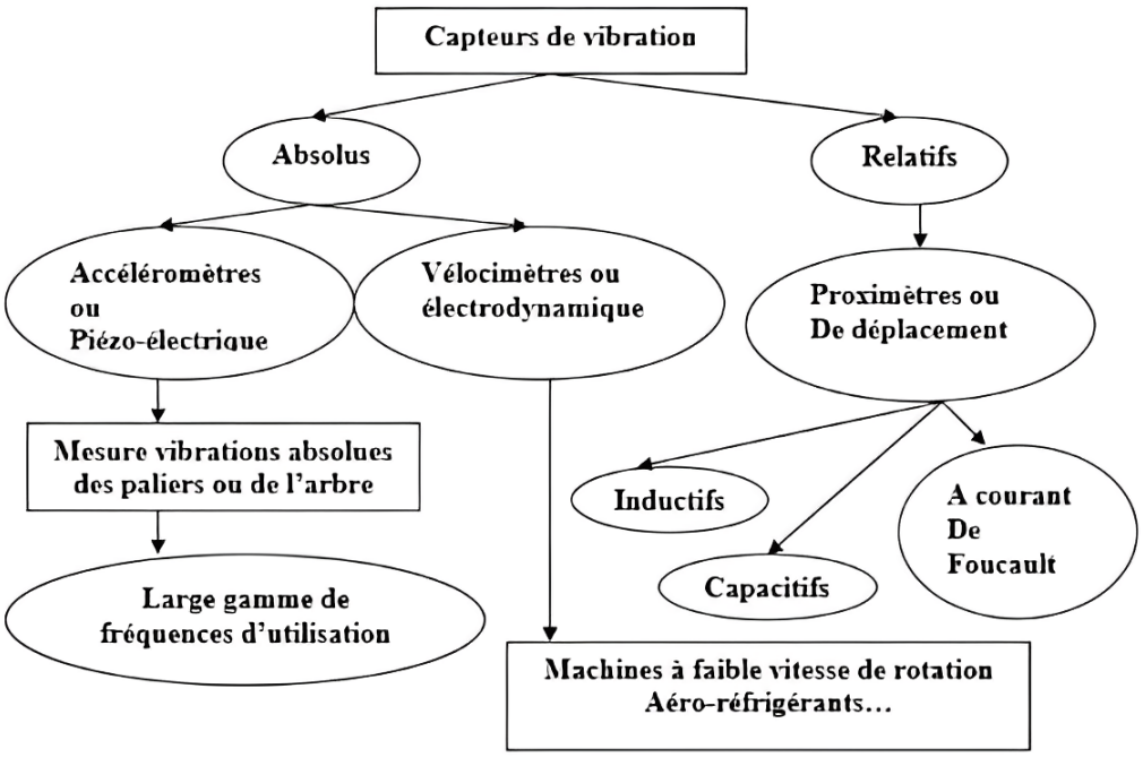


Figure 1. 13 Catégories de capteurs de vibration

1.9.2.1 Capteur de déplacement (Proximètre) [1][4]

Les capteurs de proximité, également connus sous les noms de capteurs sans contact ou capteurs de déplacement, sont utilisés pour mesurer les vibrations relatives de l'arbre d'une machine en rotation. Ils servent également à mesurer la distance ou le déplacement et se classent en trois catégories principales :

Capteurs de déplacement capacitifs : Ces capteurs compacts fonctionnent sans contact physique et offrent une sensibilité élevée sur une large gamme de fréquences pour détecter les déplacements vibratoires relatifs. Toutefois, leur calibration est complexe et nécessite l'application d'une différence de potentiel entre le capteur et la pièce en mouvement.

Potentiomètres de position : Ces capteurs sont conçus pour mesurer les déplacements statiques mais ont une gamme de fréquences limitée, une durée de vie relativement courte et une résolution faible.

Capteurs de déplacement à courants de Foucault : Préférés dans les environnements industriels difficiles en raison de leur résistance à la température et leur fiabilité en présence d'huile, de vapeur et de poussière, ces capteurs fonctionnent en utilisant une bobine intégrée dans la tête du capteur, qui génère des courants de Foucault dans une cible métallique. Le signal oscillant produit est redressé et linéarisé pour générer une tension continue proportionnelle à la distance entre le capteur et la cible.

Avantages et limites d'utilisation

Ces capteurs sont principalement utilisés pour surveiller les machines à paliers à film d'huile, pour mesurer le déplacement axial et radial de l'arbre, et pour détecter précocement les défauts dans le cadre de la maintenance prédictive, assurant ainsi la sécurité des installations. Leur efficacité est limitée aux défauts se produisant à basses fréquences, généralement jusqu'à l'ordre 4 de la fréquence de rotation. Ils sont souvent placés à l'extrémité de l'arbre pour mesurer les déplacements latéraux ou montés en paires à 90° sur les paliers pour déterminer l'orbite de déplacement de l'arbre.

Caractéristiques des capteurs de proximité

Les critères de sélection pour ces capteurs incluent la sensibilité pour la mesure des vibrations et la distance de mesure pour la détermination de la position. La gamme de fréquences et la température d'opération sont généralement prédéfinies et ne sont pas des critères de sélection. Par exemple, pour la série TQ 400, la gamme de fréquence va de 0 à 20 kHz et la gamme de température de -40 à 180 °C avec une dérive inférieure

à 5%, et de 180 à 220 °C avec une dérive supérieure à 5%.

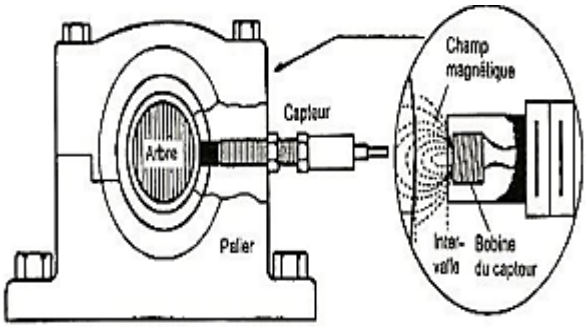


Figure 1. 14 Principe du capteur à courants de Foucault

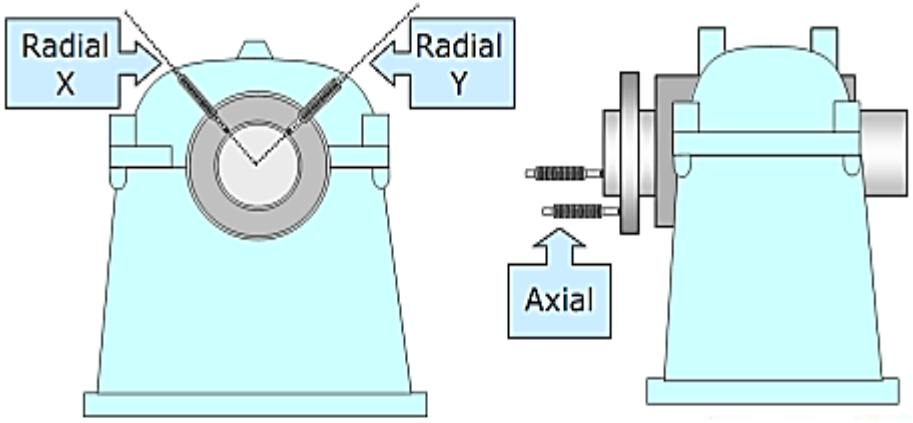


Figure 1. 15 Positionnement des capteurs de déplacement

1.9.2.2 Capteur de vitesse (Vélocimétre) **[1]**

Les vélocimètres, capteurs électrodynamiques auto-générateurs, jouent un rôle crucial dans la maintenance conditionnelle des machines tournantes. Ils mesurent la vitesse de déplacement d'une bobine par rapport à un champ magnétique, générant une tension proportionnelle à cette vitesse. Lorsque la pièce métallique contenant les spires se déplace, le flux magnétique varie, induisant ainsi un courant dans la bobine. En analysant les vibrations des machines grâce à ces capteurs, les techniciens peuvent détecter précocement des défauts tels que déséquilibres, désalignements ou défauts de roulements, permettant une maintenance prédictive et la prévention de pannes coûteuses.

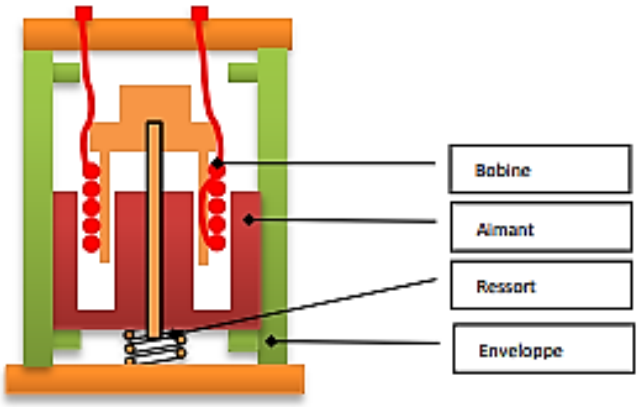


Figure 1. 16 Structure d'un vélocimètre

1.9.2.3 Capteurs d'accélération (accéléromètre)

Les accéléromètres piézoélectriques sont reconnus comme les capteurs les plus efficaces pour mesurer les vibrations absolues et sont largement utilisés dans la surveillance des machines tournantes. Ils sont adaptés à une large gamme de fréquences et offrent une excellente linéarité sur une plage très étendue (généralement de 140 dB). Le signal d'accélération peut être intégré électroniquement pour fournir des données de déplacement et de vitesse.

Principe de mesure

Les accéléromètres permettent de mesurer les vibrations absolues des paliers des machines tournantes. Un capteur d'accélération piézoélectrique est composé d'une masse mobile qui agit sur un cristal de céramique. Lorsque le capteur est exposé à des vibrations, la masse mobile transmet sa force d'inertie aux éléments piézoélectriques situés entre la base du capteur et la masse. Grâce à l'effet piézoélectrique, une charge électrique proportionnelle à la force, et donc à l'accélération, est générée à la surface de ces éléments.

Les éléments piézoélectriques sont fabriqués à partir de cristaux ou de céramiques synthétiques, permettant d'atteindre des sensibilités élevées dans une plage de température allant jusqu'à 250 °C. Par conséquent, un seul élément peut suffire pour construire un accéléromètre. Cependant, si la céramique est exposée à une température supérieure à 250 °C, elle perd définitivement ses propriétés piézoélectriques.

Selon l'orientation de l'élément piézoélectrique à l'intérieur du capteur, on distingue les capteurs de compression des capteurs de cisaillement, ces derniers étant plus sensibles aux forces appliquées dans plusieurs directions.

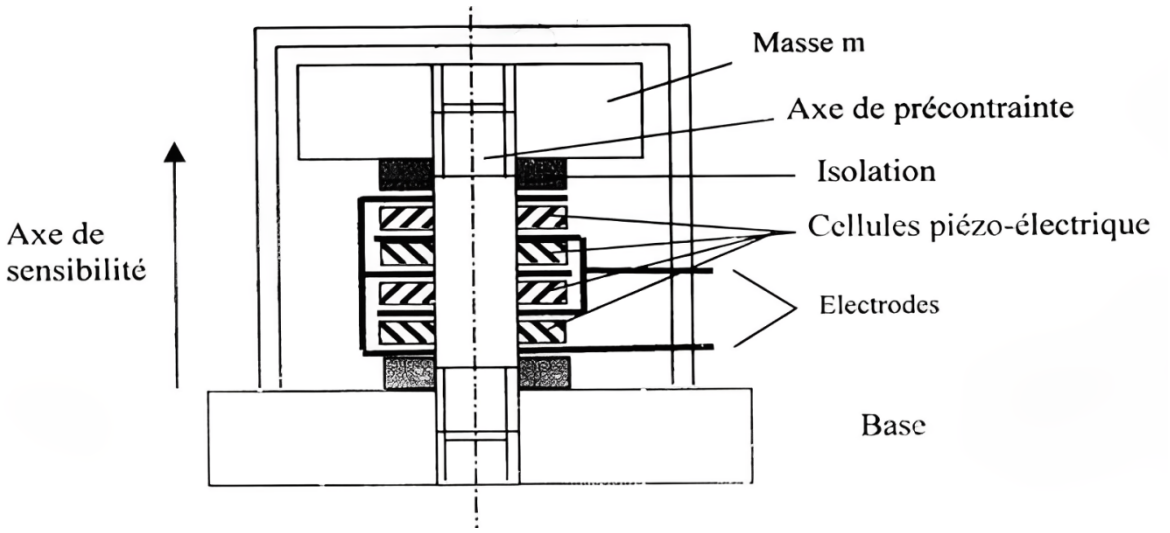


Figure 1. 17 Schéma de principe d'un accéléromètre

Points de mesure

L'installation de l'accéléromètre sur les machines est cruciale. Chaque série de mesures doit être effectuée à des points spécifiques et constants. L'objectif est de placer les points de mesure le plus près possible des paliers pour obtenir une représentation complète des vibrations en trois dimensions. Cela nécessite des mesures dans trois directions perpendiculaires sur chaque palier de la machine surveillée : deux directions radiales (horizontale et verticale) et une direction axiale. En pratique, une seule mesure axiale par machine est généralement réalisée, de préférence près du palier agissant comme butée. Les directions horizontale et verticale peuvent parfois être remplacées par deux directions obliques à 90 degrés.

Caractéristiques des capteurs d'accélération

Le choix d'un accéléromètre dépend de plusieurs critères clés, tels que la plage de fréquences, la sensibilité et la plage de température. La sensibilité est directement liée à la fréquence : une sensibilité faible est requise pour mesurer les hautes fréquences, tandis qu'une sensibilité élevée est nécessaire pour les basses fréquences. La fréquence de résonance, qui définit la plage de fréquences d'un accéléromètre, est généralement déterminée par des modèles avec une erreur de sensibilité inférieure à 5%.

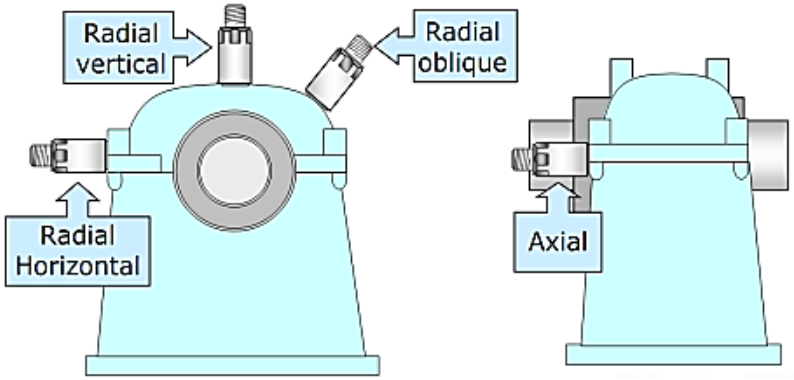


Figure 1. 18 Positionnement des capteurs d'accélération

1.9.2.4 Évaluation comparative des capteurs de vibrations [1]

La figure 1.20 illustre une comparaison détaillée des plages de fréquences couvertes par trois types de capteurs de vibrations : le proximètre, le vélocimètre et l'accéléromètre. Le tableau suivant résume les avantages et les inconvénients spécifiques à chacun de ces types de capteurs, permettant ainsi une meilleure compréhension de leurs applications respectives.

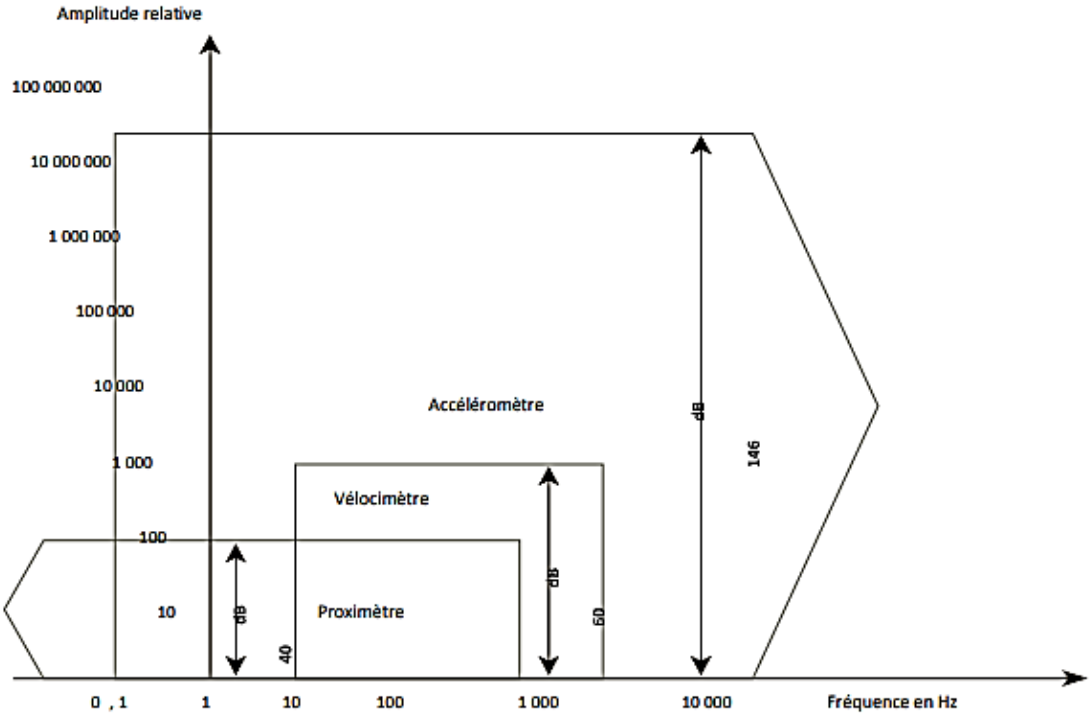


Figure 1. 19 Comparaison des plages de fréquences et gamme dynamique des trois types de capteurs

Tableau 1.1 : Avantages et inconvénients des capteurs de vibration

Capteur	Caractéristiques et avantages	Inconvénients
Capteur de déplacement	Produit une sortie proportionnelle au déplacement. Mesure relative : évalue la distance entre le coussinet et l'axe sur un palier lisse, permettant de déterminer si l'axe et le coussinet se touchent. Capteur adapté à la mesure des déplacements statiques et dynamiques.	-Construction potentiellement peu robuste, avec une bobine très fragile. -Nécessite une alimentation externe pour l'alimentation de la bobine en courant alternatif. -La sortie du capteur est susceptible d'être influencée par divers facteurs tels que des rayures ou des irrégularités sur la surface cible, le magnétisme, etc. -La gamme de fréquence est limitée (maximum jusqu'à 10 kHz). -La sensibilité dépend du matériau cible utilisé, nécessitant une calibration.
Capteur de vitesse	-La sortie est proportionnelle à la vitesse des vibrations. -Aucune alimentation externe n'est requise pour alimenter la bobine, car l'aimant génère une tension suffisante. -Les capteurs de vitesse sont conçus de manière robuste, résistant même aux chutes sans altérer leur sensibilité.	-Le capteur est volumineux, lourd et peut être fragile. -Il présente une plage de fréquence limitée, étant inutilisable en dessous de 10 Hz et au-dessus de 1000 Hz. -La sortie peut être influencée par des champs magnétiques. -La sensibilité du capteur est affectée par la direction de la mesure (position horizontale ou verticale). -Le coût d'acquisition est élevé.
Capteur d'accélération	-Génère une sortie proportionnelle à l'accélération des vibrations. -Léger et compact. -Économique. -Possède une plage de fréquence très étendue (1 Hz - 100 KHz).	Les mesures statistiques ne sont pas réalisables

1.10. Conclusion

Ce chapitre a fourni une vue d'ensemble des concepts clés liés à la maintenance, en mettant un accent particulier sur la stratégie de maintenance conditionnelle par l'analyse des vibrations. Les informations présentées ont permis de mieux comprendre l'importance de cette technique dans la surveillance des machines tournantes. L'analyse vibratoire des machines tournantes est un outil essentiel pour la maintenance prédictive des équipements industriels. Ce chapitre a exposé l'impact significatif de cette méthode sur la prévention des pannes coûteuses, l'optimisation de la maintenance et la garantie de la fiabilité des machines tournantes. Il est essentiel que les professionnels de l'industrie adoptent ces meilleures pratiques pour tirer pleinement parti des avantages offerts par l'analyse vibratoire dans la gestion proactive de leurs équipements.

Chapitre 2 : Vue d'ensemble sur la centrale électrique de BERROUAGHIA

2.1 Introduction

La centrale électrique de BERROUAGHIA (SKB SPA Shariket Kahraba Berrouaghia) est une installation de production d'électricité utilisant une turbine à gaz. Pour assurer la pérennité de la production, le département de maintenance surveille l'état de la turbine en temps réel et en dehors des périodes d'exploitation. Ce chapitre abordera les caractéristiques et le fonctionnement du système de production, permettant ainsi de mieux appréhender la stratégie de surveillance mise en œuvre au sein de la centrale.

2.2. Présentation de la société SONELGAZ

La société SONELGAZ, établie en tant que monopole de gestion de l'énergie électrique dans notre pays, a émergé de l'ancienne Société Publique de l'Electricité et du Gaz d'Algérie en 1968. Actuellement, SONELGAZ s'occupe de la production, du transport, de la distribution, de l'ingénierie et de la réalisation de certains projets d'électricité et de gaz à l'échelle nationale. Son objectif est de répondre de manière régulière, sûre et permanente aux besoins variés de sa vaste clientèle.

2.3. Description de la centrale de Berroughia

2.3.1. Situation géographique

La Société d'électricité de Berroughia est située dans la zone de Tal, au nord-ouest de la wilaya de Médéa, à environ 90 km au sud-ouest d'Alger et 18 km au sud-est de Médéa, précisément dans la zone industrielle de la ville de Berroughia, sur la route n°18.



Figure 2. 1 *Situation de S.K.E*

2.3.2. Superficie

La centrale électrique est installée sur un site choisi pour sa proximité avec des sources de combustible et des infrastructures de transport, facilitant ainsi l'approvisionnement en gaz naturel et la distribution de l'électricité produite.

2.3.3. Principales caractéristiques de la centrale

Tableau 2. 1 Caractéristiques de la centrale

Emplacement du site	Berrouaghia Wilaya de Médéa
Classification de la centrale	Cycle ouvert-turbine à gaz
Quantité de groupes	02
Puissance totale installée	500 MW aux conditions du site
Principal combustible utilisé	Gaz naturel
Combustible de secours	Gasoil
Fabricant	Siemens (Germany)

2.3.4. Évacuation de l'énergie électrique

La centrale a pour objectif de répondre à la demande en énergie de la région, notamment pour les aménagements industriels et domestiques. Le poste d'évacuation de l'énergie électrique, de type extérieur, comprend quatre travées entièrement équipées, connectées à deux jeux de barres 220KV.

2.3.5. Principales caractéristiques techniques de la centrale

La centrale de Berroughia, avec une puissance de 500 MW (250 MW par groupe), est équipée de deux turbines à gaz de type SGT5_40000F. Ces turbines sont installées dans une salle des machines ventilée et insonorisée. La turbine mono arbre à cycle simple tourne à 3000 tr/min, fonctionnant au gaz naturel comme combustible principal et au gasoil comme combustible de secours, avec la possibilité de passage automatique d'un combustible à l'autre. La centrale respecte les normes de préservation de l'environnement.



Figure 2. 2 Photo de la centrale

2.4 Aperçu de l'installation de la centrale thermoélectrique à turbine à gaz

L'installation de Centrale thermoélectrique à turbine à gaz comprend principalement les éléments suivants : Une turbine à gaz, un générateur électrique, et un transformateur.

2.4.1 Turbine à gaz

La turbine à gaz est composée des éléments suivants :

-Un compresseur à 15 étages : Ce compresseur est chargé de produire de l'air sous haute pression en quantité suffisante pour la combustion du gaz combustible.

-Deux chambres de combustion à cornes : Ces chambres sont le lieu où se déroule la combustion du mélange air-combustible. Elles permettent ainsi la conversion de

l'énergie chimique en énergie calorifique. Chaque chambre est équipée de 3x8 brûleurs et est de type à cornes.

-Une turbine à 4 étages : Cette turbine est responsable de la conversion de l'énergie thermique des gaz de combustion en énergie mécanique.

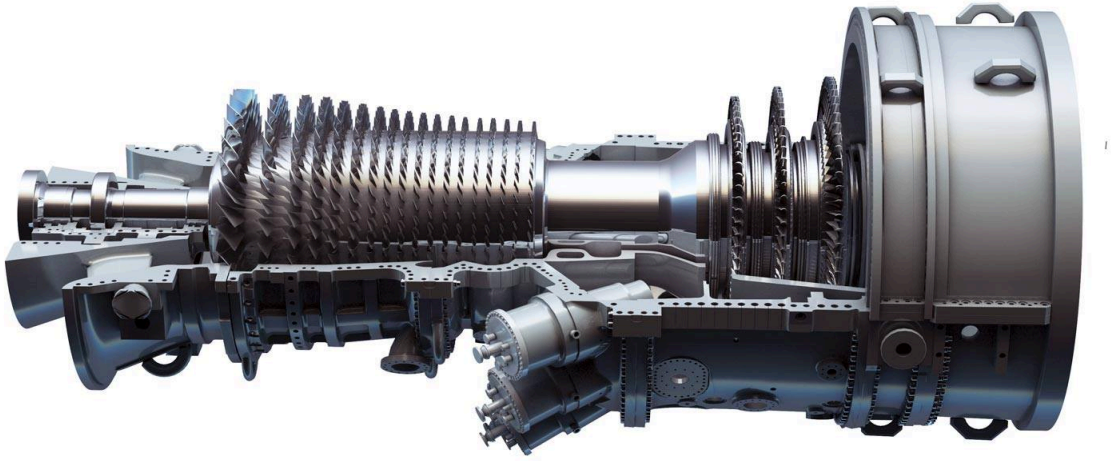


Figure 2. 3 Schéma d'une turbine

2.4.2 Générateur électrique

Deux générateurs Siemens WESTINGHOUSE USA SGen5-1000A (16.5kV / 308MVA) sont couplés à la turbine. Alimentés par un système de régulation statique de tension, ils transforment l'énergie mécanique en énergie électrique.

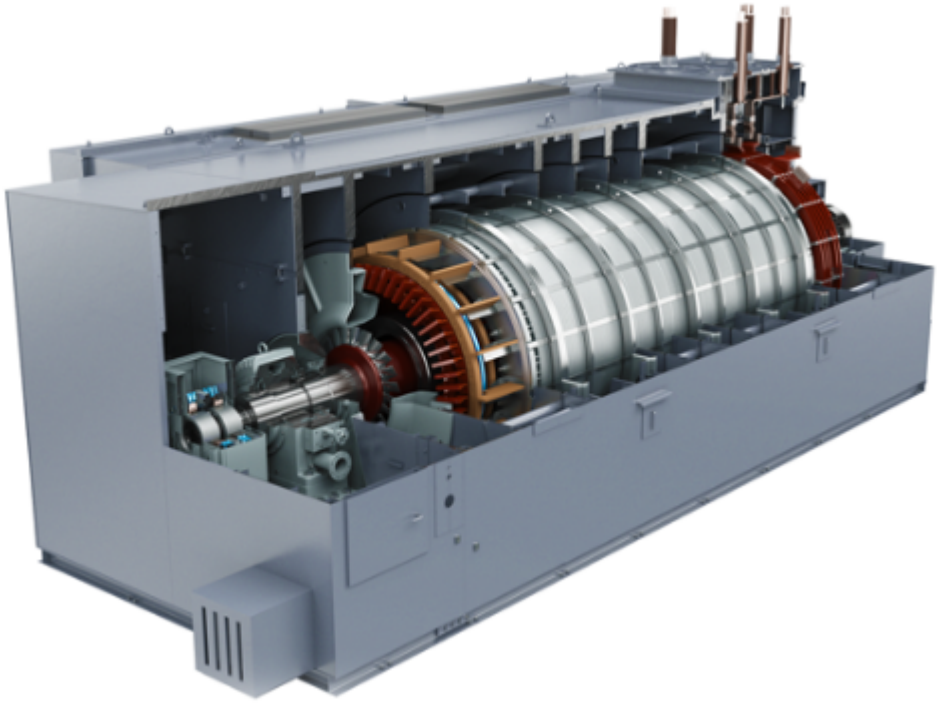


Figure 2. 4 Générateur électrique

2.4.3 Transformateur électrique

Ces transformateurs ont une capacité de conversion de 16,5 kW à 220 kV. Ils facilitent le transfert d'électricité dans le système de transport d'énergie électrique.



Figure 2. 5 Transformateurs

2.5 Principe de fonctionnement du processus de production d'énergie électrique à partir d'une turbine à gaz

Le processus de production d'énergie électrique par turbine à gaz commence dans la chambre de combustion. Plusieurs brûleurs facilitent la réaction chimique entre le gaz naturel (combustible) et l'oxygène de l'air (comburant), générant une énergie calorifique provenant de la combustion.

Les gaz de combustion chauds sont ensuite dirigés vers les aubes de la turbine, où ils subissent une détente. Cette détente transforme l'énergie calorifique en énergie mécanique, entraînant la rotation de l'arbre de la turbine. Cette énergie mécanique, notée "Em", est collectée sur l'arbre de l'alternateur couplé à la turbine.

L'alternateur est excité par une source électrique en courant continu à travers son inducteur (rotor). Cette excitation génère un champ magnétique qui, lorsqu'il est combiné avec la rotation de l'arbre, induit un courant électrique dans les bobines de

l'alternateur. Ce courant est ensuite converti en énergie électrique, qui peut être transmise au réseau électrique.

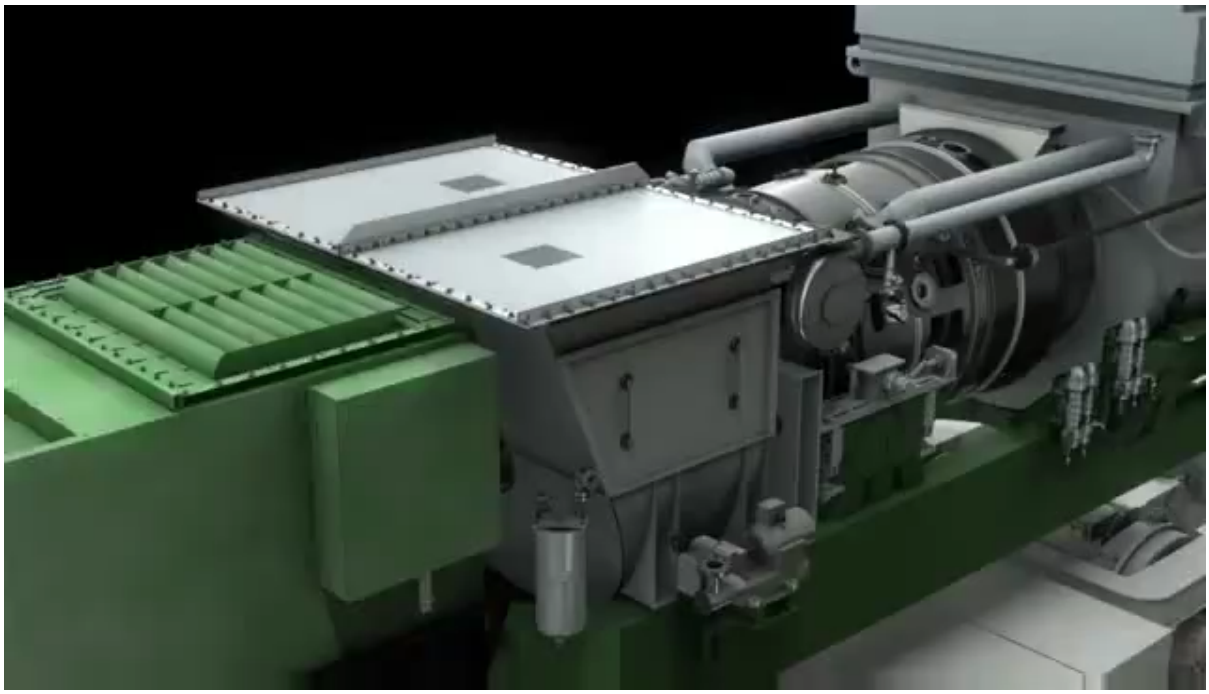
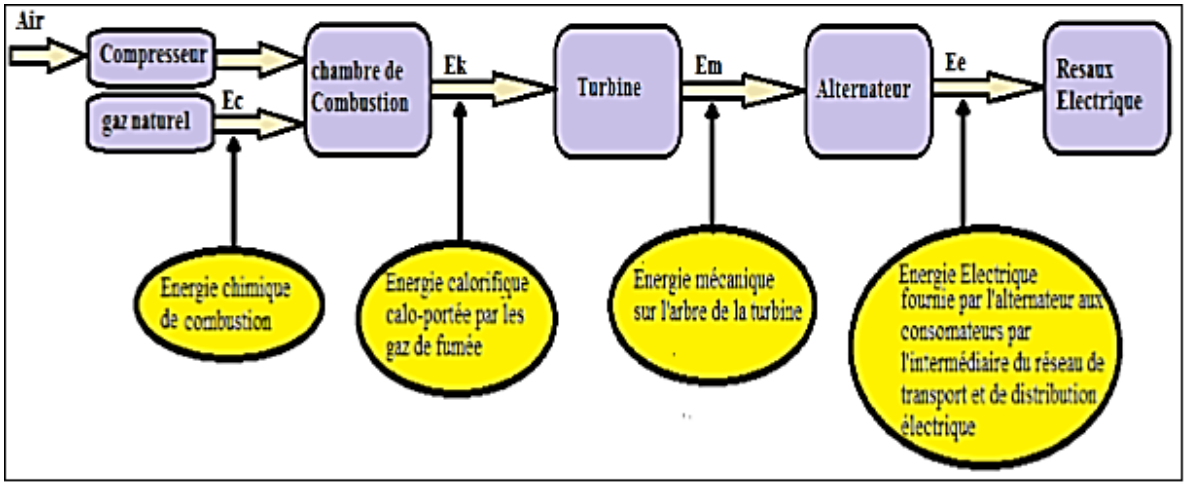


Figure 2. 6 L'installation de Centrale thermoélectrique à turbine à gaz



Energie chemique ⇨ Energie callorifique ⇨ Energie mecanique ⇨ Energie electrique

EC ↓	EK ↓	Em ↓	Ee ↓
Gaz naturel	Combustion	Turbine	Alternateur

Figure 2. 7 Transformation énergétique

Ec : Energie chimique du combustible.

Ek : Energie calorifique de gaz de fumée sortie chambre de combustion (chaleur dégagée par la combustion).

Em : Energie mécanique sur l'arbre turbine.

Ee : Energie électrique fournie par l'alternateur a ses bornes au réseau.

2.6 Fonctionnement thermodynamique de la turbine à gaz

La turbine subit une détente où l'énergie thermique transportée par les gaz de combustion est convertie en énergie mécanique de rotation, suivant le cycle de Brayton. En général, une turbine à gaz peut être considérée comme un dispositif de conversion d'énergie. Le cycle de Brayton représente le modèle de fonctionnement énergétique d'une turbine à gaz. Sur les diagrammes P-V (pression-volume) et T-S (température-entropie) illustrés ci-dessous (Figure), les quatre étapes du cycle sont les suivantes :

Étape (1-2) : Compression isentropique dans le compresseur, augmentant la pression de l'air de l'état 1 à l'état 2.

Étape (2-3) : Apport de chaleur à pression constante résultant de la réaction chimique de combustion dans la chambre de combustion.

Étape (3-4) : Détente isentropique dans la turbine.

Étape (4-1): Rejet de chaleur à pression constante dans l'atmosphère via le canal d'échappement.

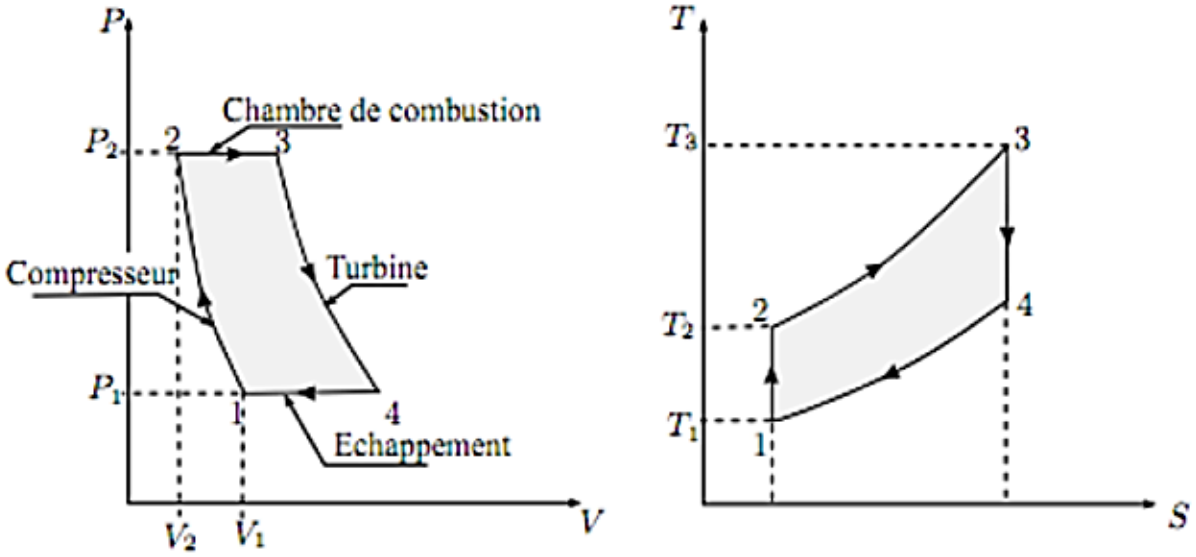


Figure 2. 8 Cycle idéal d'une turbine à gaz

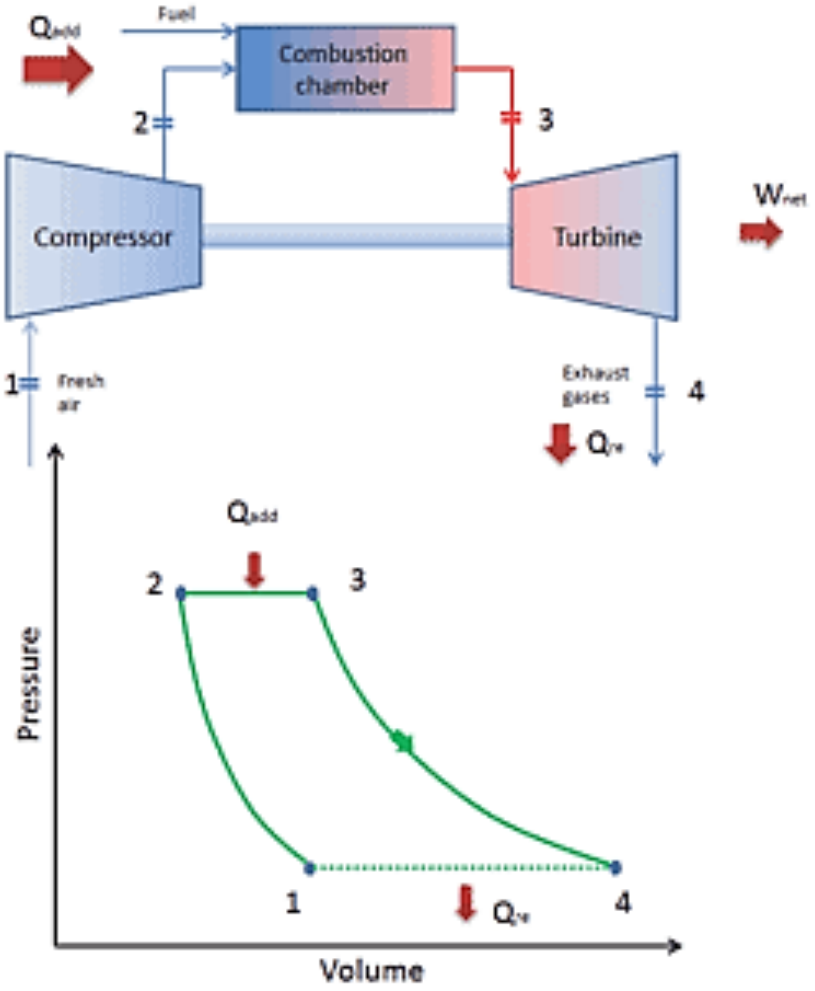


Figure 2. 9 Cycle d'une turbine à gaz

2.7 Caractéristiques de fonctionnement de la turbine à gaz

Le figure 2. 10 illustre le schéma descriptif d'un groupe de turbine à gaz qui inclut les parties suivantes :

1. Générateur.
2. Réservoir d'huile avec montage.
3. Structure d'admission d'air
4. Compresseur.
5. Chambre de combustion.
6. Turbine.
7. Diffuseur d'échappement.
8. Echappement des fumées vers la cheminée.

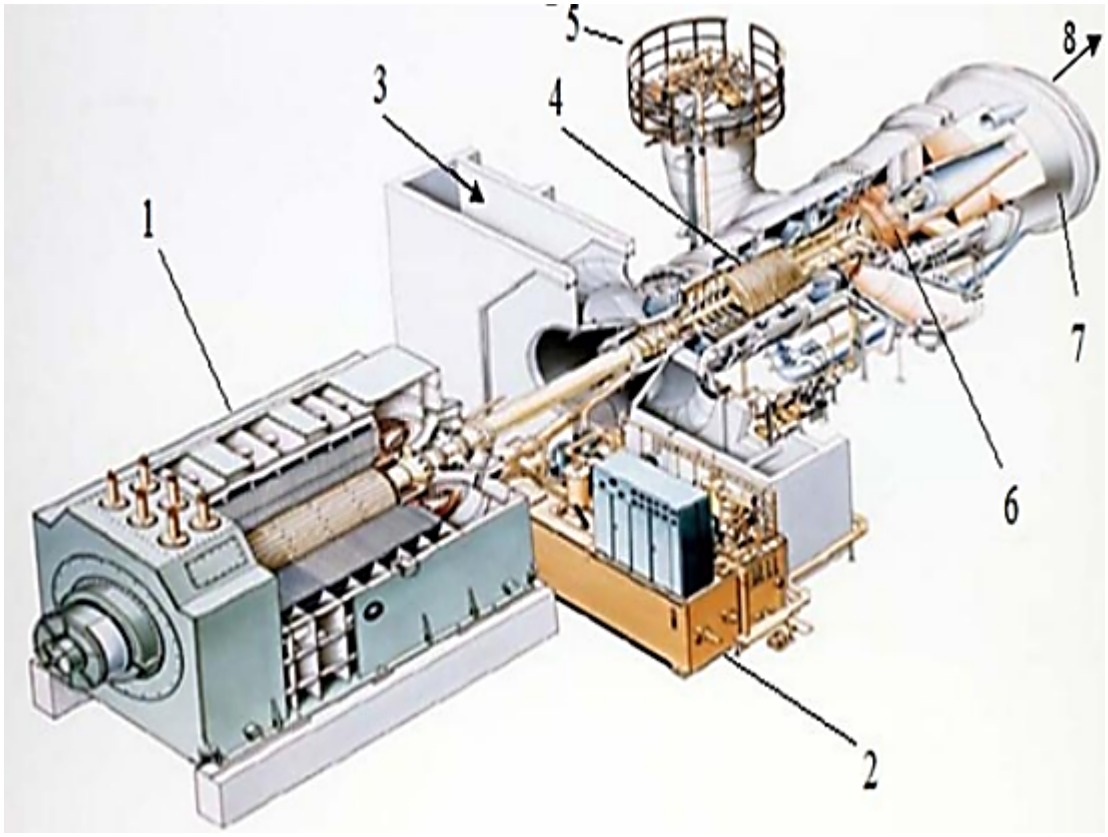


Figure 2. 10 Schéma descriptif d'un groupe de turbine à gaz

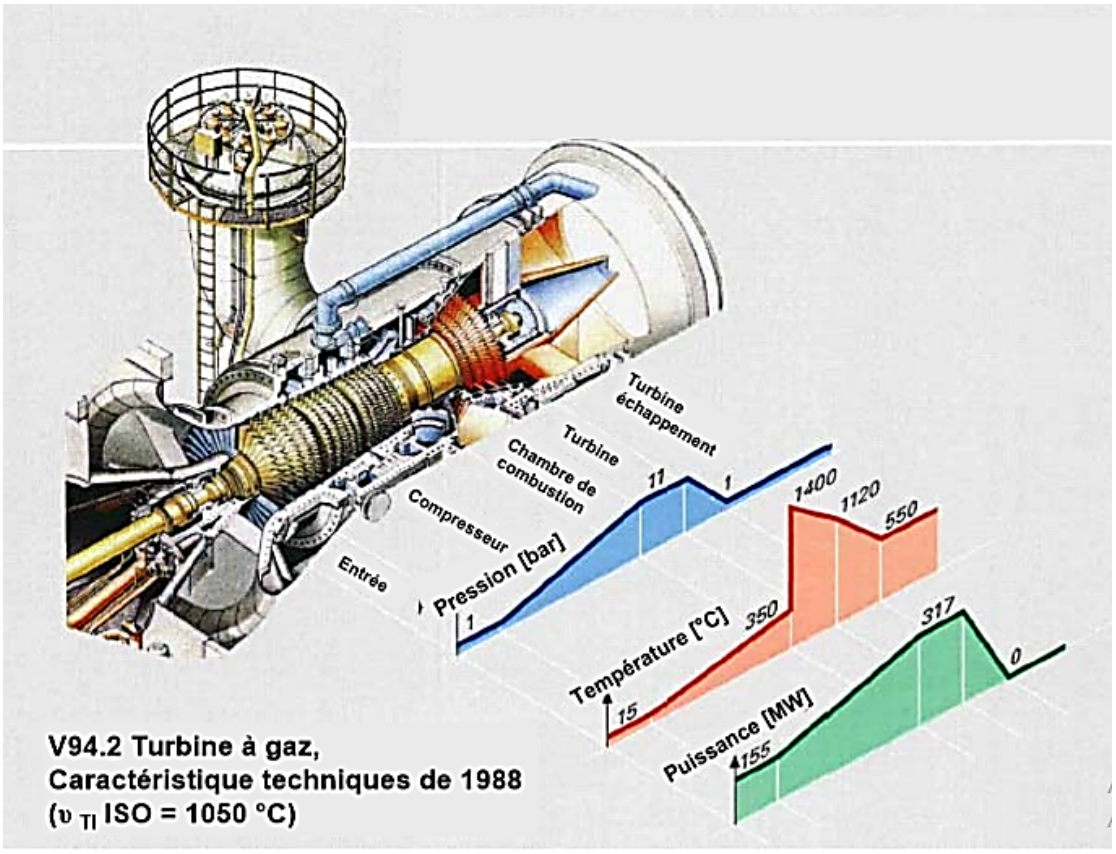


Figure 2. 11 Caractéristiques techniques de la turbine à gaz

2.8 L’installation de la centrale électrique de Berrouaghia.

L’installations de BERROUAGHIA se composent principalement des équipements suivants :

- Station de gaz ;
- Station de fuel ;
- Zone compresseur équipée d'un système de filtrage de l'air ;
- Chambre de combustion ;
- Zone turbine ;
- Système de lubrification à l'huile ;
- Générateur.

2.8.1 Station de gaz

La station de gaz naturel a pour but de traiter le gaz naturel provenant de la ville de Hassi R'Mel, qui arrive à une pression de 60 bars et une température d'environ 8 degrés Celsius. Le traitement permet de réduire la pression à 30 bars et d'augmenter la température à 30 degrés Celsius. La station est équipée des éléments suivants :

- Deux vannes d'entrée commandées pneumatiquement avec un bypass.
- Deux ensembles de filtration, chacun comprenant deux filtres.
- Un ensemble pour le réservoir de récupération du condensat.
- Deux dispositifs de mesure du débit de gaz.
- Quatre chauffages de gaz de type "bain-marie" utilisés pour augmenter la température du gaz à plus de 30°C avant sa détente.
- Quatre lignes de détente de gaz, dont deux sont destinées aux groupes 1 et 2, et les deux autres aux groupes 3 et 4, permettant de réduire la pression à 28-30 bars.

2.8.2 Système de ravitaillement en carburant

Le système en question a pour mission de recevoir du gasoil provenant de la station de dépotage et de le transférer vers les réservoirs principaux, les turbines à gaz, les groupes électrogènes ainsi que la motopompe diesel anti-incendie.

Aperçu fonctionnel succinct du système de pompage et de transfert de carburant combustible :

1.Réception du gasoil de la station de dépotage.

2.Transfert du gasoil vers :

-Les réservoirs principaux.

-Les turbines à gaz.

-Les groupes électrogènes.

-La motopompe diesel anti-incendie.

2.8.3 Section compresseur avec système de filtrage d'air

Dans la section compresseur, l'air extérieur froid est compressé et chauffé pour produire de l'énergie mécanique à l'aide des pales du stator et du rotor. Ces pales sont soumises à des forces générées par le débit d'air et peuvent endurer des contraintes importantes. Le compresseur, composé de plusieurs étages, accélère alternativement l'air, augmentant sa pression et sa température tout en diminuant son volume spécifique. Des mécanismes d'étanchéité empêchent le retour d'air vers des zones de pression inférieure. Lors du démarrage de la turbine à gaz, le compresseur traverse des phases d'instabilité, justifiant la présence de vannes anti-pompage pour réduire les vibrations.

Les pales statoriques ajustables (IGV) à l'entrée du compresseur régulent le flux d'air nécessaire à la combustion. Des vannes anti-pompage sont installées aux 5ème et 10ème étage pour protéger les pales contre des charges excessives. Le compresseur est également équipé de systèmes de filtration d'air pour empêcher les impuretés de l'atmosphère de colmater les pales, ce qui pourrait réduire son efficacité. Des techniques de nettoyage des turbines à gaz sans démontage sont en cours de développement. Le compresseur et la turbine fonctionnent ensemble comme une unité unique, le compresseur opérant en 15 étapes, chacune constituée d'une série de pales rotor et stator.

Le système de filtration d'air est conçu pour retenir les impuretés de l'air ambiant, protégeant ainsi les pales du compresseur et de la turbine contre l'accumulation de saleté et l'érosion.

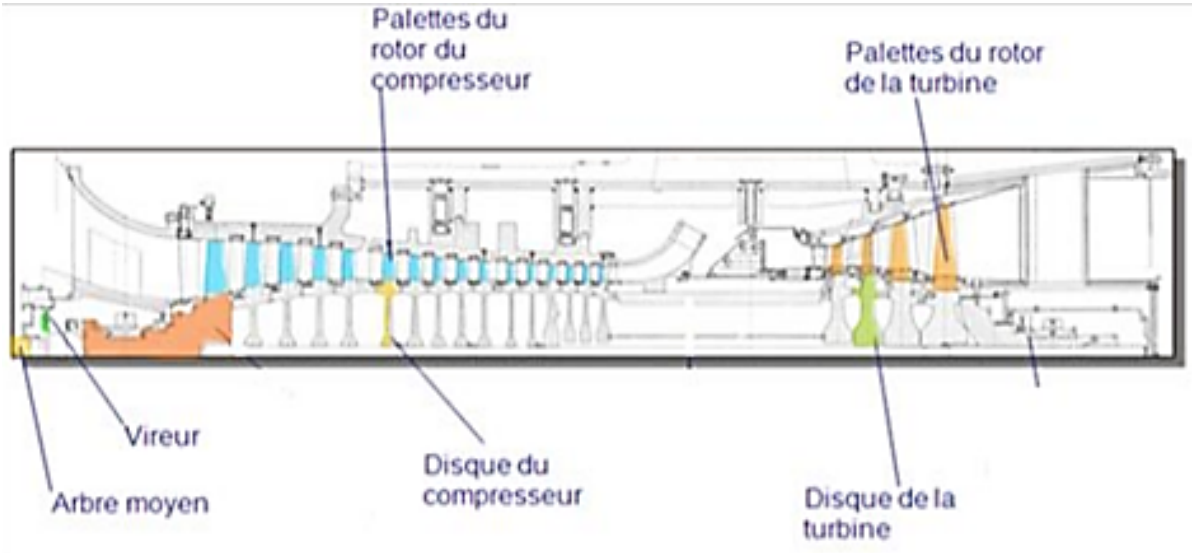


Figure 2. 12 Rotor

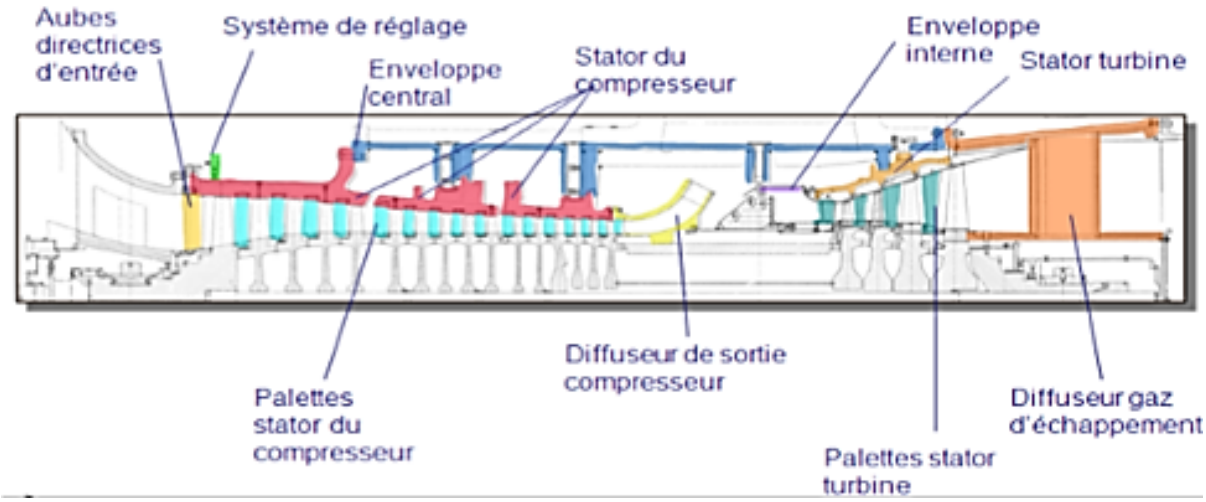


Figure 2. 13 Stator

2.8.4 Chambre de combustion

Description et principe de fonctionnement

La turbine à gaz V94.2 est munie de deux chambres de combustion positionnées verticalement de part et d'autre et reliées aux flancs de l'enceinte externe de la turbine. Cette disposition permet un accès aisé à toutes les pièces pour les vérifications, ainsi qu'au montage et au démontage si besoin. Le flux principal généré par le compresseur est acheminé vers les chambres de combustion où il se présente sous forme d'air primaire, participant ainsi au processus de combustion. À l'intérieur des chambres de combustion, la réaction chimique entre l'air et le carburant provoque une augmentation significative de la température à pression constante. Cette partie de la turbine

transforme la valeur énergétique du carburant en énergie thermique pour les gaz.

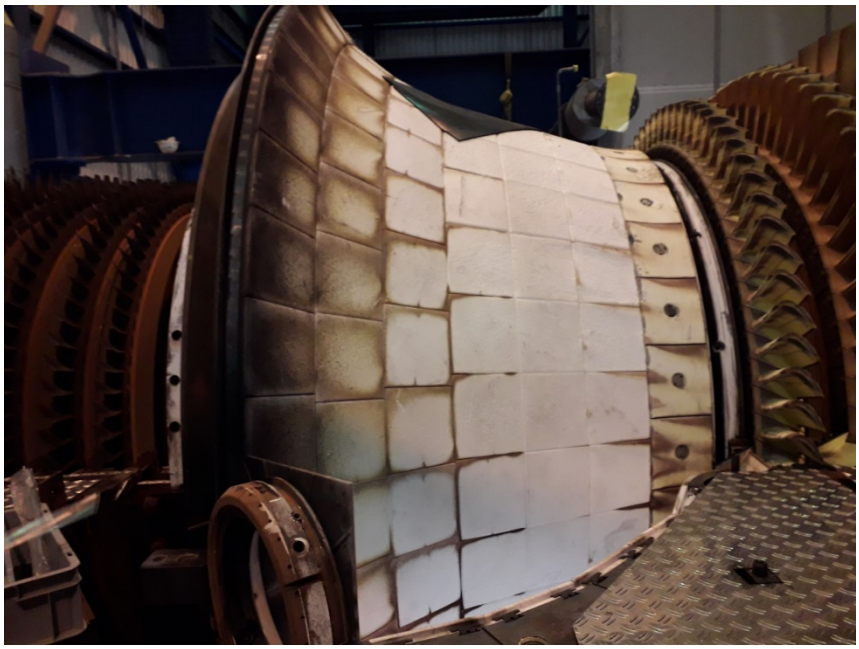


Figure 2. 14 Chambre de combustion

Chaque chambre de combustion abrite huit brûleurs, capables de fonctionner avec du gaz naturel en mode diffusion et pré-mix (pour un fonctionnement à faibles émissions de NOx) ainsi qu'avec du fioul léger en mode diffusion (avec ajout d'eau, si nécessaire). Les brûleurs au gaz naturel garantissent un mélange efficace avec l'air, assurant une combustion complète dans la chambre. Tous les brûleurs sont identiques, assurant une distribution uniforme du gaz naturel. Cependant, l'utilisation de brûleurs à diffusion dans des turbines conçues pour des températures élevées à l'entrée peut compromettre le respect des normes d'émission d'oxyde d'azote imposées par la loi. Afin de maintenir l'utilisation continue de ces brûleurs, il est nécessaire de réduire la température de la flamme, principale responsable de la formation d'oxydes d'azote.

Le brûleur à diffusion peut fonctionner à un faible rapport moyen (combustible/air), engendrant localement des zones stœchiométriques dans la flamme, favorisant la formation d'oxyde d'azote. Cette formation peut être évitée en mélangeant de manière homogène le combustible et l'air avant d'entrer dans la zone de réaction, caractérisant ainsi le brûleur de mélange. Les turbines à gaz nécessitent une conception spécifique du contrôle pour exploiter la plage étroite du rapport d'air du brûleur de mélange, distincte du système utilisé pour les brûleurs à diffusion.

Le brûleur hybride a été conçu pour maintenir tous les brûleurs en service continu, avec des émissions de NOx et de CO extrêmement basses et une puissance de sortie

élevée. Il se distingue des brûleurs à diffusion pure par l'intégration d'un système d'alimentation en fioul supplémentaire, permettant de mélanger le fioul avec l'air de combustion en aval du tourbillon diagonal. Cette méthode homogénéise le mélange en route vers la zone de combustion. Jusqu'à présent, cette approche de mélange homogène n'avait été mise en œuvre que pour le fioul.

Description fonctionnelle sommaire de la chambre de combustion :

1. Flamme de pré-mélange caractérisée par un rapport de dilution élevé, une basse température de la flamme et une faible production de NOx.
2. Flamme de diffusion caractérisée par un faible rapport de dilution, une haute température de la flamme et une production élevée de NOx.



Figure 2. 15 Bruleur

Processus de combustion

La combustion englobe l'ensemble des réactions chimiques se produisant dans des conditions spécifiques de concentration, de pression et de température, libérant de la chaleur lors du contact entre un combustible et un comburant. Les éléments actifs du combustible (carbone, hydrogène, soufre) se combinent avec ceux du comburant (oxygène), générant des réactions chimiques exothermiques.

Les éléments actifs du combustible sont le carbone, l'hydrogène et le soufre, le soufre étant considéré comme une impureté en raison de son impact négatif sur les installations. Les éléments inertes du combustible, non impliqués dans la combustion, se retrouvent dans les résidus, tels que l'eau, l'azote et les cendres. Dans l'industrie, l'air atmosphérique sert de comburant, composé de 21% d'oxygène (élément actif) et 79%

d'azote (gaz inerte). Le réglage de la quantité d'air comburant vise à assurer une combustion complète avec un excès d'air adapté au type de combustible et à la conception du brûleur, défini par le rapport d'air réel sur la quantité théorique.

2.8.5 Système de lubrification du turbo-alternateur

Le système d'huile de graissage du turbo-alternateur joue un rôle crucial dans la lubrification des coussinets, des paliers et des mécanismes associés pour minimiser la friction. Il assure également le refroidissement des paliers et des composants à lubrifier, tout en maintenant une température admissible entre 70°C et 80°C. Le circuit d'huile comprend une cuve située à proximité de la turbine, équipée de composants tels qu'une motopompe principale à courant alternatif, une motopompe auxiliaire à courant alternatif, une motopompe de secours à courant continu, deux ventilateurs d'aspiration de buées, un indicateur de niveau, et un système de refroidissement de l'huile régulé en température.

En fonctionnement normal, l'huile est aspirée par la pompe principale, parcourt un réfrigérant d'huile et alimente les paliers du turbo-alternateur. Au démarrage, la pompe principale et la pompe auxiliaire à courant alternatif entrent en service jusqu'à ce que la pression atteigne 2.6 bars à une vitesse de 120 tr/min, moment où la pompe auxiliaire se déconnecte automatiquement. En cas d'incident avec une baisse de pression jusqu'au seuil s1, la pompe auxiliaire est activée, et si la pression continue à chuter jusqu'au seuil s2, la pompe à courant continu prend le relais.

Pour le vireur et le soulèvement de la turbine, une pompe de soulèvement supprime le frottement arbre-coussinet lors du démarrage du vireur. Ce dispositif, alimenté individuellement par la cuve à huile, injecte l'huile à haute pression (70 à 200 bars) pour créer un coin d'huile artificiel. Le vireur, quant à lui, maintient l'arbre de la turbine à faible vitesse pendant les périodes de refroidissement ou de réchauffage, évitant ainsi la déformation de l'arbre.

Le fonctionnement lors de l'arrêt de la turbine et son démarrage sont minutieusement décrits, soulignant le rôle des différentes pompes et du vireur dans le processus de graissage et de mise en marche de la turbine.

2.8.6 Générateur

Le générateur adopte une configuration refroidie à l'air, à deux pôles avec un rotor lisse et est ventilé en circuit fermé, équipé d'échangeurs air-eau intégrés dans la partie inférieure de la carcasse. Caractéristiques principales incluent :

- Turboalternateur triphasé à deux pôles avec rotor lisse.
- Rotor directement couplé à la turbine.
- Enroulement amortisseur du rotor.
- Ventilation en circuit fermé avec quatre échangeurs air-eau incorporés dans la carcasse.
- Auto-ventilation du stator et du rotor.
- Expédition du générateur entièrement assemblé.
- Excitation de type statique.
- Isolation d'enroulement stator de type Resin-Rich en barre individuelle.
- Conformité aux normes CEI.
- Système de mise à la masse de l'arbre et d'isolation des paliers pour prévenir la circulation des courants d'arbre.

Description

Le générateur synchrone à deux pôles est refroidi par l'air en circuit fermé, avec une carcasse constituée d'une structure soudée, divisée horizontalement en deux moitiés pour faciliter l'accès lors de l'entretien et des réparations. Le rotor tourne sur deux paliers radiaux à frottement situés à l'extérieur de la carcasse, simplifiant ainsi l'entretien. Le blocage axial est assuré par le palier buté d'embrayage de turbine. Le palier opposé à la turbine dispose d'une double isolation, et l'arbre est relié à la terre pour protéger les paliers et leurs systèmes de support contre les dommages causés par la circulation des courants d'arbre. Le système de lubrification est identique à celui de la turbine.

L'air chaud sortant du générateur est refroidi par des échangeurs air-eau installés dans la partie inférieure de la carcasse. La chaleur est transférée à l'eau du circuit de refroidissement, qui est elle-même refroidie dans un circuit extérieur par des ventilateurs noria.

Le rotor est équipé d'un enroulement amortisseur permettant le fonctionnement avec une charge déséquilibrée, conforme aux normes CEI. Les bornes du stator sortent en haut de la partie supérieure de la carcasse. La chambre des bagues est positionnée à l'extrémité opposée à la bride de couplage de la turbine. Le projet envisage la possibilité de remplacer les balais avec le générateur en service normal. L'enroulement stator est

de type triphasé, bipolaire, imbriqué à pas raccourci, avec des barres constituées de conducteurs élémentaires en cuivre isolés. Les barres formant les conducteurs sont transposées pour minimiser les pertes dues aux courants circulants. L'isolation principale contre la masse de l'enroulement est constituée d'un ruban Resin-Rich avec résine époxy-novo laque, composé d'un empilement de ruban de verre, papier de mica et ruban de polyester.

Circuit de refroidissement

Deux ventilateurs axiaux attelés à l'arbre assurent la circulation d'air dans le générateur pour son refroidissement. Cet air est refroidi dans les quatre échangeurs air-eau situés à l'intérieur de la carcasse. La chaleur est transférée à l'eau du circuit de refroidissement, elle-même refroidie dans un circuit extérieur par des ventilateurs noria.

2.8.7 Installations complémentaires

Il comprend également les installations suivantes :

- Une salle dédiée aux instruments
- Un entrepôt pour les pièces détachées lourdes
- Un entrepôt pour les pièces détachées des luminaires
- Un atelier de maintenance
- Une usine de production d'eau distillée
- Un laboratoire d'analyse chimique de l'eau
- Des bureaux administratifs
- Une salle de surveillance
- Des entrepôts pour l'eau, le diesel, etc.

2.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné les équipements essentiels d'une centrale électrique. Il est crucial de comprendre en détail le fonctionnement et les spécifications

techniques de ces équipements pour développer une stratégie de surveillance de leur état efficace. Dans le chapitre suivant, nous nous concentrerons spécifiquement sur la stratégie de surveillance de l'état d'un moteur électrique, qui actionne le démarrage de la turbine, en utilisant l'analyse des vibrations et une approche statistique.

Chapitre 3 : Surveillance d’une machine tournante à SPE

3.1 Introduction

La surveillance des machines tournantes est un domaine essentiel de l'ingénierie industrielle et de la gestion des actifs. Elle vise à détecter les signes précoces de défaillance des machines et à prévenir les temps d'arrêt coûteux. La combinaison de la surveillance des machines et des techniques de prévision permet de prédire l'état futur des machines et de prendre des mesures proactives pour minimiser les risques de défaillance.

Ce chapitre explore une technique de prévision de l'état d'une machine à l'aide d'une méthode de prévision par lissage exponentiel double (LED). L'accent est mis sur la sélection des paramètres du modèle LED pour une prévision précise des séries temporelles.

3.2 Description de la machine tournante à surveiller

Parmi les machines tournantes utilisées dans la centrale électrique SPE, les moteurs de type WEG 355c jouent un rôle crucial en transmettant l'énergie mécanique pour démarrer la turbine à gaz. Pour surveiller l'état de ces moteurs et anticiper d'éventuels problèmes, une approche de surveillance basée sur la mesure des vibrations est mise en œuvre.

Méthode de surveillance

La surveillance des moteurs de type WEG 355c repose sur la mesure des vibrations à deux points d'extrémité du moteur. Dans chaque point de mesure, les vibrations sont capturées dans trois directions distinctes : axiale, radiale horizontale et radiale verticale. Cette approche permet d'obtenir une analyse exhaustive du comportement vibratoire du moteur et de détecter précocement tout signe de dégradation ou de défaillance. En analysant les données vibratoires dans ces trois dimensions, il est possible d'identifier avec précision les sources de vibration anormale, telles que les déséquilibres, les désalignements ou les problèmes de roulements.

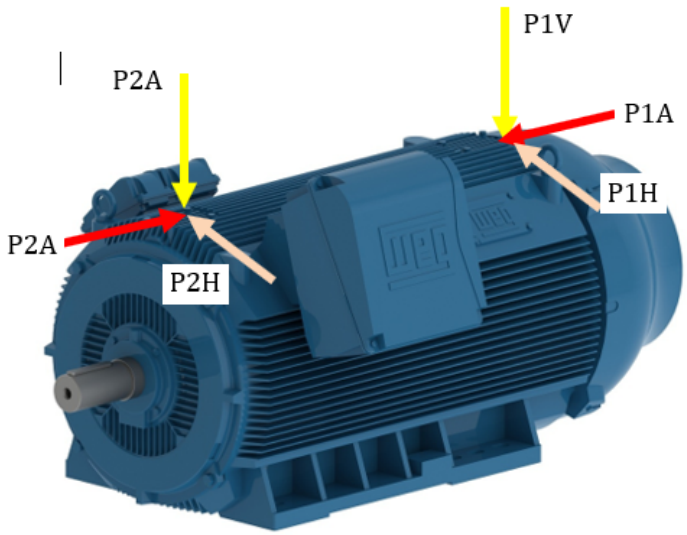


Figure 3. 1 Moteur 355C

P1A : Point 1 axial

P1H: Point 1 radial horizontal

P1V : Point 1 radial vertical

P2A : Point 2 axial

P2H : Point 2 radial horizontal

P2V : Point 2 radial vertical

Caractéristiques du moteur de type WEG 355c

La figure 3.2 présente la plaquette d'identification du moteur WEG 355c, indiquant une puissance de 250 kW. Selon la norme ISO 10816-1 (voir l'annexe), ce moteur est classé dans la classe II.

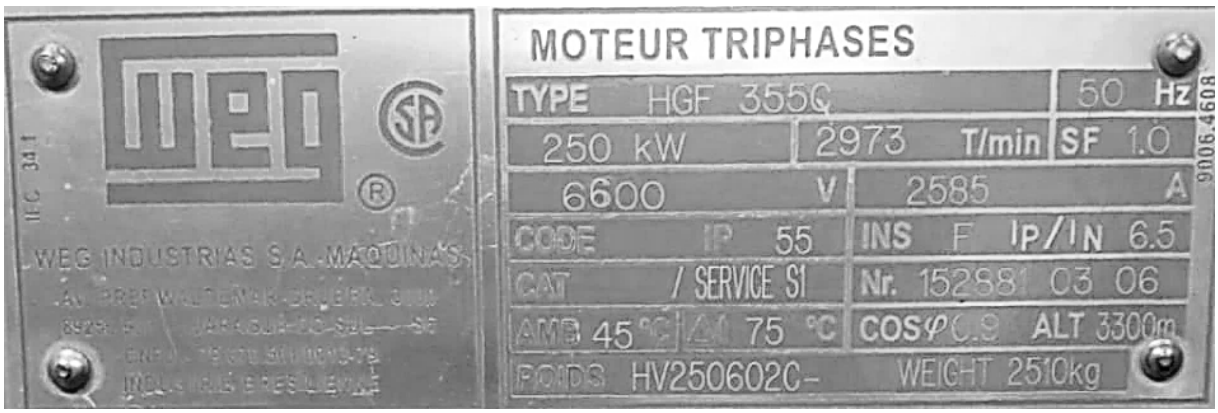


Figure 3. 2 Plaquette d'identification du moteur **WEG 355c**

La norme ISO 10816-1 annule et remplace la norme ISO 2372. La norme ISO 10816 -1, intitulée "Machines tournantes - Évaluation du niveau d'état de fonctionnement par la mesure des vibrations - Partie 1: Machines de puissance de 1 kW à 100 MW", est une norme internationale établie par l'Organisation internationale de normalisation (ISO). Elle fournit des directives pour l'évaluation du niveau d'état de fonctionnement des machines tournantes en mesurant leurs vibrations mécaniques. Cette norme s'applique aux machines de puissance allant de 1 kW à 100 MW, telles que le moteur WEG 355c.

3.3 Méthodologie de surveillance [6][7]

La méthodologie proposée s'articule autour de deux étapes clés : la collecte de données vibratoires et l'application de la méthode de tendance linéaire de Holt pour prédire l'état futur d'une machine tournante spécifique.

3.3.1 Collection des données

Afin d'étudier l'évolution de l'état des moteurs Type WEG 355c, une base de données est utilisée. Cette base de données rassemble les données de surveillance collectées sur une période de quatre ans, de 2008 à 2011. L'analyse de ces données permet d'identifier des tendances, de caractériser le comportement normal des moteurs et de détecter d'éventuelles anomalies.

3.3.2 Méthodes de tendance linéaire de Holt

La méthode de tendance linéaire de Holt, également connue sous le nom de lissage exponentiel double (LED), a été développée par Charles C. Holt en 1957. Cette méthode étend le lissage exponentiel simple (LES) pour permettre la prévision de séries chronologiques avec une tendance.

Méthode de Holt

La méthode de Holt est basée sur deux composantes principales :

Le paramètre de lissage pour le niveau (α, $0 \leq \alpha \leq 1$) : qui est utilisée pour estimer la valeur actuelle de la série.

Le paramètre de lissage pour la tendance (β, $0 \leq \beta \leq 1$) : qui est utilisée pour estimer la tendance de la série.

Ces deux composantes sont actualisées à chaque nouvelle observation de la série temporelle, permettant ainsi à la méthode de s'adapter aux changements dans les données.

La méthode de Holt utilise les trois équations suivantes :

Équation de prévision

$$\hat{y}_{t+\frac{h}{t}}(h) = l_t + h.T_t \quad (3.1)$$

$\hat{y}_{t+\frac{h}{t}}(h)$ est la prévision à la date pour l'horizon h, c'est-à-dire pour la date $t+h$.

Équation de niveau

$$l_t = \alpha.y_t + (1-\alpha)(l_{t-1} + T_{t-1}) \quad (3.2)$$

Équation de tendance

$$T_t = \beta.(l_t - l_{t-1}) + (1-\beta).T_{t-1} \quad (3.3)$$

Où

l_t est la valeur du niveau au temps t.

T_t est la valeur de la tendance (pente) au temps t.

Choix des paramètres α et β

Le choix optimal des paramètres α et β dépend des caractéristiques de la série chronologique analysée. En général, il est recommandé de tester différentes valeurs de α et β et de sélectionner celle qui minimise l'erreur quadratique moyenne (MSE) des prévisions. Ce processus d'ajustement de α et β pour minimiser le MSE peut être réalisé de manière itérative, en utilisant une approche par essais et erreurs. Il est important de souligner que les prévisions générées par le modèle concernent le futur et non le passé.

Métriques de performance

Les métriques de performance couramment utilisées pour évaluer la qualité des prévisions générées par des méthodes de lissage exponentiel telles que la méthode de tendance linéaire de Holt :

Erreurs de prévision

$$e_t = réelle - prédite \quad (3.4)$$

Erreur Moyenne (Mean Error)

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{t=T-n+1}^{t=T} e_t \qquad (3.\ SEQ\ (3.\ \backslash *\ ARABIC\ 5)$$

Erreur Quadratique Moyenne (MSE : Mean Square Error)

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{t=T-n+1}^{t=T} e_t^{\,2} \qquad (3.\ SEQ\ (3.\ \backslash *\ ARABIC\ 6)$$

Erreur Absolue Moyenne (MAE : Mean Absolute Error)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=T-n+1}^{t=T} |e_t| \qquad (3.\ SEQ\ (3.\ \backslash *\ ARABIC\ 7)$$

3.3.3 Algorithme de la méthode de tendance linéaire de Holt

Input *: Série temporelle {y_1, y_2, ..., y_N},*

Paramètres α et β, horizon de prévision h

Output*: Prévisions pour l'horizon h {y_{t+1}, y_{t+2}, ..., y_{t+h}}*

1. Initialiser *l_0 et T_0 (ex. l_0 = y_1 et T_0 = moyenne des premières différences)*

2. Pour t de 1 à N faire

Calculer *l_t = α * y_t + (1 - α) * (l_{t-1} + T_{t-1})*

Calculer *T_t = β * (l_t - l_{t-1}) + (1 - β) * T_{t-1}*

3. Pour chaque horizon h (1 à h) faire

Calculer *y_{N+h} = l_N + h * T_N*

4. Retourner les prévisions *{y_{N+1}, y_{N+2}, ..., y_{N+h}}*

3.3.4 Préparation des données

Pour effectuer des prédictions, nous réservons l'année 2011 comme ensemble de test. Les données des années 2008 à 2010 seront utilisées pour entraîner le modèle de prédiction et générer des prévisions pour l'année 2011. Ces prévisions seront ensuite

comparées aux données réelles de 2011 pour évaluer la performance du modèle.

3.3.5 Seuils d'intervention

Les industriels ont besoin d'une référence pour comparer les vibrations de la machine afin d'évaluer l'état de chaque machine, en utilisant les seuils d'intervention. Ces seuils peuvent être déterminés de deux manières principales : soit en se référant à la norme ISO 10816, qui établit des seuils généraux applicables à différentes catégories de machines (telles que les pompes, les ventilateurs, les compresseurs, etc.), soit par les industriels eux-mêmes, dans le cadre de leur expertise spécifique en analyse des vibrations.

Figure 3. 1 : Seuils d'intervention

	Norme10816-1 Moteur : Classe II mm/s	Service de maintenance de la centrale électrique
Seuil d'alarme	1.2	4
Seuil de danger	7.1	8

3.4 Résultats d'analyse

La méthode de tendance linéaire de Holt, également connue sous le nom de modèle à double paramètres, est une technique de prévision qui est particulièrement utile pour les séries temporelles présentant une tendance linéaire.

Dans notre cas, les paramètres α et β ont été choisis manuellement pour minimiser l'erreur quadratique moyenne (MSE), qui est une mesure de la précision de la prévision.

Plusieurs valeurs optimales ont été déterminées selon les cas suivant :

Cas 1 : Point de mesure : P1A (voir les figures 3.4-3.7)

Prévision de 60 jours (Figures 3.4-3.5)

Les paramètres α=0.5 et β=0.5 donnent un MSE significativement plus bas (0.0692) que α=0.2 et β=0.2 (0.2461). Cela indique que le modèle est plus précis avec des valeurs plus réactives (α et β élevés), suggérant que les tendances récentes ont une importance notable pour des prévisions à court terme.

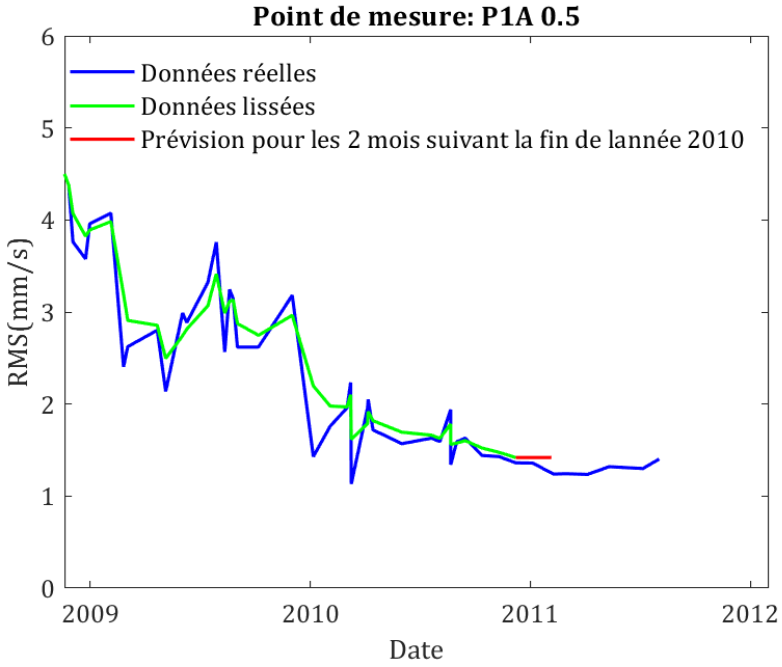


Figure 3. 4 Prévision par LED pour n= 60 jours, α=0.5 et β=0.5, MSE= 0.0692

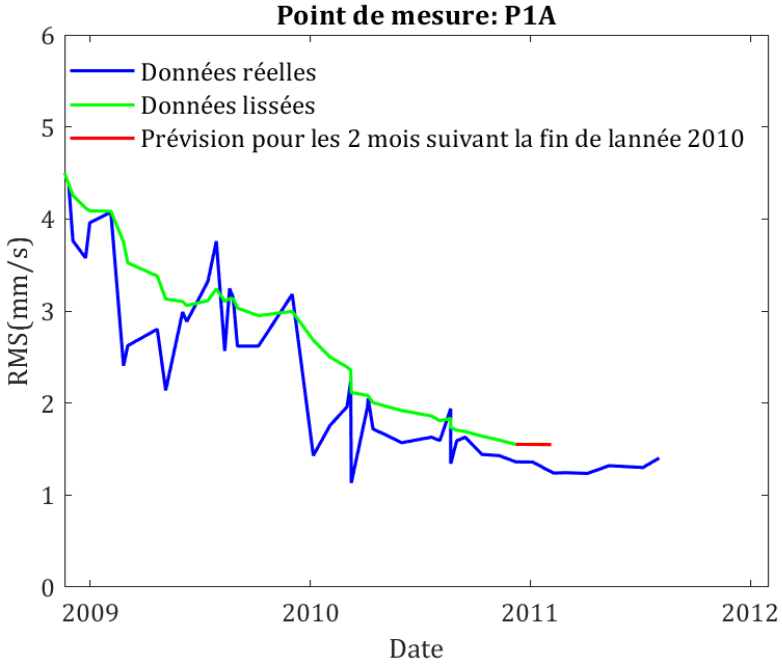


Figure 3. 5 Prévision par LED pour n= 60 jours, α=0.2 et β=0.2 ; MSE= 0.2461

Prévision de 180 jours (Figure 3.6)

Avec α=0.5 et β=0.5, le MSE reste constant à 0.0692, indiquant que ces paramètres sont également efficaces pour des prévisions à moyen terme. Cela montre que la réactivité aux nouvelles données continue d'être bénéfique pour une période de 180 jours.

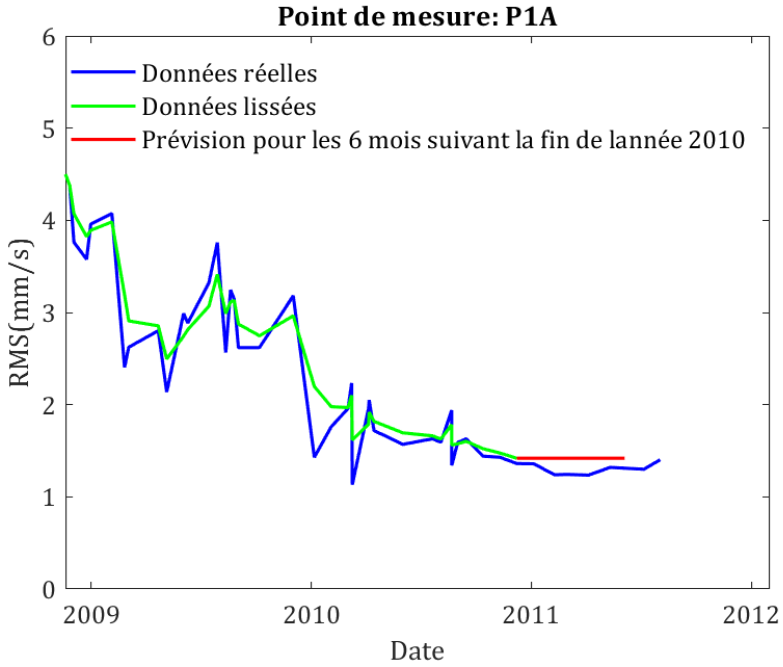


Figure 3. 6 Prévision par LED pour n= 180 jours, α=0.5 et β=0.5, MSE= 0.0692

Prévision de 8 mois (Figure 3.7)

Avec les mêmes paramètres (α=0.5 et β=0.5), le MSE diminue légèrement à 0.0587, suggérant que le modèle est encore plus précis pour une période plus longue. Cette baisse de MSE peut indiquer une stabilisation des tendances à plus long terme, permettant au modèle de mieux anticiper les variations futures.

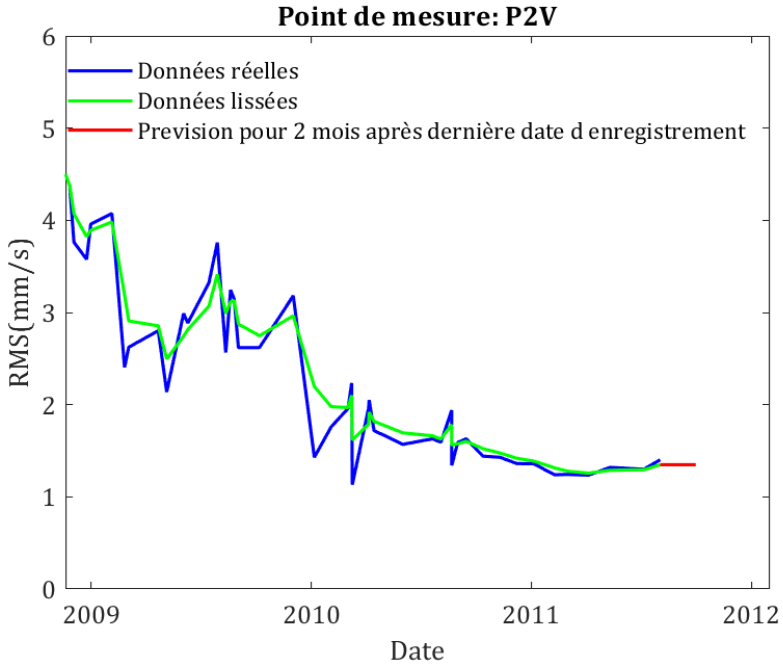


Figure 3. 7 Prévision par LED pour n= 60 jours, α=0.5 et β=0.5, MSE= 0.0587

En conclusion, l'utilisation de la méthode de tendance linéaire de Holt avec des paramètres α=0.5 et β=0.5 s'est révélée particulièrement efficace pour les prévisions de 60 jours et 180 jours. Ces paramètres, qui donnent plus de poids aux données récentes, ont permis de minimiser l'erreur MSE, ce qui témoigne de la précision des prévisions obtenues. La comparaison avec des paramètres moins réactifs (α=0.2 et β=0.2) pour une prévision de 60 jours montre que les choix plus réactifs sont préférables dans ce cas. En résumé, la méthode de Holt, avec des paramètres bien choisis, offre une approche robuste et fiable pour la prévision des séries chronologiques présentant une tendance linéaire.

Cas 2 : Point de mesure : P1H (voir la figure 3.8)

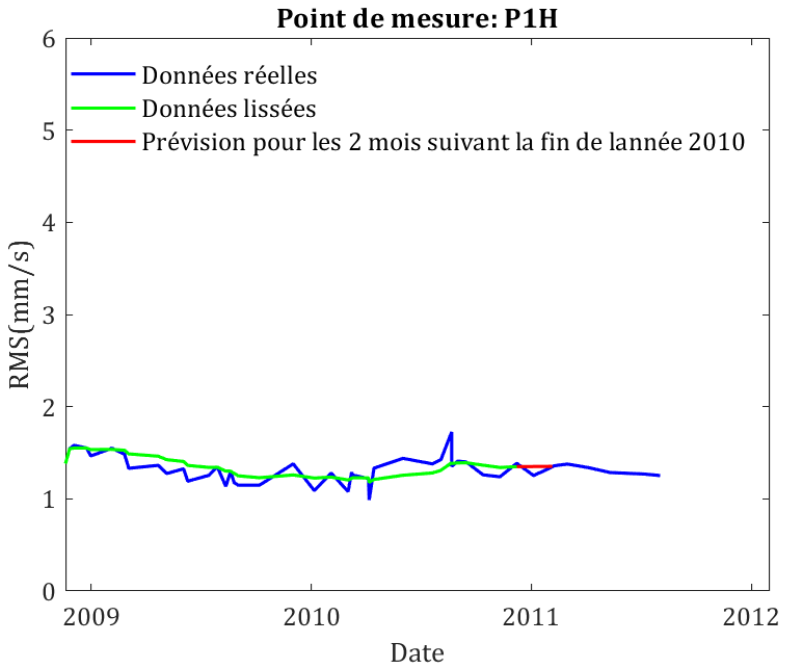


Figure 3. 8 Prévision par LED pour n= 60 jours, α=0.2 et β=0.2, MSE= 0.0121

Cas 3: Point de mesure : P1V (voir la figure 3.9)

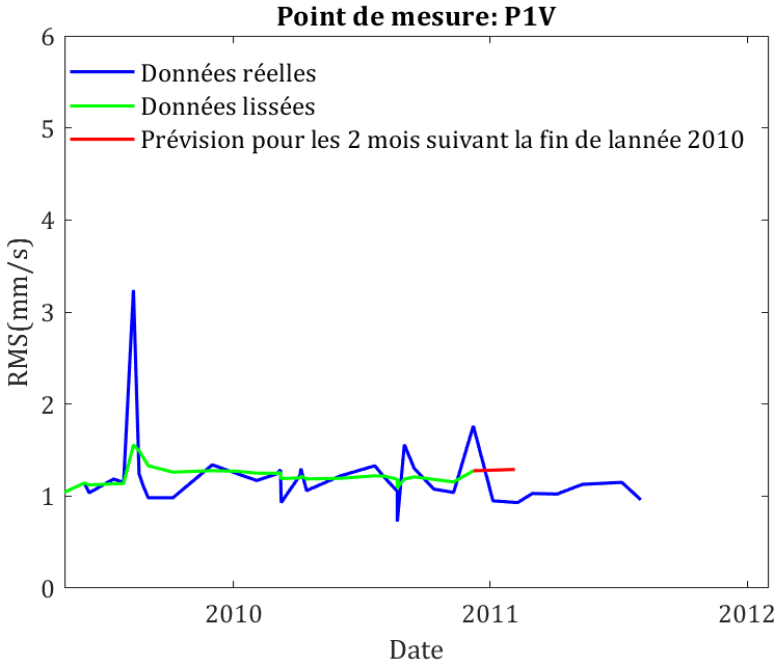


Figure 3. 9 Prévision par LED pour n= 60 jours, α=0.2 et β=0.2, MSE= 0.1337

Cas 4 : Point de mesure : P2A (voir la figure 3.10)

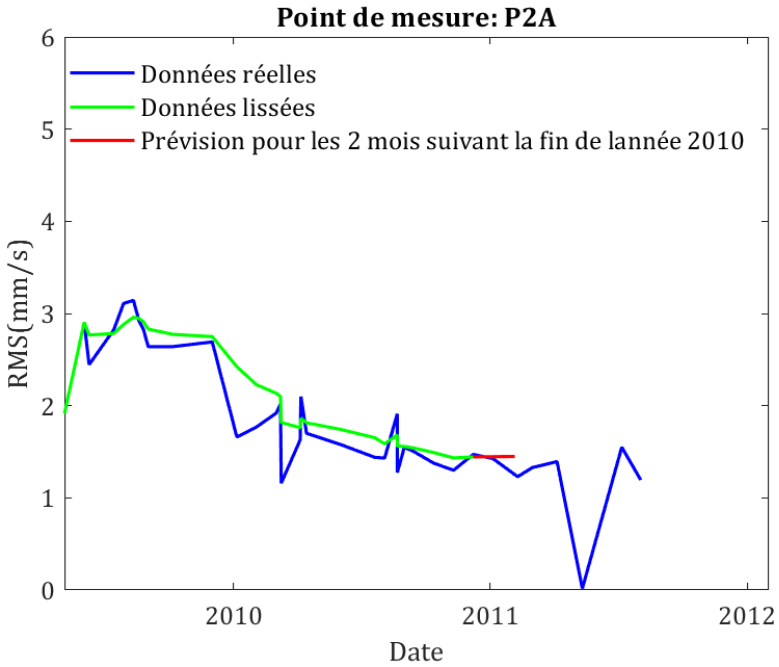


Figure 3. 10 Prévision par LED pour n= 60 jours, α=0.3 et β=0.3, MSE= 0.0649

Cas 5 : Point de mesure : P2H (voir la figure 3.11)

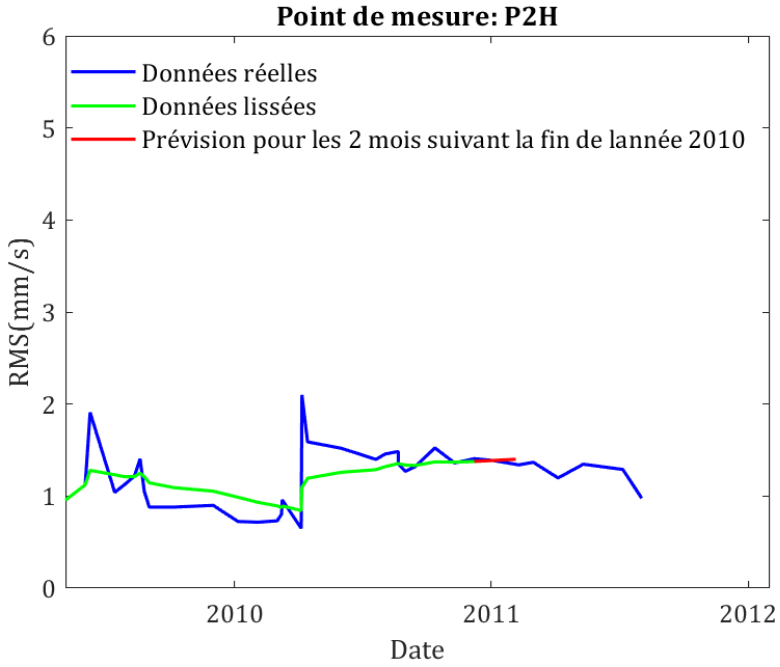


Figure 3. 11 Prévision par LED pour n= 60 jours, α=0.2 et β=0.2, MSE= 0.0734

Cas 6 : Point de mesure : P2V (voir la figure 3.12)

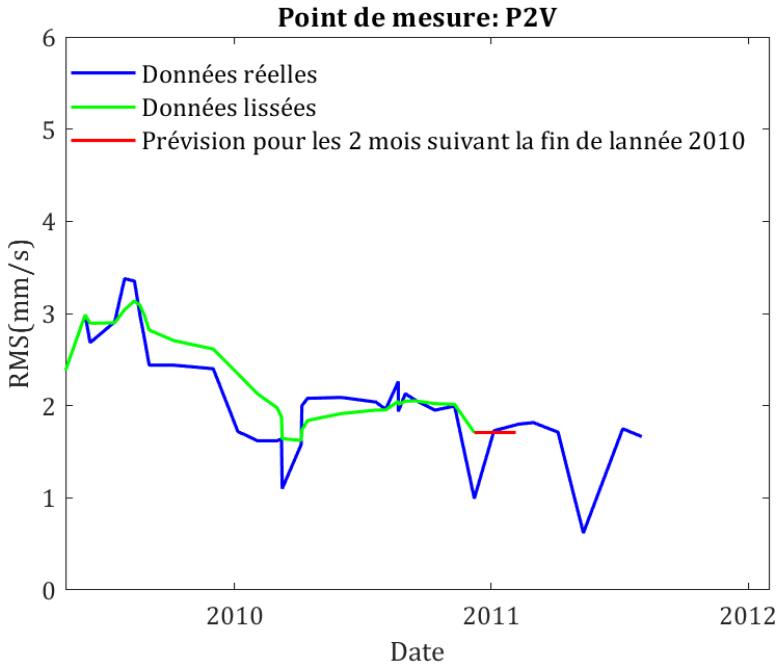


Figure 3. 12 Prévision par LED pour n= 60 jours, =0.3 et β=0.3, MSE= 0.0830

D'après le tableau 3.2, Les paramètres (α et β) optimaux varient entre les différents cas, indiquant que la nature des séries temporelles et leurs caractéristiques spécifiques influencent fortement le choix des paramètres. Les MSE plus faibles pour certains cas montrent une meilleure performance de la méthode pour ces séries spécifiques.

Tableau 3. 2 : Estimation des paramètres de prévision

Cas	α	β	MSE
P1A : Prévision de 60 jours	0.5	0.5	0.0692
P1A : Prévision de 60 jours	0.2	0.2	0.2461
P1A : Prévision de 180 jours	0.5	0.5	0.0692
P1H : Prévision de 60 jours	0.2	0.2	0.0121
P1V : Prévision de 60 jours	0.2	0.2	0.1337
P2A : Prévision de 180 jours	0.3	0.3	0.0649
P2H : Prévision de 60 jours	0.2	0.2	0.0734
P2V : Prévision de 60 jours	0.3	0.3	0.0830

En conclusion, La méthode de tendance linéaire de Holt s'est avérée être un outil efficace pour la prévision des séries temporelles dans cette étude, avec des performances variables selon les cas et les paramètres choisis. La sélection manuelle des paramètres α et β a permis d'obtenir des MSE relativement faibles, indiquant une bonne adéquation des prévisions aux données réelles. Cependant, il est important de noter que la performance de la méthode dépend fortement de la nature des données et nécessite une sélection attentive des paramètres en fonction des caractéristiques spécifiques de chaque série temporelle.

3.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté l'application de la méthode de prévision par lissage exponentiel double (LED) pour prédire l'état futur d'un moteur, en utilisant des mesures vibratoires réelles capturées par des accéléromètres sur le moteur. Cette étude met en évidence l'importance de la sélection appropriée des paramètres du modèle LED pour une prévision précise des séries temporelles. Les résultats obtenus démontrent que la méthode LED peut être utilisée avec succès pour prédire l'état futur d'une machine tournante en utilisant des mesures de vibration.

Cependant, des études supplémentaires sont nécessaires pour évaluer la robustesse de la méthode LED sur d'autres ensembles de données. En conclusion, la méthode LED offre une approche précise et efficace pour la prévision de l'état des machines tournantes.

Conclusion Générale

En conclusion, ce mémoire met en lumière l'importance de la maintenance prédictive des machines tournantes pour assurer une production continue et prolonger la durée de vie des équipements. Les méthodes traditionnelles de maintenance sont insuffisantes et entraînent des pertes économiques significatives. Il est donc impératif d'adopter des systèmes de diagnostic fiables capables de détecter les défauts avant qu'ils ne causent des défaillances majeures. L'analyse vibratoire s'avère être une méthode privilégiée dans ce domaine, permettant de capter et d'analyser les vibrations générées par les machines pour détecter, identifier et localiser les défauts.

À travers notre étude, nous avons démontré l'efficacité de l'analyse vibratoire couplée à des méthodes de prévision statistique, notamment la méthode de prévision par lissage exponentiel double (LED), pour surveiller l'état des machines tournantes dans une centrale électrique. Nos résultats montrent que cette approche permet de prédire avec précision l'état futur des machines, contribuant ainsi à prévenir les incidents et à éviter les arrêts imprévus. Cependant, pour garantir la robustesse et la fiabilité de cette méthode, des études complémentaires sur différents ensembles de données sont nécessaires.

En résumé, l'intégration de l'analyse vibratoire et des techniques de prévision statistique constitue une stratégie de maintenance conditionnelle efficace qui améliore

la fiabilité et la durabilité des machines tournantes. Il est donc essentiel pour les professionnels de l'industrie de mettre en œuvre ces pratiques avancées pour optimiser la maintenance de leurs équipements et assurer une gestion proactive qui prend des mesures anticipées pour éviter les problèmes futurs.

Références

[1] Boulenger, A., & Pachaud, C. (2009). Aide-mémoire Surveillance des machines par analyse des vibrations. Dunod.

[2] Adams, M. L. (2009). Rotating machinery vibration: from analysis to troubleshooting. CRC Press.

[3] Sinha, J. K. (2015). *Vibration analysis, instruments, and signal processing* (Vol. 1). Boca Raton: CRC press.

[4] Benghalia, K., & Mesbaiah, O. (2022). Surveillance conditionnelle des machines tournantes dans la centrale électrique de LARBAA. Mémoire de Master, Université de Médéa.

[5] Makhlouf, Y., Djeziri, S., (2016). Conception et réalisation d'un système d'acquisition des signaux acoustiques et vibratoires. Mémoire de Master, Université de Médéa.

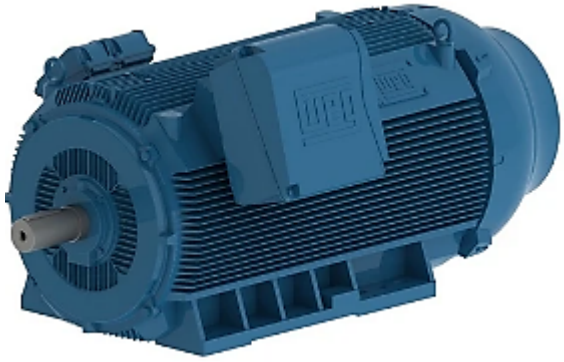
[6] Pardoux, C., & Goldfarb, B. (2013). Prévision à court terme: méthodes de lissage exponentiel. Université de Paris.

[7] Woodward, W. A., Sadler, B. P., & Robertson, S. (2022). Time series for data science: Analysis and forecasting. Chapman and Hall/CRC.

Annexes

Moteur 355c

HGF 500 kW 4P 355C/D/E 3Ph 400 V 50 Hz IC411 - TEFC - B3R(E)



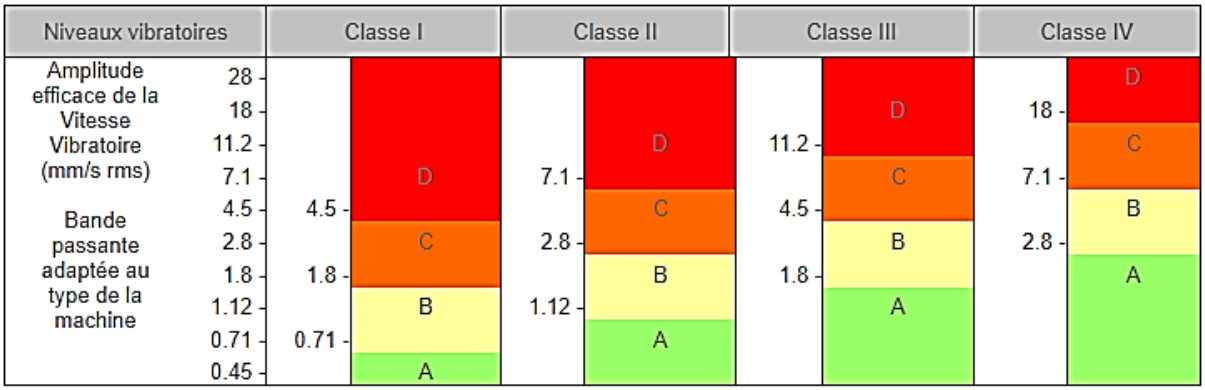
Product features

Standard	IEC 60034-1	Output rating	500 kW
Frequency	50 Hz	Mounting	Foot-mounted
Voltage	400 V	Flange	Without
Number of poles	4	Mounting	B3R(E)
Degree of Protection	IP55	Terminal box[1]	Right position
Synchronous speed	1500 rpm	Enclosure	IC411 - TEFC

Electric Motors

Frame	355C/D/E	Moment of inertia (J)	15.3 kgm²
Output	500 kW (680 HP)	Design	N
Number of Poles	4	Insulation Class	F
Frequency	50 Hz	Service factor	1.00
Rated speed	1488 rpm	Temperature rise	80 K
Slip	0.80 %	Duty Cycle	S1
Rated voltage	400 V	Starting Method	Direct On Line
Rated current	861 A	Ambient temperature	-20°C to +40°C
L. R. Amperes	5769 A	Altitude	1000 m.a.s.l.
LRC	6.7	Degree of Protection	IP55
No load current	272 A	Enclosure	IC411 - TEFC
Rated torque	327 kgfm	Mounting	B3R(E)
Locked rotor torque	180 %	Rotation¹	Both (CW and CCW)
Breakdown torque	240 %	Noise level²	75.0 dB(A)
Locked rotor time	46s (cold) 26s (hot)	Approx. weight³	3169 kg

Norme ISO 10816-1



Classe I: Parties individuelles de moteurs et de machines, liées intégralement à la machine complète en état de fonctionnement normal. (Les moteurs de production électrique jusqu'à 15 kW sont des exemples typiques des machines de cette catégorie)

Classe II: Machines de taille moyenne, (du type moteurs électriques de capacité 15 kW à 75 kW) sans assise spéciales, moteurs ou machine connectées rigidement (jusqu'à 300 kW) sur assises spéciales.

Classe III: Grosses machines motrices et autres grosses machines avec masses en rotation montées sur des assises lourdes et rigides qui sont relativement raides dans le sens du mesurage des vibrations.

Classe IV: Grosses machines motrices et autres grosses machines avec masses en rotation montées sur des assises qui sont relativement souples dans le sens du mesurage

des vibrations (par exemple, turboalternateurs et turbines à gaz avec capacité supérieure à 10 MW).

Zone A : Les vibrations des machines Nouvellement mises en service se placent normalement dans cette zone.

Zone B : Les machines dont les vibrations se situent dans cette zone sont normalement considérées comme acceptables pour un service de longue durée sans la moindre restriction.

Zone C : Les machines dont les vibrations se situent dans cette zone sont normalement considérées comme ne convenant pas pour un service de longue durée en continu. En général, la machine peut fonctionner dans ces conditions pendant une durée limitée, jusqu'à ce que l'occasion se présente pour prendre les mesures correctives qui s'imposent.

Zone D : Les valeurs de vibrations constatées dans cette zone sont normalement considérées comme suffisamment importantes pour endommager la machine.