

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ÉCOLE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIES INDUSTRIELLES  
- ANNABA -



المدرسة العليا للتكنولوجيا الصناعية -  
عنابة

Année / 2020

DEPARTEMENT DU SECOND CYCLE

FILIÈRE

GENIE INDUSTRIEL

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État

SURVEILLANCE, DIAGNOSTIC ET LOCALISATION DES DEFAUTS DANS LA  
TURBINE DE VENTILLATION X205 EN UTILISANT LA MACHINE  
D'APPRENTISSAGE EXTREME.

Spécialité

Maintenance et Fiabilité des Systèmes Industriels

Par

ABDELAZIZ Roumaïssa et BENYOUCEF Rania

Sous la direction de :

DJEMANA Mohamed

Grade

MCB

Établissement d'affiliation

ESTI Annaba

Devant le jury

Président :

ESTI Annaba

Examineurs :

ESTI Annaba

ESTI Annaba

## Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience pour que nous puissions achever ce travail.

En second lieu, nous tenons à adresser nos plus vifs remerciements et à exprimer notre profonde gratitude à tous ceux qui ont participé à l'élaboration de ce travail et en particulier notre promoteur Monsieur **DJEMANA Mohamed** pour son dévouement et sa disponibilité durant la préparation de ce mémoire et ses conseils qui nous ont été très précieux.

Nous tenons à exprimer nos meilleurs sentiments à Monsieur **BENHASSINE Naâmane**, pour toute son aide, sa connaissance, et ses exigences, durant la préparation de ce travail.

Nous sommes aussi très reconnaissants aux membres de jury qui nous feront l'honneur d'accepter de juger ce travail, d'apporter leurs réflexions et leurs critiques scientifiques. Nous les exprimons nos très vives reconnaissances.

Nos remerciements s'étendent également à tous nos enseignants durant les années des études.

Nous remercions chaleureusement nos familles : Parents ; grands-parents ; frères et sœurs ; oncles et tantes ; cousins et cousines. Nous les remercions de leurs aides, soutien et encouragements tout au long de mes études.

Nous remercions également nos collègues et amis et tout le staff pédagogique.

Notre reconnaissance s'adresse à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce modeste travail puisse voir le jour.

## **Dédicace**

Pour vous mes très chères parents pour vos encouragements, vos multiples soutiens et votre affection quotidienne, Merci d'être présent en toutes circonstances. Je prie le tout puissant qu'Allah vous protège, vous donne une longue vie et nous aide à être toujours votre fierté ;

A mes très chers frères Mehdi et Aymen ;

A toute ma famille ;

A mes amies Rayene, Lilya, Roumaissa, Leila, Racha, Kamilia ;

A tous mes collègues de promotion de génie industriel ;

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin ;

Ainsi qu'à mon binôme Rania, je te dédie ce travail.

**Roumaissa**

## *Dédicace*

Merci Allah de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au du rêve, et du bonheur de lever mes mains vers le ciel et de dire :

« Hamdouli Allah »

Je dédie ce modeste travail :

A celles qui nous ont donné la vie, le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse .Qui se sont sacrifiées pour notre bonheur et notre réussite, à ma mère Massika, à mon père Abdelmadjid, l'école de notre enfance, qui ont été notre ombre durant toutes les années des études, et qui ont veillé tout au long de notre vie à nous encourager, à nous

apporter leurs aides et à nous protéger. Merci d'être présent en toutes circonstances. Je prie le tout puissant qu'Allah vous protège, vous donne une longue vie et nous aide à être toujours votre fierté ;

À ma très belle sœur Wafa, son mari Bilel et à leur petit ange Taim allah,

À mes chers frères Mouhamed, Hichem et Ayoub,

J'ai vécu avec vous mes plus belles histoires, merci d'être toujours avec moi.

À ma famille

À mes amis.

A vous tous je dédie ce mémoire.

**Rania**

## Table des matières

Liste des figures .....	V
Liste des tableaux .....	V
Introduction générale .....	1
Chapitre 1 : Surveillance et diagnostic des machines tournantes. ....	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Généralité sur la maintenance .....	3
1.2.1 Qu'est-ce que la maintenance.....	3
1.2.2 Le But de la maintenance .....	4
1.2.3 Les types de la maintenance .....	4
1.3 Généralités sur Les anomalies.....	5
1.3.1 Les Types d'anomalies.....	5
1.3.2 Causes de défaillance du système .....	7
1.4 Techniques d'analyse .....	8
1.4.1 Choix d'une technique d'analyse.....	9
1.4.2 Vibrations des machines tournantes.....	9
1.5 Analyse vibratoire .....	10
1.5.1 La surveillance.....	10
1.5.2 Le diagnostic .....	11
1.5.3 Techniques d'exploitation .....	12
1.6 Défaits des machines tournantes .....	13
1.6.1 Déséquilibre (défaut de balourd) .....	13
1.6.2 Défaut de désalignement .....	14
1.6.3 Défaits de serrages .....	15
1.7 Prise de décision à l'aide des techniques de l'Intelligence Artificielle .....	16
1.7.1 L'intelligence artificielle .....	16
1.7.2 Réseaux de neurones artificiels .....	16
1.7.3 Neurone formel.....	16
1.7.4 Apprentissage des réseaux de neurones .....	19
1.7.5 Logique floue.....	20
1.7.6 Neuro-floue.....	20
1.7.7 Extreme Learning Machine .....	21

1.7.8	Les caractéristiques statistiques .....	21
1.8	Conclusion .....	21
Chapitre 2 : Acquisition de données .....		22
2.1	Introduction .....	22
2.2	Équipement à étudier : ventilateur de circulation X205 .....	22
2.1.1	Caractéristiques techniques du ventilateur .....	23
2.1.2	Description de la chaine de ventilation .....	23
2.3	Acquisition des signaux .....	24
2.3.1	Points de mesure .....	24
2.3.2	Système d'acquisition .....	24
2.4	Traitement et analyse des signaux .....	25
2.4.1	Défaut de balourd .....	25
2.5	Conclusion .....	27
Chapitre 3 : Modélisation et simulation de la chaine de ventilateur sur SolidWorks .....		28
3.1	Introduction .....	28
3.2	La conception assistée par ordinateur .....	28
3.2.1	Définition .....	28
3.2.2	Choix de l'outil informatique de CAO .....	28
3.2.3	Présentation du logiciel de CAO SolidWorks .....	28
3.2.4	Simulation numérique : SolidWorks Motion .....	29
3.3	Modélisation de différentes pièces du ventilateur X205 .....	30
3.3.1	Modélisation de l'arbre .....	30
3.3.2	Modélisation de turbine .....	31
3.3.3	Modélisation des paliers .....	32
3.4	Assemblage des composants de ventilateur .....	36
3.5	Les étapes de simulation .....	36
3.6	Modélisation des défauts et discussion des résultats de simulation .....	39
3.6.1	Le défaut de balourd .....	39
3.6.2	Le défaut d'alignement .....	43
3.6.3	Le défaut de serrage .....	46
3.7	Conclusion .....	48
Chapitre 4 : Localisation de défauts par la machine d'apprentissage extrême .....		49
4.1	Introduction .....	49

4.2 Principe du schéma ELM pour la localisation des défauts .....	49
4.3 Préparation des données pour localiser les défauts .....	51
4.4 Localisation des défauts .....	52
4.5 Extraction des données .....	53
4.6 Résultats de l'application du l'algorithme .....	54
4.7 Conclusion .....	56
Conclusion générale .....	57
Bibliographie .....	59

## Liste des figures

Figure1.1 : Les types de maintenance.....	4
Figure1.2 : Ordonancement des anomalies selon leur criticité.....	6
Figure1.3 : Causes de défaillance.....	8
Figure 1.4 : Les différentes techniques d'analyse.....	9
Figure 1.5 : Schéma relation entre Analyse vibratoire, surveillance et diagnostic.....	10
Figure1.6 : Les différentes étapes techniques du diagnostic.....	11
Figure1.7 : Balourd statique.....	14
Figure1.8 : Balourd dynamique.....	14
Figure1.9 : Alignement, défaut de concentricité et défaut angulaire.....	15
Figure1.10 : Désalignement de paliers se traduisant par une flexion de l'arbre .....	15
Figure1.11 : Mauvais serrage mécanique .....	15
Figure1.12 : Le modèle du neurone formel .....	17
Figure1.13 : Un réseau de neurones non bouclé .....	18
Figure 1.14 : Un réseau de neurones bouclé.....	19
Figure1.15 : Principe du système Neuro – Flou.....	20
Figure 2.1: Ventilateur de circulation X205 .....	22
Figure 2.2: Schéma synoptique de la chaine de ventilateur .....	24
Figure 2.3 : Matériel utilisé pour le diagnostic de la chaine de ventilation .....	24
Figure 1.4: Le spectre relevé sur le palier 3 .....	26
Figure 3.1: Logo SolidWorks .....	27
Figure 3.2 : Créer ou ouvrir un document.....	28
Figure 3.3 : Le dessin de définition de l'arbre de ventilateur X205 .....	29
Figure 3.4 : Esquisse de l'arbre dessinée dans SolidWorks .....	29
Figure 3.5 : Le model 3D de l'arbre .....	29
Figure 3.6 : Le dessin de définition de turbine de ventilateur X205.....	30
Figure 3.7 : La modélisation du corps de turbine de ventilateur X205.....	30
Figure 3.8 : La modélisation des ailettes de turbine de ventilateur X205.....	31
Figure 3.9 : Différents vues de turbine de ventilateur X205 en 3D.....	31
Figure 3.10 : Le dessin de définition de partie inférieure du palier fixe de ventilateur.....	32

Figure 3.11 : Différents vues de la partie inférieure du palier fixe en 3D .....	32
Figure 3.12 : Le dessin de définition de partie supérieure du palier fixe de ventilateur X205.....	33
Figure 3.13 : Différents vues de la partie supérieure du palier fixe de ventilateur X205 en 3D.....	33
Figure 3.14 : Assemblage des parties du palier fixe.....	34
Figure 3.15 : Vue de coupe du palier fixe .....	34
Figure 3.16 : Vue de coupe du palier libre .....	34
Figure 3.17 : Assemblage des composants de ventilateur X205 .....	35
Figure 3.18 : Le choix du complément SolidWorks Motion .....	36
Figure 3.19 : Le choix de la direction « Y » pour la Gravité .....	36
Figure 3.20 : Application du moteur circulaire .....	36
Figure 3.21 : La détermination de la valeur de vitesse et la durée de simulation .....	37
Figure 3.22 : Vue de coupe des composants en contact .....	38
Figure 3.23 : Paramètres des conditions de contact .....	38
Figure 3.24 : Esquisse des barres de poussière.....	38
Figure 3.25 : Bossage extrudé des barres.....	38
Figure 3.26 : Enlèvement de matière .....	38
Figure 3.27 : Barres de poussière en 3D sur tout l'ensemble des pales .....	40
Figure 3.28 : Les barres de poussière qui généreront le déséquilibre .....	40
Figure 3.29 : Répartition de la poussière sur la turbine .....	41
Figure : 3.30 Spectre simulé du défaut de balourd .....	41
Figure 3.31 : Superposition du spectre expérimentale et spectre simulé du défaut de balourd .....	42
Figure 3.32 : Modélisation d'accouplement .....	43
Figure 3.33 : Modélisation du défaut d'alignement radial.....	43
Figure 3.34 : Application du moteur circulaire .....	43
Figure 3.35 : Spectre de simulation de désalignement radial .....	44
Figure 3.36 : Spectre typique de désalignement parallèle .....	44
Figure 3.37 : La modélisation du défaut de serrage au niveau du palier fixe .....	45
Figure 3.38 : Spectre simulé de desserrage (Palier fixe) .....	46
Figure 3.39 : Spectre simulé de desserrage (Palier libre) .....	46
Figure 4.1 : Étapes d'estimation de localisation des défauts .....	50
Figure 4.2 : Schéma de localisation des défauts .....	51

Figure 4.3 : Spectres simulés de formation du modèle ELM des différents cas de desserrage au niveau du palier libre ..... 52

Figure 4.4 : Spectres simulés de formation du modèle ELM des différents cas de desserrage au niveau du palier fixe..... 53

Figure 4.5 : Résultats de localisation par ELM ..... 56

**Liste des tableaux**

Tableau 1-1 : Indicateurs temporels .....12

Tableau 2-2: Fiche technique de l'équipement .....22

Tableau 3-4: Présentation des résultats des mesures effectués.....25

Tableau 5-3 : Niveaux vibratoires admissibles sur les machines tournantes (ISO 2372) .....25

Tableau 4-1 : Liste des indicateurs d'entrée pour l'apprentissage de l'ELM ..... 54

Tableau 4-2 : Tableau de la matrice de confusion du modèle de prédiction ELM pour la localisation des défauts ..... 55

## Résumé

La surveillance et le diagnostic des machines tournantes représentent un moyen important pour déceler de manière avancée le défaut et en suivre son évolution. La maintenance des machines demande un grand entendement des anomalies liés à l'apparition et au développement des défauts. Détecter l'apparition d'un défaut de manière avancée et suivre son évolution présente un avantage pour l'industrie. En effet, il existe un grand choix de techniques utilisées dans la surveillance des machines telles que l'analyse vibratoire qui est très utile dans le domaine de la surveillance et du diagnostic des organes mécaniques dans les machines tournantes.

Ces dernières années, La recherche scientifique s'est orientée vers l'usage des méthodes intelligentes qui permettent de montrer la situation de la machine dans un espace de grande dimension, pour aider à la détermination de la situation de cette machine. Notre étude a pour but de proposer un algorithme permettant la détermination de la localisation des défauts dans les composantes des machines tournantes.

Ce travail est consacré pour l'étude de trois cas de défauts dans une turbine de ventilation : défaut de balourd, défaut d'alignement et le défaut de serrage. La surveillance de la turbine est basée sur l'analyse vibratoire. On a appliqué des méthodes d'analyse globale et de traitement de signal dans le but d'extraire des informations du défaut, Ensuite, une localisation de défaut de serrage a été réalisée à l'aide d'un algorithme en utilisant les réseaux de neurones artificiels (Extreme Learning Machine). Dont l'objectif est de rendre la procédure de la localisation des défauts automatisé.

A l'aide de logiciel SolidWorks 2016, une modélisation d'une partie de la chaîne de ventilateur a été effectuée afin de créer des défauts identiques à ceux enregistrés dans la réalité. Puis à partir d'une simulation dynamique dans les mêmes conditions du fonctionnement du modèle réel, des signaux temporels ont été relevés, dont certains nous a permis de valider le modèle de la simulation numérique, et les autres vont nous permettre d'avoir les signaux fréquentielles de certains défauts dont nous n'avons pas les signaux réels, cette approche va nous permet d'alimenter les modèles d'apprentissage.

**Mots clés :** analyse vibratoire des machines tournantes, traitement du signal, simulation, algorithme ELM.

## **Abstract**

Monitoring and diagnostic of rotating machines is an important means for early detection of the defect and for monitoring its development. The maintenance of machines requires a great understanding of the anomalies linked to the appearance and to the development of defects. Detect the appearance of a defect in an advanced way and monitor its evolution has an advantage for the industry. Indeed, there is a large choice of techniques used in the monitoring of machines such as vibration analysis, which is very useful in the field of monitoring and diagnostic of mechanical parts in rotating machines.

In recent years, scientific research has focused on the use of intelligent methods that allow showing the situation of the machine in a space of large dimension, to help the determination of the machine's situation. Our study aims to propose an algorithm allowing the determination of the location of defects in the components of rotating machines.

This work is devoted to the study of three cases of defects in a ventilation turbine, which are the unbalance defect, misalignment defect and loosening defect. The surveillance of the turbine based on vibration analysis. We applied global analysis and signal processing methods in order to extract information from defect. Then, a loosening defect localization was performed using a localization algorithm by artificial neural networks (Extreme Learning Machine) and that's to automate the procedure of the localization of defects.

By using SolidWorks 2016 software, a modeling of part of a ventilation turbine was carried out in order to create defects identical to those recorded in the reality. Then from a dynamic simulation under the same conditions of the functioning of the real model, temporal signals have been recorded, some of which have allowed to validate the digital simulation model, and others will allow us to have the frequency signals of some defects, which we do not have the real signals, this approach will allow us to feed the learning models.

**Keywords:** rotating machines vibration analysis, signal processing, simulation, ELM algorithm.

## ملخص

تمثل مراقبة وتشخيص الآلات الدوارة وسيلة مهمة للكشف عن الخطأ ومتابعة تطوره بطريقة متقدمة. تتطلب صيانة الآلات فهماً كبيراً للعيوب المرتبطة بظهور الأخطاء وتطورها. يعد الكشف عن ظهور الخطأ في مرحلة متقدمة ومراقبة تقدمه ميزة للصناعة. في الواقع، هناك مجموعة كبيرة من التقنيات المستخدمة في مراقبة الآلات مثل تحليل الاهتزاز وهو مفيد جداً في مجال مراقبة وتشخيص الأجزاء الميكانيكية في الآلات الدوارة.

في السنوات الأخيرة، ركز البحث العلمي على استخدام طرق ذكية تسمح بإظهار حالة الآلة في مساحة أبعاد كبيرة للمساعدة في تحديد وضع هذه الآلة. دراستنا تهدف إلى اقتراح خوارزمية تسمح بتحديد موقع الخطأ في مكونات الآلات الدوارة.

هذا العمل مخصص لدراسة ثلاث حالات من الأعطال في مروحة التهوية: خطأ عدم الاتزان وخطأ عدم المحاذاة وخطأ الشد. مراقبة التوربين يعتمد على تحليل الاهتزاز. قمنا بتطبيق طرق التحليل العامة ومعالجة الإشارات من أجل استخراج المعلومات من الخطأ، تم إجراء تحديد موقع خطأ الشد باستخدام خوارزمية باستخدام الشبكات من الخلايا العصبية الاصطناعية (آلة التعلم المتطرفة). الهدف منه هو إجراء الإجراء تحديد موقع الخطأ الآلي.

باستخدام برنامج SolidWorks 2016، تم تجسيد نموذج لجزء من المروحة لإنشاء أعطال مماثلة لتلك المسجلة في الواقع، ومن خلال المحاكاة الديناميكية تحت نفس الظروف الخاصة ب عمل النموذج الحقيقي قمنا بأخذ الإشارات الزمنية، والتي سمح لنا بعضها بالتحقق من صحة نموذج المحاكاة الرقمية والبعض الآخر سيسمح لنا بالحصول على مؤشرات التردد لبعض الاعطال التي لا نملك إشاراتها الحقيقية، وهذا النهج يعد مفيداً جداً لتغذية نماذج التعلم.

**الكلمات المفتاحية:** التحليل الاهتزازي، معالجة الإشارات، المحاكاة، خوارزمية ELM، الآلات الدوارة.

## **Introduction générale**

Dans le milieu industriel, les systèmes de production sont de plus en plus complexes et ne peuvent être exempts de perturbations et de défaillances, influant sur la qualité du produit, pouvant compromettre la production et conduire à la baisse technicoéconomique de l'entreprise. L'installation d'un contrôle efficace et constant de ces machines est donc un aspect important à prendre en considération dans les différentes politiques de gestion de tout système de production.

Le diagnostic de défauts de ces machines, est basé principalement sur la surveillance des indices liés à différentes dégradation. Ces indices peuvent être extraits de plusieurs sources d'information, la plus connue et la plus utilisée est l'analyse vibratoire. Elle permet de détecter presque tous les défauts susceptibles de se manifester dans les machines tournantes, un balourd, un jeu, un défaut d'alignement ...

L'analyse vibratoire permet de trouver des défauts et à suivre leur évolution dans le but de planifier ou reporter une intervention mécanique. Les expériences ont montré que le paramètre le plus fiable qui donne le plus précisément et de la meilleure façon l'état de dégradation d'une machine tournante est la vibration. En mesurant et en surveillant le niveau de vibration généré par une machine, on découvre un indicateur idéal sur son état. Si l'augmentation de vibration de la machine permet de découvrir un défaut, l'analyse des caractéristiques de vibration de la machine permet de reconnaître la cause. On peut ensuite avoir avec précision le délai avant qu'il ne soit risqué.

Avec l'élévation des sources d'information et le développement des techniques de traitement du signal, l'exploitation idéale de l'information, et l'évaluation objective de sa pertinence deviennent des tâches difficilement réalisables, c'est alors qu'apparut le besoin de systèmes automatiques pour la surveillance des états de fonctionnement des machines tournantes. Les techniques de l'intelligence artificielles se présentent aujourd'hui comme une solution, permettant de résoudre un grand nombre de ces problèmes, en se basant sur l'information fournie (sous forme de vecteur d'entrée) et les conditions de fonctionnement des machines supervisées. Les performances de ces techniques ne sont en fait, que les résultantes de la pertinence de l'information fournie.

Ce mémoire se compose de 4 chapitres :

## *Introduction générale*

Le premier chapitre est divisé en 4 parties, la première partie fait rappel sur les définitions et notions de base, liés à la maintenance industrielle et les types d'anomalies. La seconde partie est consacrée aux différentes techniques d'analyse, et les techniques d'exploitation des informations. La troisième partie étudie les différentes défaillances pouvant affecter les machines tournantes. On a focalisé, surtout sur 4 défauts les plus récurrents dans l'équipement étudié, qui sont : le défaut de balourd, le défaut de désalignement et le défaut de serrage. Dans La quatrième partie est consacré pour la prise de décision à l'aide des techniques de l'intelligence artificielle.

Le deuxième chapitre traite les résultats expérimentaux de l'application de l'analyse vibratoire pour le traitement du signal fréquentiel de défaut de balourd. Le but est d'extraire une information pertinente du défaut.

Le troisième chapitre présente une modélisation d'une partie de la chaine de ventilateur et la simulation dynamique de son fonctionnement réel à l'aide du logiciel SolidWorks 2015 dans le but de reproduire les défauts enregistrés dans la réalité et la validation du modèle de la simulation numérique.

Le quatrième chapitre est consacré pour une application de localisation de défaut de serrage qui a été réalisée à l'aide d'une machine d'apprentissage extrême ELM. Dont l'objectif est de rendre la procédure de la localisation des défauts automatisé.

Puis nous avons terminé par une conclusion générale sur cette étude.

## **Chapitre 1 : Surveillance et diagnostic des machines tournantes.**

### **1.1 Introduction**

La surveillance de machines tournantes est aujourd'hui un point indispensable de la fiabilité et de la sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Pour réduire le coût de production, diminuer le temps de réparation et éviter les grands endommagements, l'industrie moderne nécessite de plus en plus une maintenance fiable et efficace des machines tournantes. Une panne soudaine de ces systèmes peut mener à des dommages collatéraux ou mettre la vie humaine en danger. Le diagnostic de défauts de ces machines, s'appuie essentiellement sur la surveillance de symptômes liés à différentes conditions de dégradation. Ces symptômes peuvent être tirés et extraits de diverses sources d'information, parmi lesquelles, l'analyse vibratoire qui occupe une place prépondérante. [1]

Il faut dire que l'analyse vibratoire permet de détecter pratiquement tous les défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes. Elle permet l'élaboration d'un bilan complet de la machine, le contrôle des machines tournantes par l'analyse vibratoire est couramment utilisé notamment pour la surveillance des composants fragiles ou stratégiques.

Pour atteindre une exploitation optimale des sources d'information, plusieurs techniques de l'intelligence artificielle ont été mises au service du diagnostic de défauts des machines tournantes, la combinaison des techniques de traitement des signaux et de l'intelligence artificielle a permis, en plus, de fournir des outils de diagnostic efficaces.

### **1.2 Généralité sur la maintenance**

#### **1.2.1 Qu'est-ce que la maintenance**

D'après la norme AFNOR (Association Française de Normalisation) : « La maintenance est l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé. Maintenir, c'est donc effectuer des opérations diverses (Dépannage, graissage, visite, réparation, amélioration, ....etc.) qui permettent de conserver le potentiel du matériel pour assurer la continuité et la qualité de production. Bien maintenir c'est assurer ces opérations au cout globale optimum. »

- ✓ « Maintenir » contient la notion de « Prévention » sur un système en fonctionnement.
- ✓ « Rétablir » contient la notion de « Correction » consécutive à une perte de fonctionnement.

### 1.2.2 Le But de la maintenance

- Maintenir l'équipement dans les meilleures conditions possibles.
- Assurer la disponibilité maximale de l'équipement à un prix minimum.
- Augmenter la durée de vie des équipements.
- Entretien des installations avec le minimum d'économie et les remplacer à des périodes prédéterminées.
- Assurer un fonctionnement sûr et efficace à tout moment. [2]

### 1.2.3 Les types de la maintenance

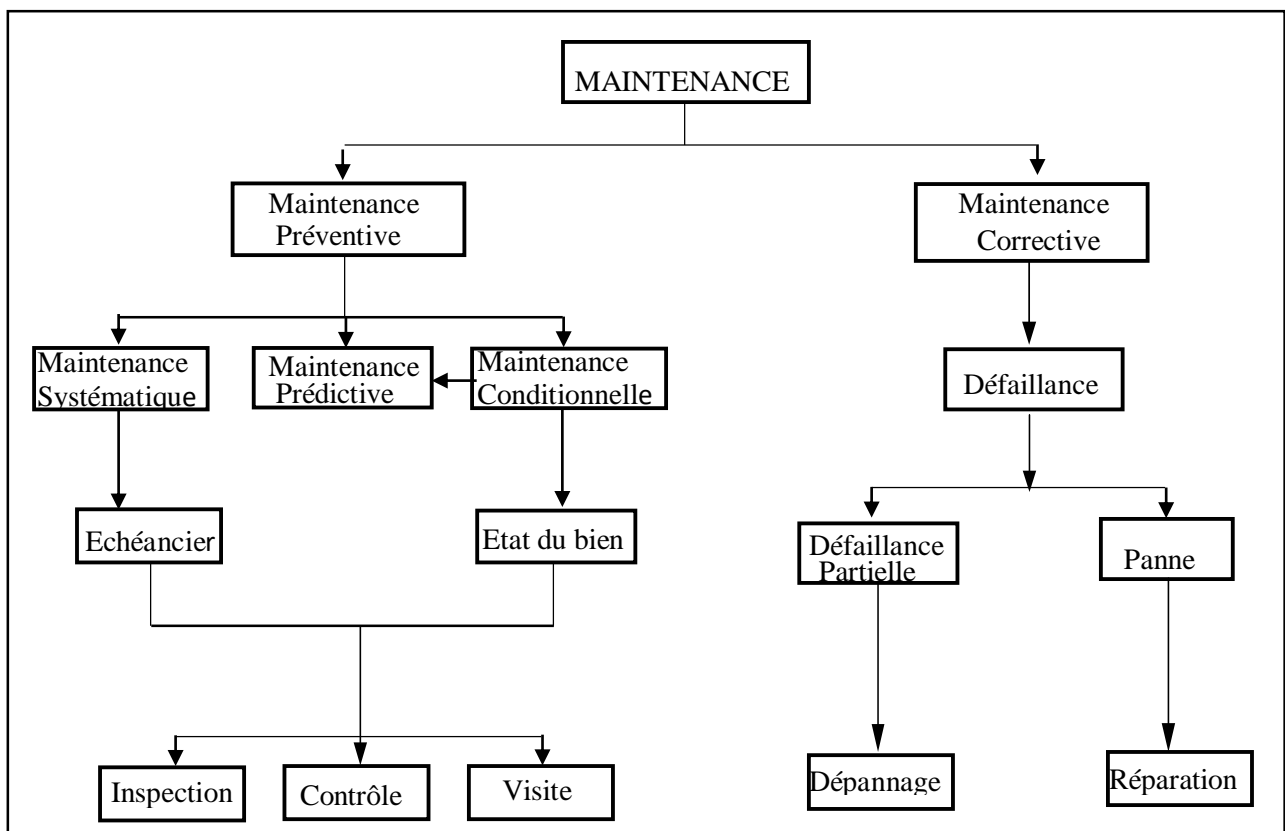


Figure1.1 : Les types de maintenance [14]

#### 1.2.3.1 La maintenance corrective

« Opération de maintenance effectuée après défaillance » AFNOR X60-010.

C'est une maintenance destinée à rendre la santé aux machines qui l'on perdue ou c'est une politique de maintenance (dépannage ou réparation) qui correspond à une attitude de réaction à des événements plus ou moins aléatoires et qui s'applique après la panne. [3]

On distingue :

- **Maintenance palliative** : l'action de dépannage permet de remettre provisoirement le matériel à un niveau de performance acceptable mais inférieure au niveau optimal.
- **Maintenance curative** : l'intervention qui suit la défaillance permet le rétablissement du niveau de performance optimal du matériel.

### 1.2.3.2 La maintenance préventive

D'après l'AFNOR (NF X 60-010), la maintenance préventive ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d'un bien ou d'un service rendu. Les activités correspondantes sont déclenchées selon un échancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unités d'usage (maintenance systématique), et/ou des critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service (maintenance conditionnelle).

Il existe trois types :

- **Maintenance préventive systématique**

D'après la Norme NF X60010« Maintenance préventive effectuée selon un échancier établi selon le temps ou le nombre d'unités d'usage ».

- **Maintenance préventive conditionnelle**

D'après l'AFNOR : C'est la maintenance préventive subordonnée à un type d'événements prédéterminés (auto, diagnostics, analyse vibratoire, information d'un capteur, mesure d'une usure...). Elle dépend donc et fait intervenir des informations recueillies en temps réel.

- **Maintenance préventive prévisionnelle**

Parfois appelée « maintenance prédictive », la maintenance prévisionnelle est, selon l'AFNOR, « Maintenance exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien ».

## 1.3 Généralités sur Les anomalies

### 1.3.1 Les Types d'anomalies

#### 1.3.1.1 Défaut

C'est tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique de référence lorsque celui-ci est en dehors des spécifications. [30]

### 1.3.1.2 Panne

C'est une inaptitude d'une entité à accomplir une fonction requise ou à assurer le service approprié à la suite d'une défaillance.

Une panne est généralement la conséquence d'une défaillance ; néanmoins, elle peut exister sans défaillance préalable autrement dit : C'est l'ensemble des défaillances des composants. La cause supposée d'une panne est un défaut physique ou une erreur humaine.

### 1.3.1.3 Défaillance

« Une défaillance est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques ». (AFNOR, 2002)

Il existe deux formes de défaillance :

**-Défaillance partielle** : altération ou dégradation de l'aptitude d'un bien à accomplir la fonction requise.

**-Défaillance complète** : cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir la fonction requise.

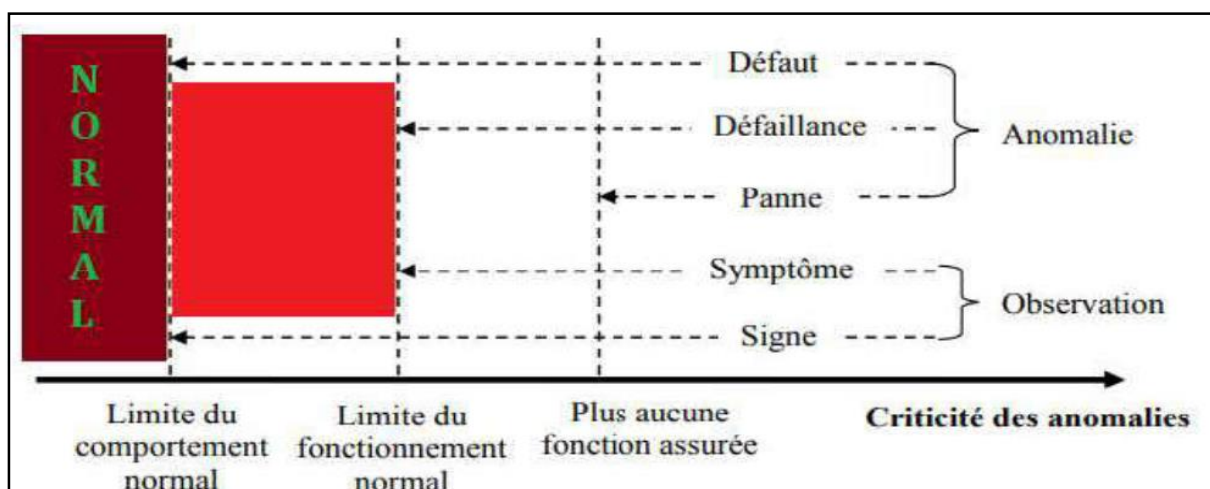


Figure1.2 : Ordonnement des anomalies selon leur criticité

#### NOTE

**Signe** : un défaut est perceptible au travers d'un signe, caractère manifestant un état comportemental anormal. Un signe est caractérisé par un ensemble d'observations en provenance d'un système physique et révélateur de la présence d'un défaut.

**Symptôme** : le pendant de signe dans le cas d'une défaillance correspond au terme symptôme, définit comme suit : caractère distinctif d'un état fonctionnel anormal. [5]

### **1.3.2 Causes de défaillance du système**

Les causes de défaillance sont des circonstances liées à la conception, à la fabrication, à l'installation, à l'utilisation et à la maintenance qui ont conduit à la défaillance. [6]

Les causes de défaillance du système peuvent être externes ou internes :

#### **a) Défaillances de causes intrinsèques ou inhérentes**

« Intrinsèques » signifie qu'elles sont générées par le système lui-même, en condition normale de fonctionnement. Parmi les causes intrinsèques, la norme CEN distingue :

- « Défaillance due à une conception inadéquate du bien ».
- « Défaillance due à une fabrication du bien non conforme à sa conception ou à des procédés de fabrication spécifiés ».
- « Défaillance due à une installation incorrectement réalisée ». [31]

#### **b) Défaillances de causes extrinsèques**

La norme CEN permet de distinguer :

- « Défaillance de mauvais emploi, due à l'application de contraintes qui excèdent les capacités spécifiées du bien ».
- « Défaillance par fausse manœuvre, due à une manipulation incorrecte du bien ou un manque de précaution ».
- « Défaillance due à la maintenance, résultant d'une action inadaptée ou exécutée de façon incorrecte ». [31]

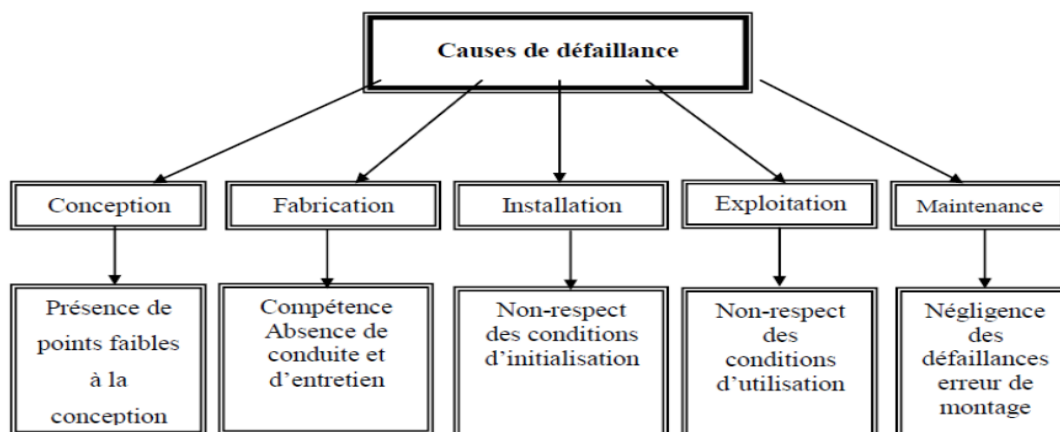


Figure1.3 : Causes de défaillance [8]

#### 1.4 Techniques d'analyse

La surveillance d'un équipement de machine est assurée en relevant périodiquement un indicateur d'état de dégradation ou de performance, il existe différentes techniques d'analyse tels que :

- **L'analyse vibratoire** : est la plus connue et la plus largement utilisée car adaptée aux des composants mécaniques et aux machines industrielles en fonctionnement. Elle permet de détecter la majorité des défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes. Les défauts se traduisent par une variation des efforts internes que subit la machine, et donc à une modification de son comportement vibratoire. [9]
- **La thermographie infrarouge** : elle est peu utilisée pour la surveillance des machines tournantes notamment pour la détection de défauts qui se manifestent par un échauffement anormal à la surface de l'équipement. La thermographie permet de réaliser des mesures à distances et d'obtenir instantanément une image thermique de la zone inspectée.
- **L'analyse des mesures ultrasonores** : permet de détecter des défauts de faibles amplitudes à hautes fréquences.
- **L'analyse d'huile** : est appliquée à toutes les machines contenant des fluides de lubrification. Elle consiste à prélever un échantillon d'huile et de l'analyser pour déduire l'état de l'équipement.
- **L'analyse acoustique** : permet de détecter tout bruit anormal à l'aide de microphone placé à distance de l'équipement. [10]

### 1.4.1 Choix d'une technique d'analyse

Le choix de technique d'analyse dépend du type de machine à étudier et du type de défaillance que l'on souhaite détecter. Pour les machines tournantes, un indicateur de type vibratoire permet de détecter la plupart des défauts, on établit une courbe d'évolution de l'indicateur au cours du temps. Sur cette courbe, on définit différents seuils correspondant à un niveau d'alerte, à un niveau de défaillance, ces niveaux sont établis soit par expérience soit en appliquant les normes [11]

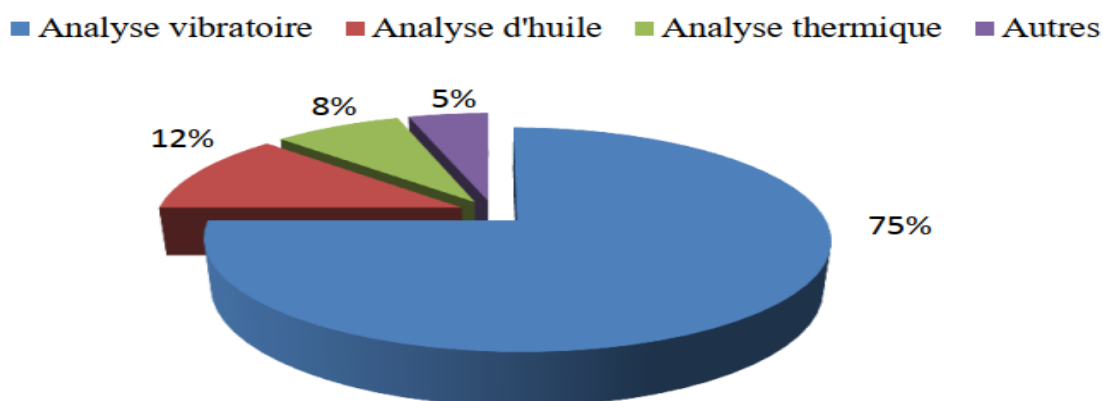


Figure 1.4 : Les différentes techniques d'analyse.

### 1.4.2 Vibrations des machines tournantes

Un système mécanique est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement de va et vient autour d'une position moyenne, dite position d'équilibre [11]

En pratique, une bonne conception produira de faibles niveaux vibratoires dans une machine tournante. Cependant, la machine vieillissant, les pièces se déforment et s'usent, et de légers changements dans ses propriétés dynamiques apparaissent. Les arbres se désalignent, les rotors se déséquilibrent, les jeux augmentent. Tous ces facteurs se traduisent par une augmentation de l'énergie vibratoire qui ajoute une charge dynamique considérable aux paliers.

Les vibrations recueillies lors des campagnes de mesures sont porteuses d'informations qui caractérisent l'état de fonctionnement de certains composants mécaniques constituant la machine analysée, c'est grâce à l'analyse de ces vibrations qu'il est possible de détecter les composants défectueux et éventuellement de les localiser, lorsqu'un certain seuil fixé est atteint. [12]

## 1.5 Analyse vibratoire

L'analyse vibratoire poursuit deux objectifs :

- la détection des défauts.
- l'analyse détaillée des défauts. [9]

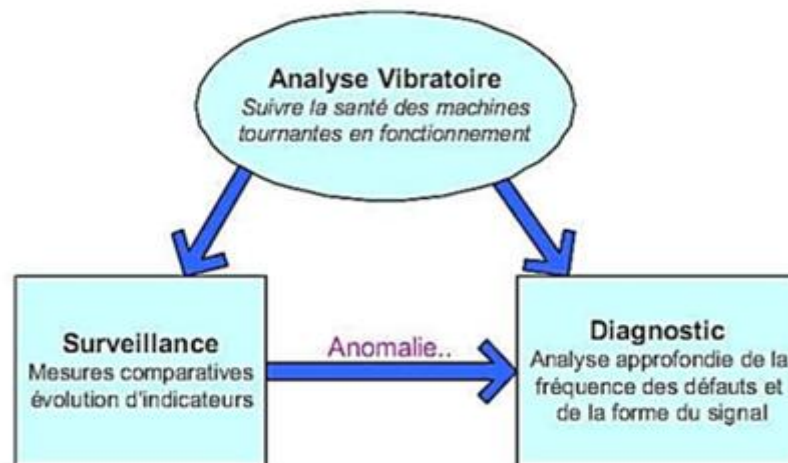


Figure 1.5 : Schéma relation entre Analyse vibratoire, surveillance et diagnostic [4]

### 1.5.1 La surveillance

Est la comparaison des mesures vibratoires effectuées à intervalles de temps déterminés dans des conditions de fonctionnement identiques permet de suivre l'évolution d'un défaut en exploitant le signal vibratoire [10]

On distingue fondamentalement deux types de surveillance : la surveillance on-line et la surveillance off-line. La surveillance peut en outre être continue ou périodique. Le type de surveillance à appliquer à une machine dépend plusieurs critères parmi lesquels :

- La criticité de la machine dans le processus.
- La maintenabilité de la machine.
- Les conséquences d'une panne en termes de sécurité et La stratégie de l'entreprise.

#### -La surveillance on-line

Les capteurs sont installés à demeure sur les machines et connectés à un système de surveillance.

#### -La surveillance off-line

Les mesures sont relevées à intervalles réguliers par un opérateur équipé d'un collecteur de données. [13]

### 1.5.2 Le diagnostic

« Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance (s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test. » (NF X60-010)

« Actions menées pour la détection de la panne, sa localisation et l'identification de la cause » (EN 13306, 2001)

#### ➤ Les différentes étapes techniques du diagnostic

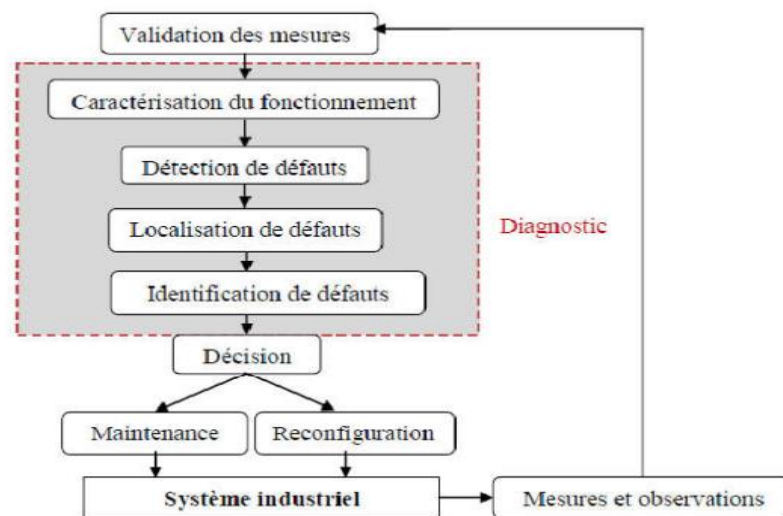


Figure1.6 : Les différentes étapes techniques du diagnostic

- **Détection de défauts** : consiste à comparer la signature courante à la signature de référence associée aux modes de fonctionnement. Dans les procédures de détection une classification des situations observables de symptômes peut être capable de caractériser le fonctionnement de système en état normal ou anormales. [5]
- **Localisation** : Cette étape s'exécute juste après qu'il ait une détection d'un défaut, elle consiste à repérer et à isoler l'élément défaillant et préparer ainsi la tâche à la prochaine étape qui est l'identification.
- **Identification** : Ici, on cherche à identifier les causes précises de cette anomalie grâce à des signatures répertoriées par les experts, et validées après expertise et réparation des dysfonctionnements. Les informations ainsi obtenues sont fournies au service de maintenance.

### 1.5.3 Techniques d'exploitation

#### 1.5.3.1 Analyse de niveau globale

La méthode du niveau global consiste à relever les mesures globales sur une machine lorsqu'elle est réputée fonctionner de manière satisfaisante (rendement, consommations, disponibilité...) et elle pourra être utilisée lorsque les défauts à surveiller émettent des vibrations très importantes, comme le balourd ou les défauts de lignage.

Les indicateurs de surveillance utilisés dans cette méthode sont [14] :

- Accélération (g) pour détecter des phénomènes se situant à haute fréquence ( $0 \leq F \leq 20000$  Hz).
- Vitesse (mm /s) pour détecter des phénomènes se situant dans une large gamme de fréquence ( $F \leq 1000$  Hz).
- Déplacement ( $\mu\text{m}$ ) pour détecter des phénomènes à basse fréquence ( $F \leq 100$  Hz).

Les différents niveaux globaux doivent être représentés sur des courbes ; les amplitudes sont reportées sur l'axe vertical, et le temps (jours des mesures, voire heures) sur l'axe horizontal.

Les mesures d'amplitudes sont généralement prises en utilisant les grandeurs suivantes :

Désignation	Description	Expression
<b>RMS</b>	<b>RMS (Root Mean Square)</b>	$RMS = \sqrt{\frac{1}{Ne} \sum_{n=1}^{Ne} [s(t)]^2}$
<b>FC</b>	<b>Facteur crête</b>	$FC = \frac{\text{valeur crete}}{RMS} = \frac{\sup s(t) }{\sqrt{\frac{1}{Ne} \sum_{n=1}^{Ne} [s(t)]^2}}$
<b>Kurtosis</b>	<b>Kurtosis</b>	$\text{Kurtosis} = \frac{\frac{1}{Ne} \sum_{n=1}^{Ne} (S(t) - \bar{S})^4}{[\frac{1}{Ne} \sum_{n=1}^{Ne} (S(t) - \bar{S})^2]^2}$ <p style="text-align: center;">Avec <math>S = \frac{1}{Ne} \sum_{n=1}^{Ne} S(t)</math></p>

Tableau 1-1 : Indicateurs temporels.

### 1.5.3.2 Analyse spectrale

C'est une technique ancienne, son principe en vibration est le fait que chaque composante de la machine induit une fréquence caractéristique en fonction de la vitesse de rotation. Chaque défaut possède sa propre composante fréquentielle qui le distingue d'un autre et permet sa détection facilement sur le spectre. Ainsi les signatures fréquentielles des différents défauts qui peuvent se manifester sur une machine tournante ont été définies. [14]

Le signal vibratoire extrait d'une machine tournante est très complexe. La transformée de Fourier est un outil mathématique permettant de transformer ces signaux complexes, de les décomposer en une multitude de composantes élémentaires sinusoïdales et de les représenter sous forme d'un spectre « Amplitudes-fréquence » [15] [16].

Les formules (1) et (2) représentent respectivement la transformée de Fourier.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad (1)$$

### 1.5.3.3 Analyse cepstrale

L'analyse cepstrale est une technique complémentaire d'analyse, développée sur plusieurs variantes, dont les plus utilisées sont le cepstre complexe ; défini comme la transformée de Fourier inverse du logarithme décimal de la transformée de Fourier, s'exprime selon une variable uniforme au temps, et est représentée par la formule. [16]

$$C = TF^{-1}[\ln |X(f)| ]$$

Les unités et les grandeurs sont autres dans le cepstre que ceux utilisés dans l'analyse spectrale, les périodicités qui sont appelées Quéfrances et sont exprimées en secondes ou millisecondes et les harmoniques qui deviennent des Rahmoniques.

## 1.6 Défauts des machines tournantes

Il n'y a pas de bon diagnostic sans une bonne connaissance des défauts. C'est pourquoi, une démarche essentielle de l'action de surveillance, est de rechercher quels sont les incidents les plus fréquemment rencontrés sur les machines tournantes on trouve le balourd, désalignement, défaut de serrage, défauts de roulement, ... Dans ce mémoire on s'intéresse d'étudier les trois premiers défauts.

### 1.6.1 Déséquilibre (défaut de balourd)

Le balourd est un défaut qui se rencontre en présence du déséquilibre de l'arbre d'une machine tournante. Ce phénomène est causé par une mauvaise répartition spatiale des masses dans la structure, entraînant un déplacement du centre de gravité en dehors de l'axe de rotation

de la machine. Le balourd provient généralement de défauts d'usinage, d'assemblage ou de montage. [17]

Différent types de balourd peuvent être identifié :

- a) **Balourd statique** : l'axe d'inertie est parallèle à l'axe de rotation.
- b) **Balourd de couple** : l'axe d'inertie n'est plus colinéaire à l'axe de rotation, les deux axes formant un angle.
- c) **Balourd dynamique** : Il s'agit d'une combinaison des deux premiers et correspond au cas le plus courant. [18]

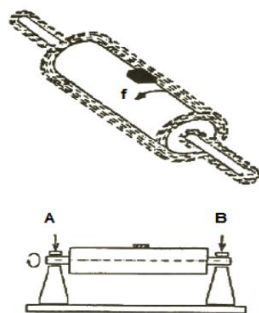


Figure1.7 : Balourd statique.

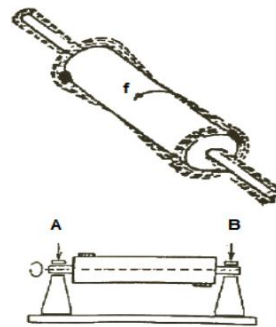


Figure1.8 : Balourd dynamique. [19]

### 1.6.2 Défaut de désalignement

Le défaut d'alignement est l'une des principales causes de réduction de la durée de vie des équipements. [20]

Il concerne soit :

#### a) Deux arbres liés par un accouplement

L'arbre moteur et l'arbre récepteur ne sont pas parfaitement alignés. [21]

Et on distingue :

**-Désalignement angulaire** : Le désalignement angulaire survient lorsque les axes des arbres se croisent (défaut de parallélisme).

**-Désalignement parallèle** : Lorsque les lignes médianes des arbres sont montées parallèle sans se rencontrer, on a un désalignement parallèle (défaut de concentricité).

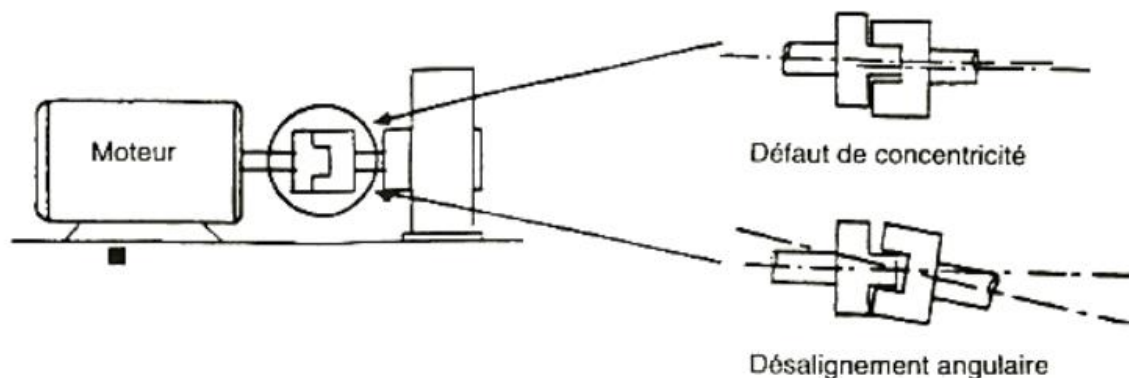


Figure1.9 : Alignement, défaut de concentricité et défaut angulaire. [19]

### b) Deux paliers soutenant le même axe

Les axes des deux paliers d'un même corps de machine ne sont pas concentriques.

Cette anomalie peut être la conséquence d'un défaut de montage d'un palier.

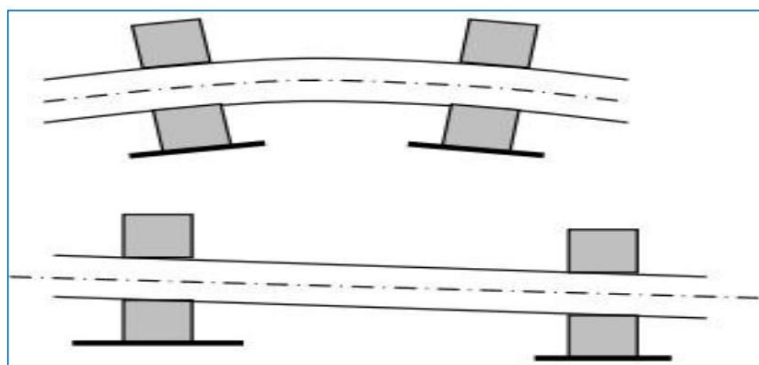


Figure1.10 : Désalignement de paliers se traduisant par une flexion de l'arbre.

### 1.6.3 Défauts de serrages

Lorsqu'un palier est desserré ou présente une possibilité de mouvement partiel dans le plan radial, une vibration se produit sous l'effet du balourd initial et elle peut prendre une amplitude élevée en fonction du degré de desserrage du palier.

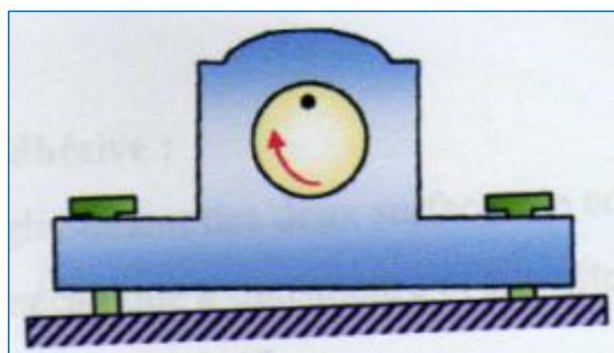


Figure1.11 : Mauvais serrage mécanique. [22]

## **1.7 Prise de décision à l'aide des techniques de l'Intelligence Artificielle**

### **1.7.1 L'intelligence artificielle**

« L'ensemble de théories et de techniques mises en œuvre en vue de réaliser des machines capables de simuler l'intelligence », selon le Larousse. Soit des ordinateurs ou des programmes capables de performances habituellement associées à l'intelligence humaine, et amplifiées par la technologie :

- Capacité de raisonner.
- Capacité de traiter de grandes quantités de données.
- Faculté de discerner des patterns et des modèles indétectables par un humain.
- Aptitude à comprendre et analyser ces modèles.
- Capacités à interagir avec l'homme.
- Faculté d'apprendre progressivement.
- Et d'améliorer continuellement ses performances. [23]

### **1.7.2 Réseaux de neurones artificiels**

Un réseau de neurones artificiel est un réseau fortement connecté de processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit. La conception est très schématiquement inspirée du fonctionnement de neurones biologiques (humains ou animal). Les premiers travaux sur les neurones artificiels ont débuté au début des années 1940 et ont été menés par McCulloch et Pitts qui ont proposé le modèle du neurone formel. [24]

### **1.7.3 Neurone formel**

Conceptuellement, le fonctionnement du neurone biologique peut être représenté par le modèle de la figure I.12. Ce neurone formel peut être considéré comme un opérateur ou élément processeur qui collecte les entrées et fournit une sortie seulement quand la somme dépasse un certain seuil interne.

L'évaluation de la sortie se fait typiquement par la somme pondérée, soustraction du seuil et le passage du résultat à travers un non linéarité. [25]

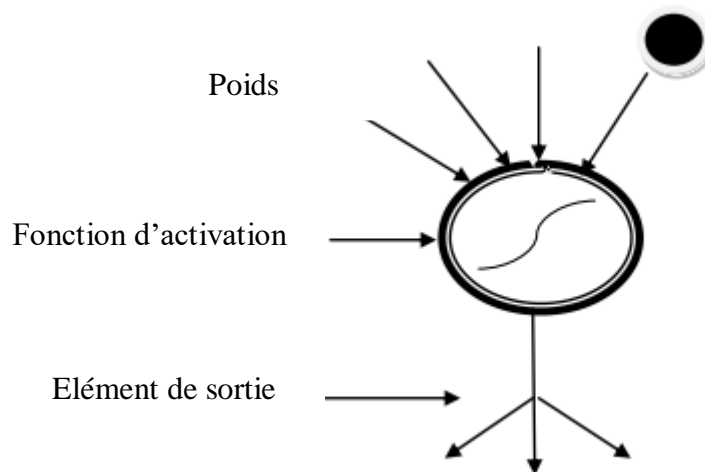


Figure1.12 : Le modèle du neurone formel. [25]

Mathématiquement, ceci peut être modélisé par les équations suivantes :

$$S = \sum_{i=0}^n W_i U_i \quad U = f(S)$$

$n$  : nombre d'entrées.

$U_i$  : composante du vecteur d'entrée.

$W_i$  : composante du vecteur de poids synaptiques.

$S$  : somme pondérée appelée potentiel.

$U$  : la sortie ou réponse du neurone.

$f$  : fonction d'activation.

### 1.7.3.1 Structure d'un réseau neuronale

Un réseau de neurones (RN) est un système informatique qui a des caractéristiques semblables aux réseaux de neurones biologiques. Il est constitué de plusieurs unités élémentaires (neurones formels) organisées sous forme de niveaux différents appelés couches du réseau. Les neurones appartenant à la même couche possèdent les mêmes caractéristiques et utilisent le même type de fonction d'activation. Entre deux couches voisines, les connexions se font par l'intermédiaire de poids qui jouent le rôle des synapses. L'information est portée par la valeur de ses poids. On distingue deux grandes familles de réseau de neurones : les réseaux de neurones non bouclés et les réseaux de neurones bouclés.

### 1.7.3.2 Réseaux de neurones non bouclés

Un réseau de neurones non bouclé est représenté graphiquement par un ensemble de neurones connectés entre eux. La propagation de l'information se fait uniquement de l'entrée vers la sortie sans « retour en arrière ». Les neurones de la même couche peuvent se connecter uniquement avec les neurones de la couche suivante. L'architecture la plus utilisée est le Perceptron multicouches. Les neurones composant ce réseau s'organisent en N couches successives. Dans l'exemple de la Figure I.13, nous présentons un réseau à trois couches. Les neurones de la première couche, nommée couche d'entrée, voient leur activation forcée à la valeur d'entrée. La dernière couche est appelée couche de sortie. Elle regroupe les neurones dont les fonctions d'activation sont généralement de type linéaire. Les couches intermédiaires sont appelées couches cachées. Elles constituent le cœur du réseau. Les fonctions d'activation utilisées sont de type sigmoïde.

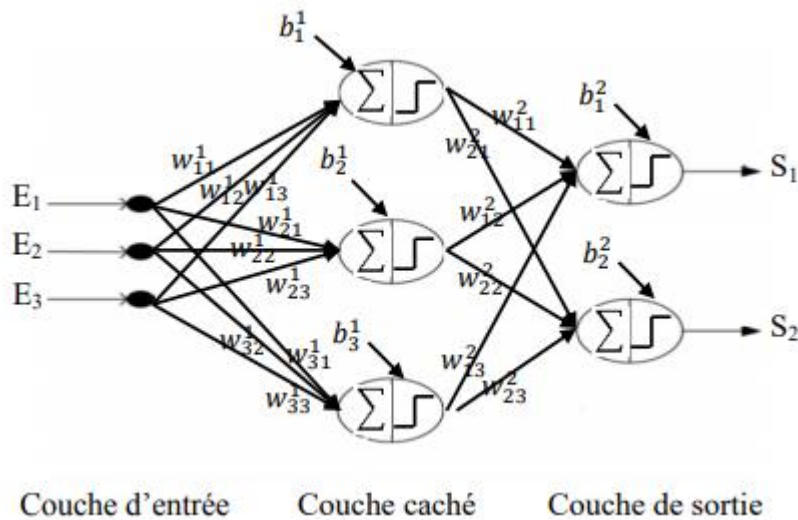


Figure 1.13 : Un réseau de neurones non bouclé.

Sur la figure (1.13), les termes  $b_i^l$  et  $w_{ij}^l$  désignent respectivement le biais du neurone « i » de la couche « l » et le poids de connexion entre le neurone « j » de la couche « l-1 » et le neurone « i » de la couche « l ». Tenant compte de ces notations, la sortie du neurone « i » dans la couche « l » est donnée par la forme suivante :

$$S_i^l = f \left( \sum_{j=1}^{N-1} w_{ij}^l * E_j^l + b_i^l \right) \quad (I.1)$$

Où  $f(\cdot)$  est la fonction d'activation des neurones de la couche « l ».

### 1.7.3.3 Réseaux de neurones bouclés

Un réseau bouclé ou récurrent possède la même structure qu'un réseau multi couches munie de rétroactions. Les connexions rétroactives peuvent exister entre tous les neurones du réseau sans distinction, ou seulement entre certains neurones. La figure (I.14) montre un exemple d'un réseau récurrent multicouche qui utilise un vecteur d'entrée qui contient les copies des activations de la couche de sortie du réseau.

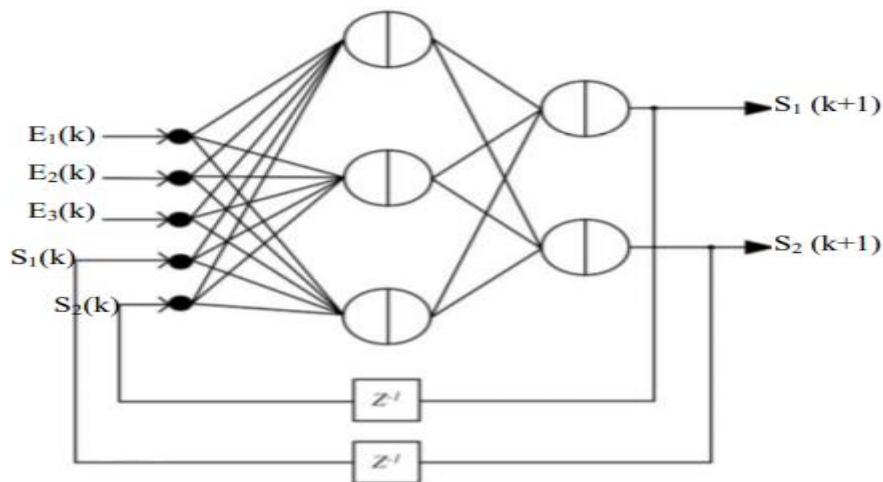


Figure 1.14 : Un réseau de neurones bouclé

### 1.7.4 Apprentissage des réseaux de neurones

L'apprentissage d'un réseau de neurone est un problème d'optimisation qui consiste à trouver les poids synaptiques qui minimisent une certaine fonction de coût (l'erreur). On distingue deux types d'apprentissage :

- **Apprentissage supervisé**

Dans ce type d'apprentissage, un superviseur (ou expert humain) fournit une valeur ou un vecteur de sortie (appelé cible ou sortie désirée), que le réseau de neurones doit associer à un vecteur d'entrée. L'apprentissage consiste dans ce cas à ajuster les paramètres du réseau afin de minimiser l'erreur entre la sortie désirée et la sortie réelle du réseau.

- **Apprentissage non supervisé**

Dans ce type d'apprentissage l'adaptation des coefficients synaptiques n'est pas basée sur la comparaison avec une certaine sortie désirée. Les poids sont modifiés en fonction d'un critère interne. Cette propriété est dite Auto organisation (self organisation). Ce type d'apprentissage est plus rapide et moins complexe en termes de calcul que l'apprentissage supervisé.

### 1.7.5 Logique floue

La logique floue est une extension de la logique booléenne par Lofti Zadeh en 1965 en se basant sur sa théorie mathématique des ensembles flous, qui est une généralisation de la théorie des ensembles classiques. En introduisant la notion de degré dans la vérification d'une condition, permettant ainsi à une condition d'être dans un autre état que vrai ou faux, la logique floue confère une flexibilité très appréciable aux raisonnements qui l'utilisent, ce qui rend possible la prise en compte des imprécisions et des incertitudes. [26]

La logique floue par sa caractéristique principale de simulation du raisonnement humain, elle est classée parmi les techniques de l'intelligence artificielle. Cette technique permet de modéliser, puis de remplacer l'expertise de surveillance et de conduite du processus provenant du concepteur ou de l'utilisateur. La logique floue a contribué dans le développement de plusieurs domaines. En maintenance industrielle, la logique floue est utilisée pour résoudre les problèmes du diagnostic par la classification automatique des signaux vibratoires correspondant aux différents modes de fonctionnement des machines. [27]

### 1.7.6 Neuro-floue

Les systèmes Neuro-Flous permettent de combiner les avantages de deux techniques complémentaires. Les systèmes flous fournissent une bonne représentation des connaissances. L'intégration de réseaux de neurones au sein de ces systèmes améliore leurs performances grâce à la capacité d'apprentissage de réseaux de neurones. Inversement, l'injection des règles floues dans les réseaux de neurones, souvent critiques pour leur manque de lisibilité, clarifie la signification des paramètres du réseau et facilite leur initialisation, ce qui représente un gain de temps de calcul considérable pour leur identification.

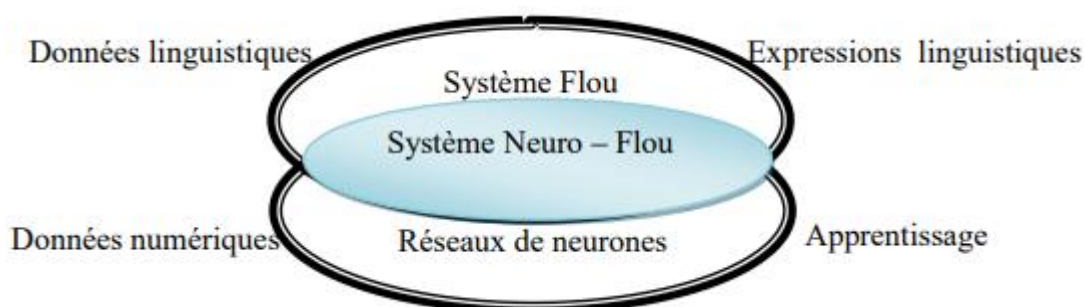


Figure1.15 : Principe du système Neuro - Flou.

### **1.7.7 Extreme Learning Machine**

Extreme Learning Machine (ELM) est une nouvelle technique d'apprentissage, sa structure se compose d'une couche d'entrée, une couche cachée et une couche de sortie, où les poids entre les entrées et les nœuds cachés sont attribués de manière aléatoire et restent constants pendant les phases d'apprentissage. Les poids qui connectent les nœuds cachés aux sorties peuvent être entraînés très rapidement. ELM a été utilisé dans divers domaines et applications en raison de sa meilleure capacité de généralisation, de sa robustesse, de sa contrôlabilité et de son taux d'apprentissage rapide.

### **1.7.8 Les caractéristiques statistiques**

Les caractéristiques statistiques permettent d'avoir une idée d'ensemble sur le comportement du système. Elles servent aussi à comparer plusieurs systèmes. Elles permettent de caractériser le système en évidence de l'information dont la valeur donne une indication importante, pertinente, sur le système étudié. Les résultats sont souvent rassemblés dans un tableau ou apparaissent les valeurs.

## **1.8 Conclusion**

Dans ce chapitre on a donné des définitions et des généralités sur la maintenance avec ses différents types et son but, on a aussi présenté les différents type des anomalies et les techniques d'analyse des machines tournante. Ensuite, on a défini l'analyse vibratoire et ses techniques d'exploitation, et les défauts des machines tournantes et en fin on a conclut ce chapitre par l'intelligence artificielle, les reseaux de neurones et l'ELM.

## **Chapitre 2 : Acquisition de données**

### **2.1 Introduction**

Il est certain que les domaines d'utilisation des ventilateurs sont très large, divers et multiples, ils ont connus, au cours des dernières années, un grand développement dans les différentes applications industrielles.

Parmi les différents types de ventilateur, nous sommes intéressés plus particulièrement au ventilateur de circulation X205, qui est installé au niveau de la zone cru2 au sein de l'entreprise SCHS Hadjar Soud ANNABA.

Pareillement à toutes les installations industrielles et équipements technologiques, notre ventilateur de sujet est exposé à plusieurs pannes et défauts, dont le défaut du balourd, que nous allons analyser dans ce chapitre.

### **2.2 Équipement à étudier : ventilateur de circulation X205**

Notre étude est effectuée sur le ventilateur de circulation X205. Son principe de fonctionnement consiste à aspirer les gaz chauds venus du four à travers les cyclones et de refouler un mélange matière-gaz chauds dans le corps du séparateur dans un circuit fermé. Il est situé au niveau de la zone cru2 de la cimenterie (Figure 2.1).



Figure 2.1: Ventilateur de circulation X205 [28]

### 2.1.1 Caractéristiques techniques du ventilateur

Marque	NAKASHIMA
Type	NV-I.C. D 11 ½
Nombre des pales	16
Poussière	0.895 g /m <sup>3</sup>
Vitesse de rotation	980 tr/mn
Température du gaz	120 degrés
Roulement	REF.22226 C3
Puissance moteur	340 KW

Tableau 2-1: Fiche technique de l'équipement [28]

### 2.1.2 Description de la chaîne de ventilation

La chaîne de ventilation est constitué de :

- Un moteur asynchrone.
- Un accouplement à élastomère OMEGA 100.
- Une turbine à palettes montée sur un arbre avec 2 paliers, équipé de deux roulements à rouleaux cylindriques.

La transmission du mouvement, réalisé par le moteur, est effectuée par accouplement à l'aide d'un arbre soutenu par deux paliers à roulements permettant à la turbine de générer le courant d'air circulaire dans le séparateur dynamique.

La génération du courant d'air est effectuée principalement à l'aide de la turbine, par la force centrifuge. Ladite turbine est constituée d'une roue fermée avec un moyeu auquel cette roue est fixée.

L'arbre a pour but de livrer le mouvement rotatif à partir d'un accouplement situé sur son extrémité vers la roue, tout en supportant en fonctionnement la charge de cette roue, en s'appuyant à son tour sur deux (02) paliers.

Les paliers sont destinés à tenir les roulements à double rangée de rouleaux cylindriques. Ils sont lubrifiés par huile et refroidis par eau, et contiennent des joints

d'étanchéité pour limiter les fuites d'huile et le préserver des impuretés. L'un d'eux, est un palier de guidage, est installé auprès du moteur. L'autre est mobile.

## 2.3 Acquisition des signaux

### 2.3.1 Points de mesure

L'objectif de cette mesure est de transformer, la grandeur physique que l'on souhaite savoir, à un signal électrique compréhensible par le système d'acquisition.

Les mesures sont effectuées au niveau des quatre (04) paliers du ventilateur X205, comme la montre la figure 2.2. Les capteurs servent pour mesurer les vibrations selon trois directions pour le même point de mesure : radiale, horizontale et axiale. A cet effet, douze points de mesures ont été constitué : deux pour le moteur et deux pour le ventilateur, dans les directions horizontale, verticale, axiale.

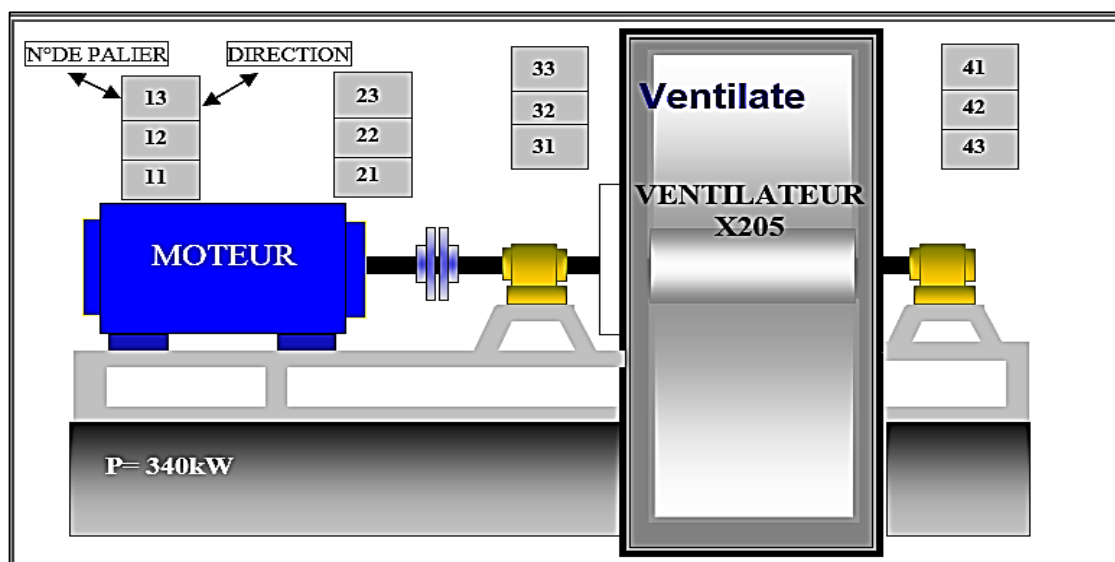


Figure 2.3: Schéma synoptique de la chaîne de ventilateur [28]

### 2.3.2 Système d'acquisition

Le diagnostic est effectué sur toute la chaîne de ventilateur telle que :

Le matériel utilisé est :

- Le capteur triaxial sans fil FALCON WLS.
- Le collecteur analyseur FALCON.
- Logiciel d'analyse vibratoire OneProd XPR300.



Figure 2.3 : Matériel utilisé pour le diagnostic de la chaîne de ventilation.

Selon les étapes suivantes :

- Collecte des informations techniques sur l'équipement.
- Configuration des points de mesure.
- Collecte des mesures.
- Analyse et interprétation des données.

## 2.4 Traitement et analyse des signaux

### 2.4.1 Défaut de balourd

Après la réalisation des mesures par l'accéléromètre, une série de prétraitement sera effectuée : l'analyse en niveau global et l'analyse spectrale.

#### 2.4.1.1 Analyse de niveau global

Palier	3AX	3RH	3RV	4AX	4RH	4RV
NG Accélération (g)	0.157	0.249	0.234	0.875	1.52	1.52
NG Vitesse (mm/s)	1.81	8.09	3.89	3.17	7.22	2.87

Tableau 2-3: Présentation des résultats des mesures effectués [28]

Niveaux vibratoires admissibles (mm/s en RMS)	Groupe 1		Groupe 2		Groupe 3		Groupe 4	
Amplitude efficace de la vitesse vibratoire (mm/s) [10 ; 1000] Hz	28 -		Mauvais		Mauvais		Mauvais	
	18 -		Mauvais		Mauvais		Mauvais	18.0
	11.2 -		Mauvais		Mauvais	11.2	Limite	
	7.1 -		Mauvais	7.1	Limite		Limite	7.1
	4.5 -	4.5	Limite		Limite	4.5	Moyen	
	2.8 -		Limite	2.8	Moyen		Moyen	2.8
	1.8 -	1.8	Moyen		Moyen	1.8	Bon	
	1.12 -		Moyen	1.12	Bon		Bon	
	0.71 -	0.71	Bon		Bon		Bon	
	0.45 -		Bon		Bon		Bon	

Tableau 4-3 : Niveaux vibratoires admissibles sur les machines tournantes (ISO 2372) [28]

On déduit à partir des tableaux ci-dessus que :

- Accroissement des niveaux vibratoires globaux marqués sur les paliers de la turbine en horizontal, la valeur maximale sur le 3eme palier est 8,09 mm /s, la valeur maximale sur le 4eme palier est 7,22 mm /s.
- Notre turbine de ventilation est placée parmi les machines de groupe **03**, on a donc, d'après le tableau 5-6, le seuil limite de la vitesse efficace est **11.2 (mm/s)**.

### 2.4.1.2 Analyse spectral

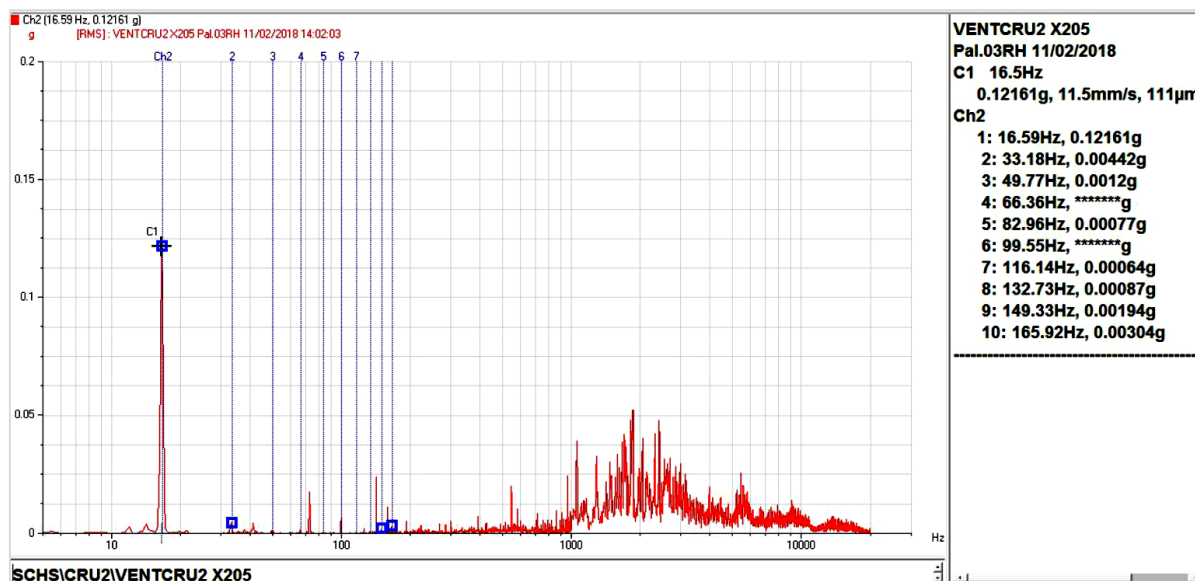


Figure 7.4: Le spectre relevé sur le palier 3[28]

En observant le spectre d'amplitude sur la plage fréquentielle [0-10000Hz] du signal délivré par l'accéléromètre fixé sur le palier 03 du ventilateur, présenté sur la figure 8.4, on voit précisément le premier pic qui dépasse le seuil de danger avec une fréquence et amplitude importante de (16.33Hz ; 0.12161 g). Ceci s'explique par l'apparition d'un balourd.

## **2.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, Nous avons appliqué les techniques de l'analyse vibratoire notamment l'analyse globale et l'analyse spectrale pour le diagnostic du ventilateur X205. Cette méthode a permis, d'abord, la détection du défaut à l'aide des indicateurs statistiques où on a marqué des perturbations de vitesses ou niveau des paliers 3 et 4, ensuite, le passage au domaine fréquentiel a permis le diagnostic du défaut où on a identifié l'apparition d'un balourd.

## Chapitre 3 : Modélisation et simulation de la chaîne de ventilateur sur SolidWorks

### 3.1 Introduction

Le but de notre travail est de faire l'étude du ventilateur de circulation X205 situé au niveau de la zone cru2 de la cimenterie de Hadjar Soud (SCHS). A cet effet ce chapitre sera consacré à la conception des différentes pièces de ventilateur à partir de dessin de définition qui nous est fourni par l'entreprise avant de passer à l'assemblage de ces derniers et la présentation des signaux obtenus à partir de simulations.

La conception mécanique de ces pièces se fera par des outils informatiques de CAO dans ce cas on va utiliser SolidWorks 2016 et on va donner les étapes de modélisation des pièces.

Avant de passer à la conception de ces pièces on va d'abord présenter un rappel sur la conception assistée par ordinateur, Le logiciel de CAO SolidWorks et la simulation numérique.

### 3.2 La conception assistée par ordinateur

#### 3.2.1 Définition

La conception assistée par ordinateur ou CAO (en anglais, computer aided design ou CAD) comprend l'ensemble des logiciels et des techniques de modélisation géométrique permettant de concevoir, de tester virtuellement – à l'aide d'un ordinateur et des techniques de simulation numérique- et de réalités des produits manufacturés et les outils pour les fabriquer.

La CAO n'a pas pour fonction première l'édition du dessin. Il s'agit d'un outil informatique souvent lié à un métier, fonctionnant en langage dit objet, et permettant l'organisation virtuelle de fonctions techniques. Cela permet ensuite la simulation de comportement de l'objet conçu.

#### 3.2.2 Choix de l'outil informatique de CAO

Pour la modélisation géométrique (conception assistée par ordinateur) d'une partie de la chaîne de ventilateur (deux paliers à roulements, un arbre et une turbine) on va utiliser le logiciel de CAO SolidWorks 2016 grâce à sa disponibilité et les connaissances obtenues durant notre formation.

#### 3.2.3 Présentation du logiciel de CAO SolidWorks



Figure 3.1: Logo SolidWorks

SolidWorks est un logiciel de conception mécanique 3D, qui permet d'atteindre rapidement une modélisation d'objet, d'assemblage de pièces, ou un plan du mécanisme. Cet outil est souvent utilisé par des entreprises dont les secteurs d'activité sont l'industrie, la médecine, les transports, le bâtiment etc.

Il existe trois types de fichiers SolidWorks. Ces fichiers sont en relation. Toute modification à quelque niveau que ce soit est répercutée vers tous les fichiers concernés :



Figure 3.2 : Créer ou ouvrir un document.

- La pièce : La pièce se réalise à partir d'un dessin 2D sur un plan, obtenue à l'aide des différents outils. Après la réalisation de l'esquisse, SolidWorks permet de exécuter différentes fonctions.
- L'assemblage : Une fois les pièces sont réalisées, on peut les assembler par un ensemble de contraintes d'assemblage, avec une relation géométrique (coïncidence, tangence, coaxialité...), pour former un objet. Ces contraintes définissent la position des pièces dans l'ensemble et les liaisons entre elles.
- La mise en plan : Ce type de fichier permet d'obtenir les vues souhaitées, avec les cotations et un fond de plan afin de mieux représenter la pièce sur le plan.

### 3.2.4 Simulation numérique : SolidWorks Motion

La simulation numérique est un outil qui permet d'examiner les résultats d'une action sur un objet sans faire l'expérience sur l'objet réel, et de modifier les paramètres physiques, dans les limites du logiciel. Aussi la simulation numérique permet de diminuer le nombre d'essai nécessaire. Elle permet aussi parfois de faire des expériences qui seraient trop coûteuse, dangereuses, ou encore impossible de réaliser.

SolidWorks motion est un module complémentaire intégré à SolidWorks qui permet d'animer et capturer le mouvement d'assemblages SolidWorks. Il permet aussi de détecter certains phénomènes indésirables.

Après la création de l'animation, SolidWorks Motion permet d'enregistrer l'animation comme un fichier pour être ensuite jouée séparément du logiciel SolidWorks.

### 3.3 Modélisation de différentes pièces du ventilateur X205

A partir des dessins de définition fournis par l'entreprise de production industrielle de ciment SCHS, nous avons modélisé des différentes parties de la chaîne de ventilateur et c'est ce que montrent les figures ci-dessous.

#### 3.2.2 Modélisation de l'arbre : La transition du dessin de définition à le model 3D

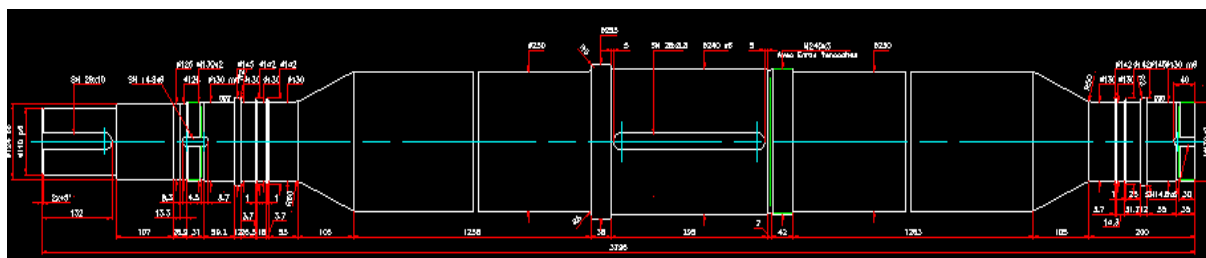


Figure 3.3 : Le dessin de définition de l'arbre de ventilateur X205.

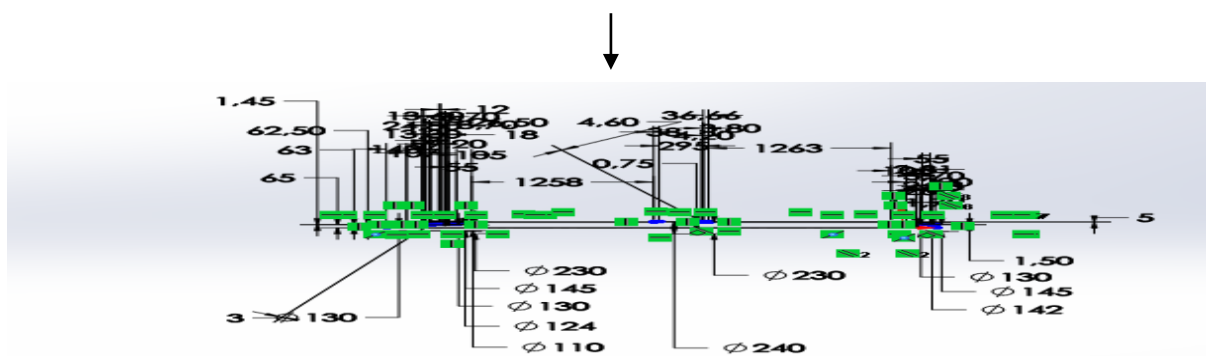


Figure 3.4 : Esquisse de l'arbre dessinée dans SolidWorks.

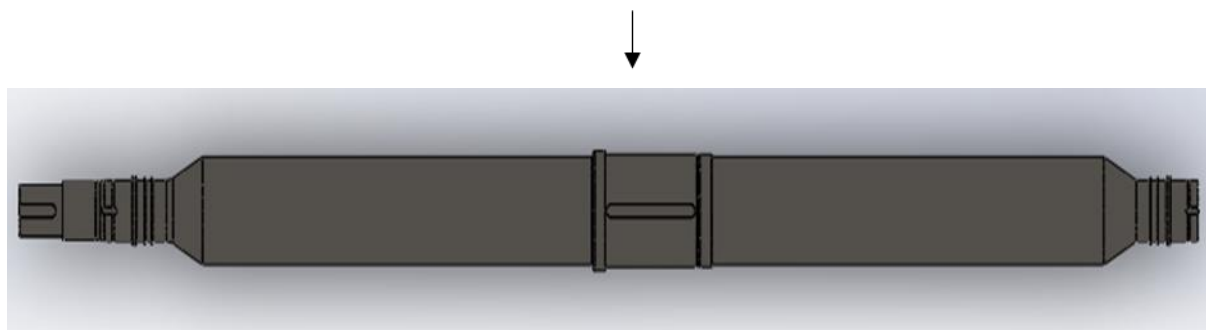


Figure 3.5 : Le model 3D de l'arbre.



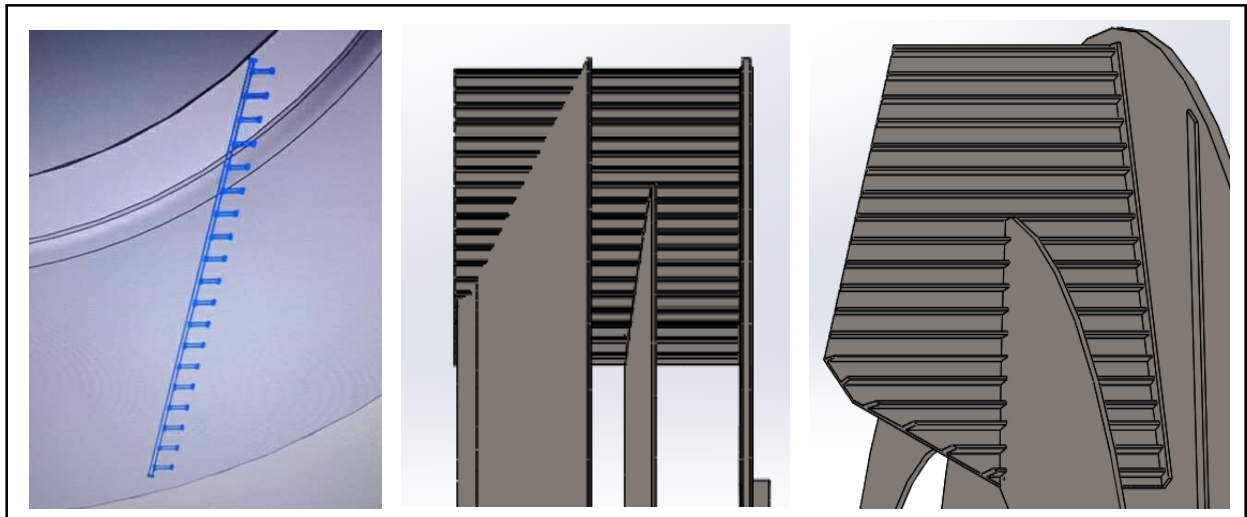


Figure 3.8 : La modélisation des ailettes de turbine de ventilateur X205.

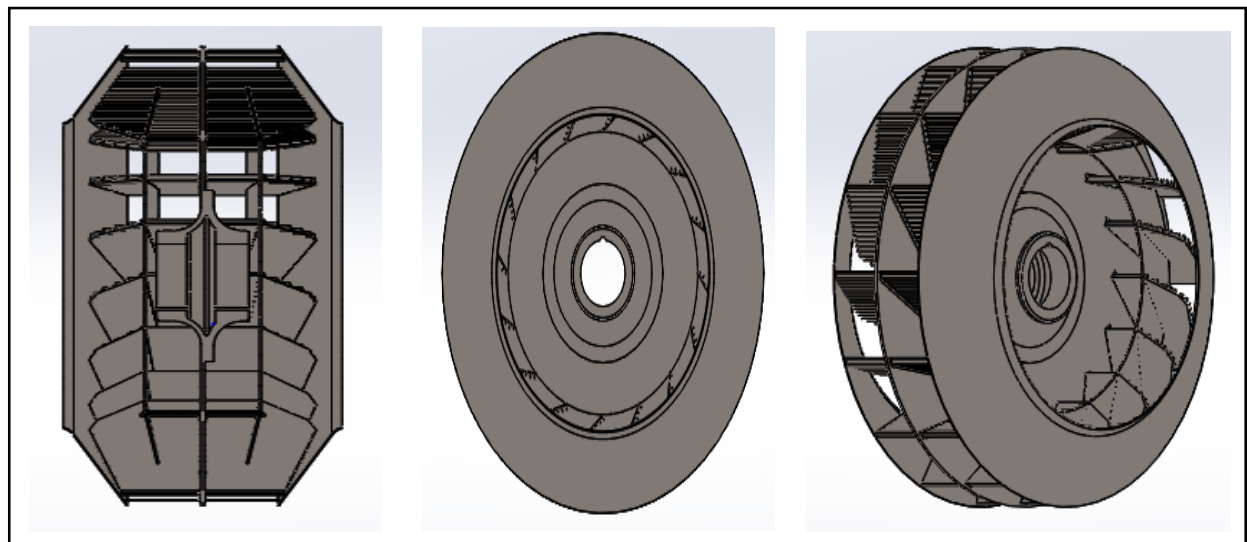


Figure 3.9 : Différents vues de turbine de ventilateur X205 en 3D.

### 3.3.3 Modélisation des paliers

Un palier est composé de :

- Une partie supérieure.
- Une partie inférieure.
- Un roulement standard de référence 22226 C3 est téléchargé depuis le site du fabricant SKF
- Des jointes d'étanchéité (labyrinthes).
- Des boulons et bouchons.

#### a. Palier fixe

a.1. Partie inférieure du palier fixe

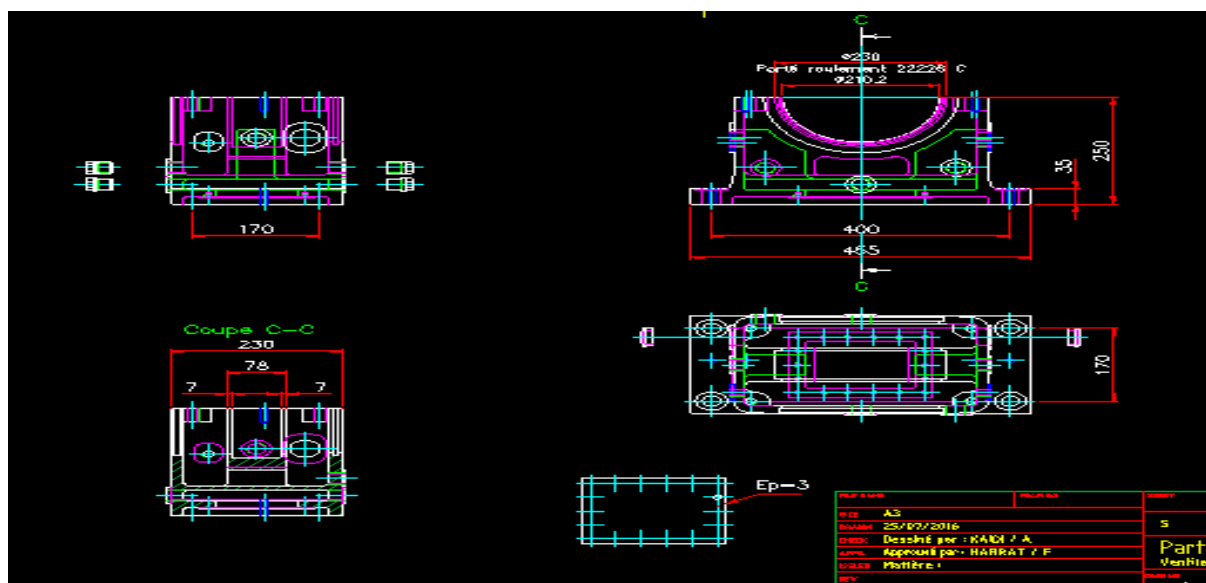


Figure 3.10 : Le dessin de définition de partie inférieure du palier fixe de ventilateur X205.

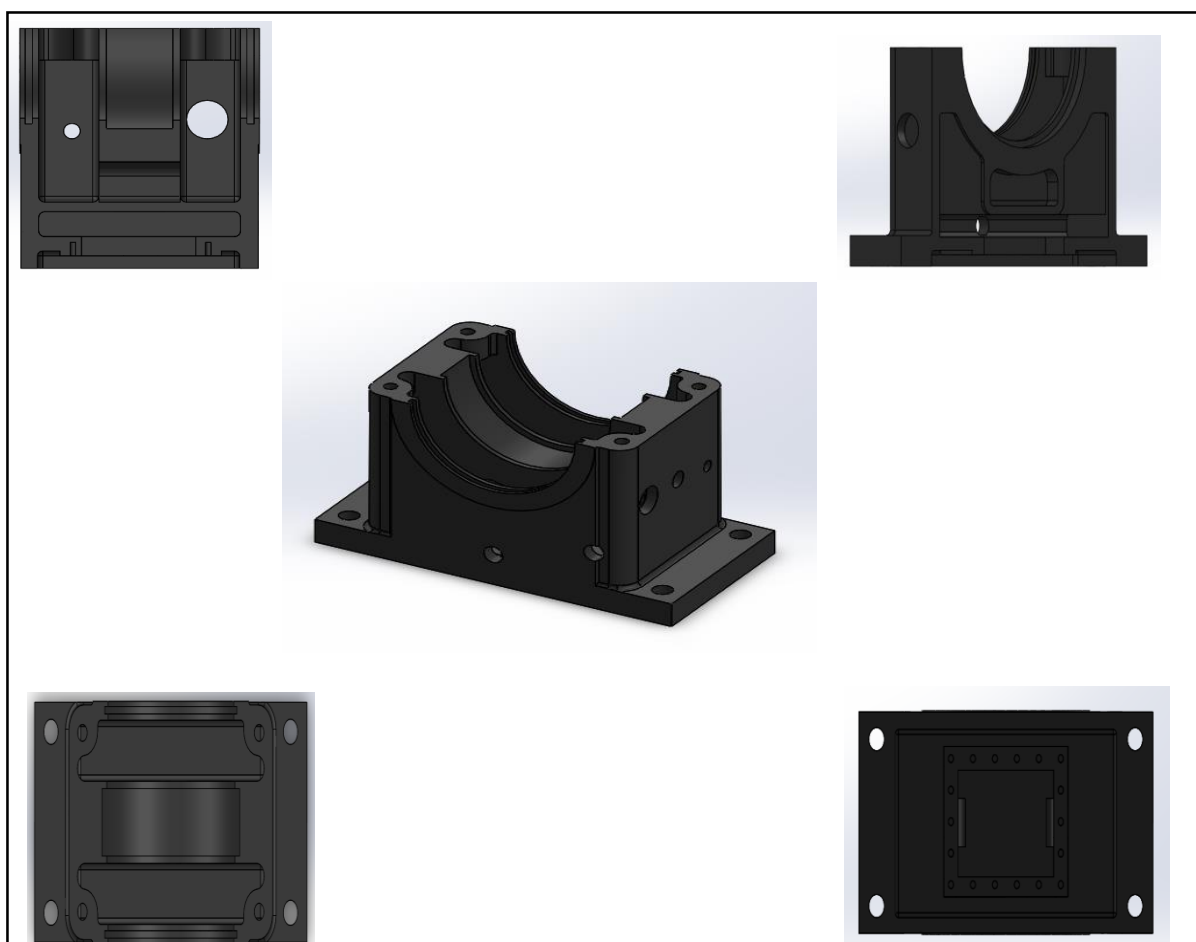


Figure 3.11 : Différents vues de la partie inférieure du palier fixe de ventilateur X205 en 3D.

a.2. Partie supérieure du palier fixe

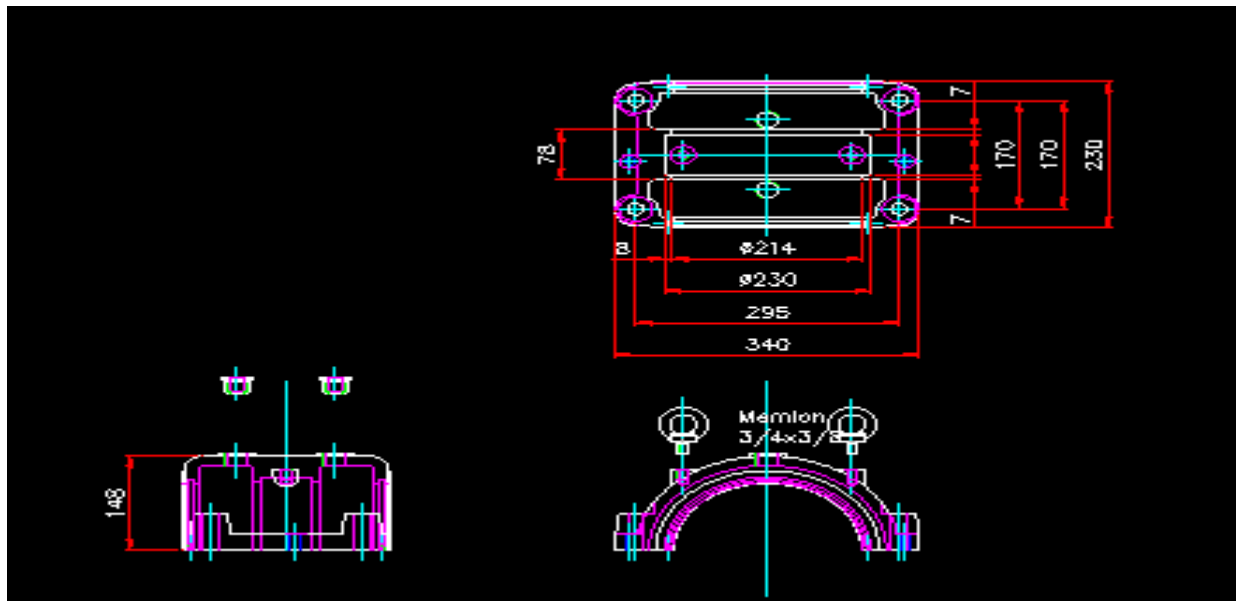


Figure 3.12 : Le dessin de définition de partie supérieure du palier fixe de ventilateur X205.

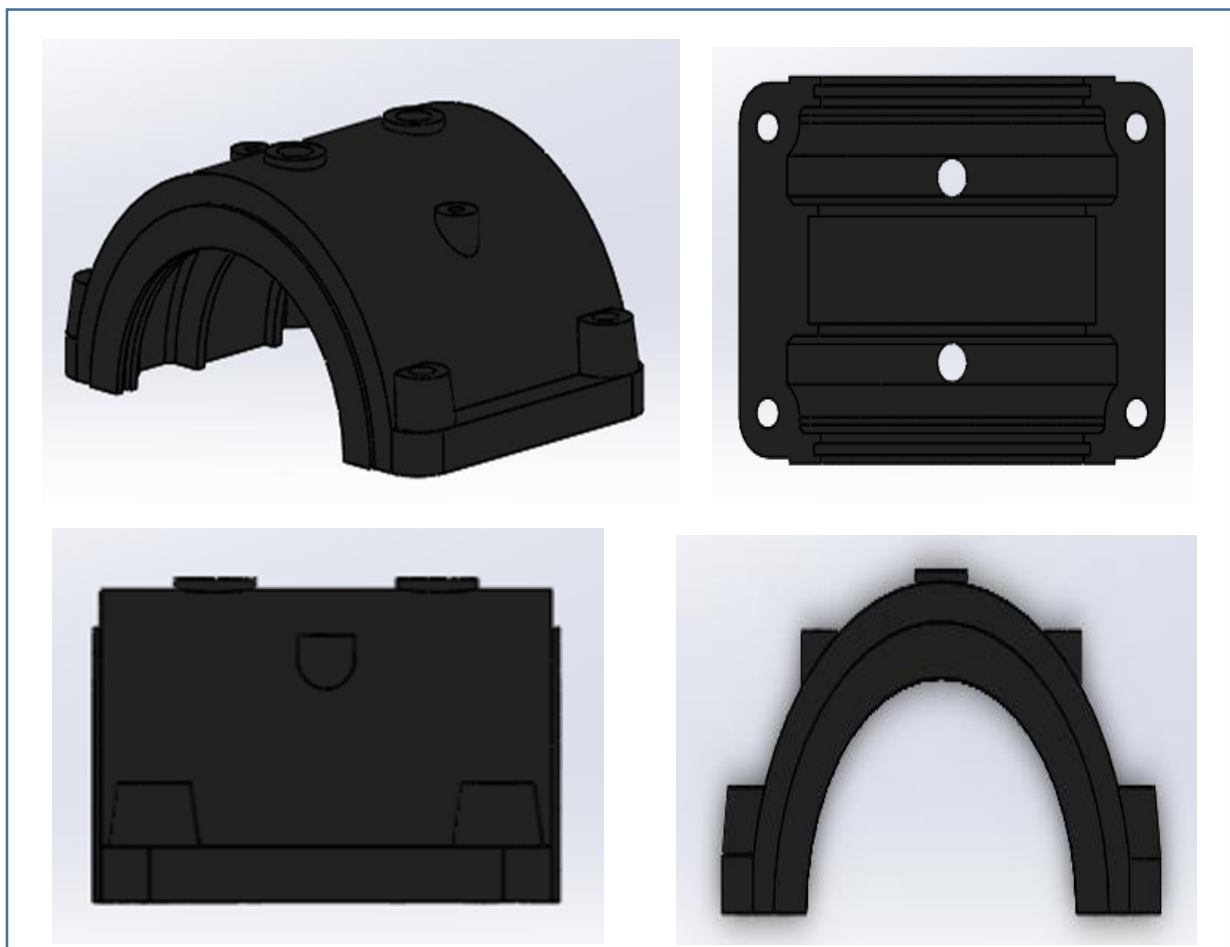


Figure 3.13 : Différents vues de la partie supérieure du palier fixe de ventilateur X205 en 3D.

### a.3. Assemblage des parties du palier fixe

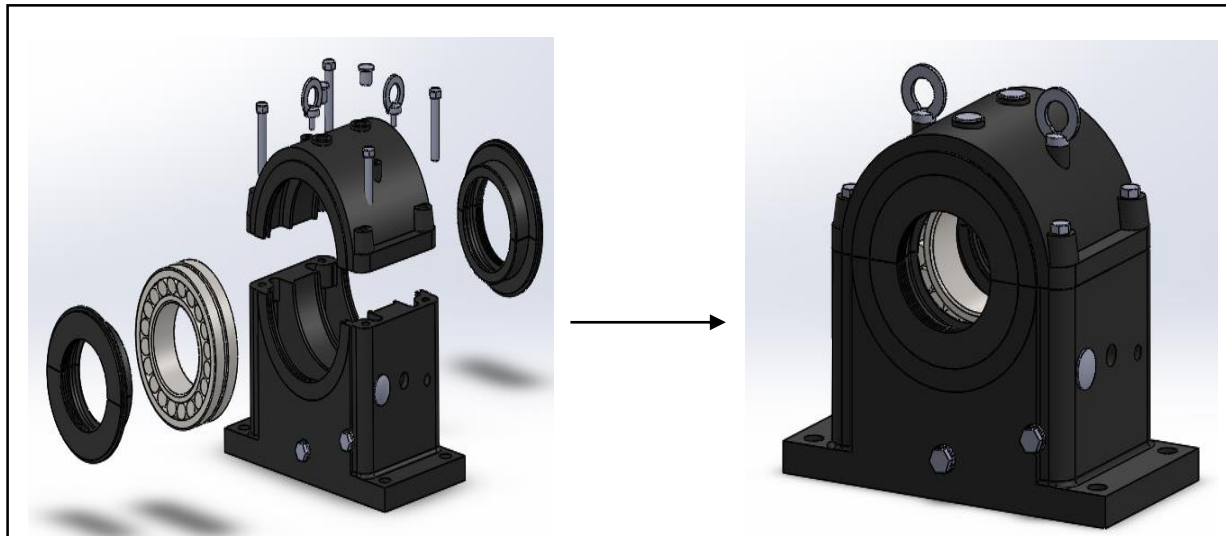


Figure 3.14 : Assemblage des parties du palier fixe.

### b. Palier libre :

Contrairement au palier fixe Le palier mobile ne contient pas d'épaulements qui bloquent les roulements dans le sens de la translation axiale c'est à dire le roulement reste libre à l'intérieure de ce palier.

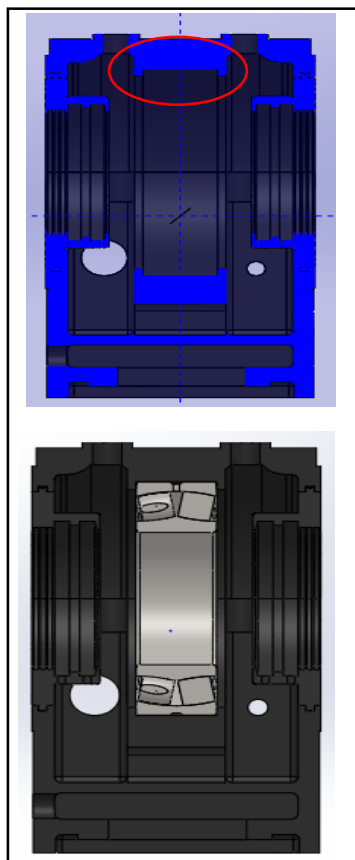


Figure 3.15 : Vue de coupe du palier fixe.

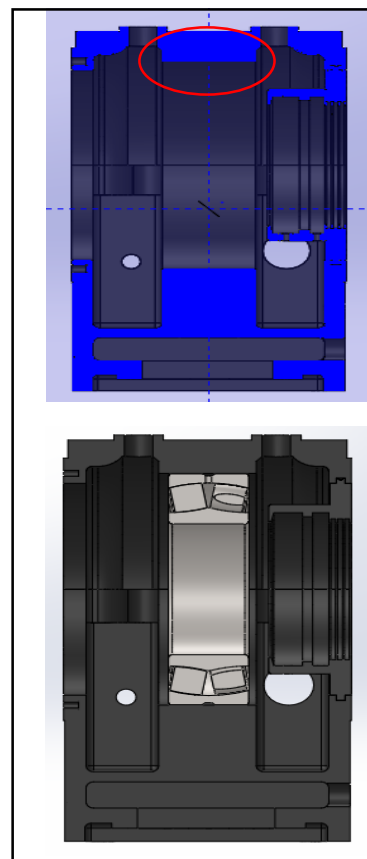


Figure 3.16 : Vue de coupe du palier libre.

### 3.4 Assemblage des composants de ventilateur

On importe tous les composants de ventilateur dans une seule zone d'assemblage et en les assemblés à l'aide des contraintes

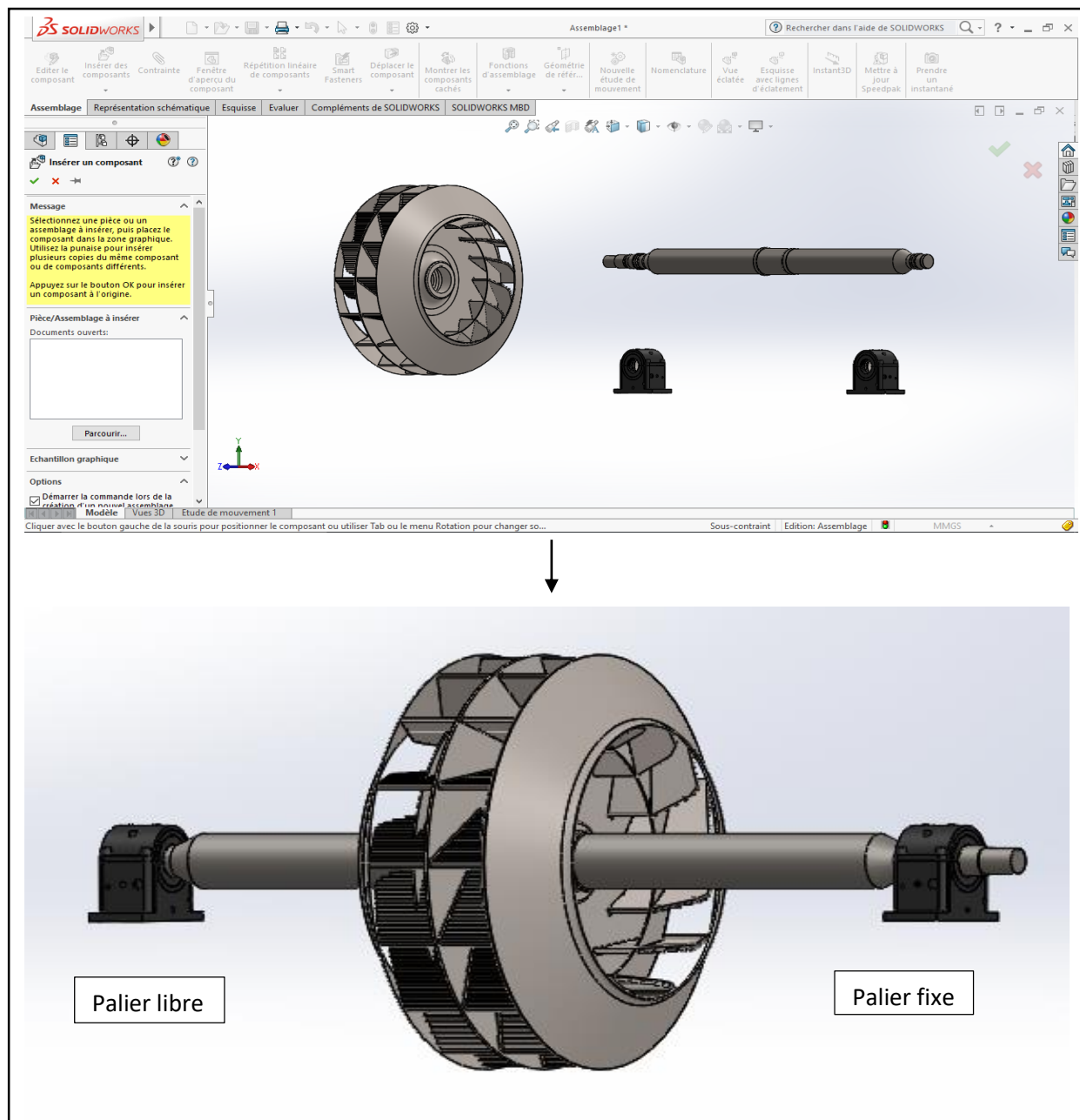


Figure 3.17 : Assemblage des composants de ventilateur X205.

### 3.5 Les étapes de simulation

Nous avons suivie les étapes suivantes pour faire la simulation des trois défauts : défaut de balourd, défaut de serrage et le défaut d'accouplement.

- 1- On Active le complément **SolidWorks Motion** et dans type du mouvement on met « **Analyse du mouvement** ».

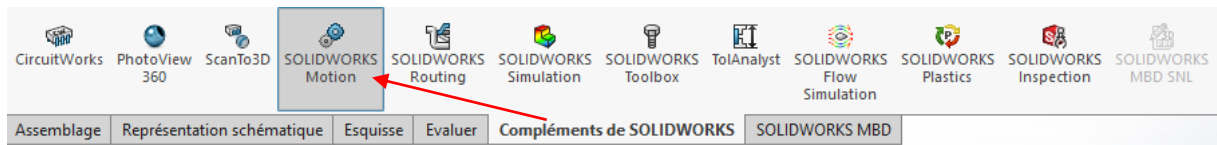


Figure 3.18 : Le choix du complément SolidWorks Motion.

2- On va à Gravité : on choisit la direction « Y »



Figure 3.19 : Le choix de la direction « Y » pour la Gravité.

3- Moteur :

- Pour affecter le mouvement à la turbine, nous allons appliquer un **moteur circulaire** sur l'arbre du côté de l'accouplement et du palier fixe comme montré dans la figure 3.19.

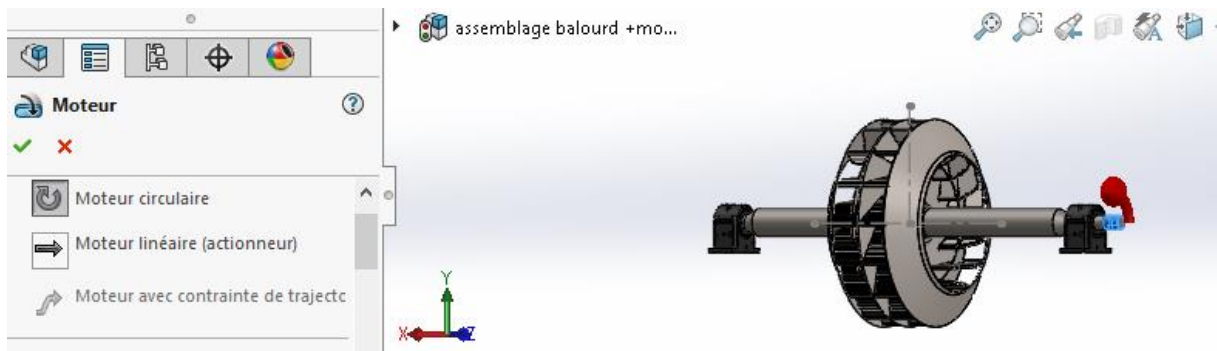


Figure 3.20 : Application du moteur circulaire.

- Dans mouvement on choisit « segments » Ensuite, on remplit le tableau à gauche comme suit :

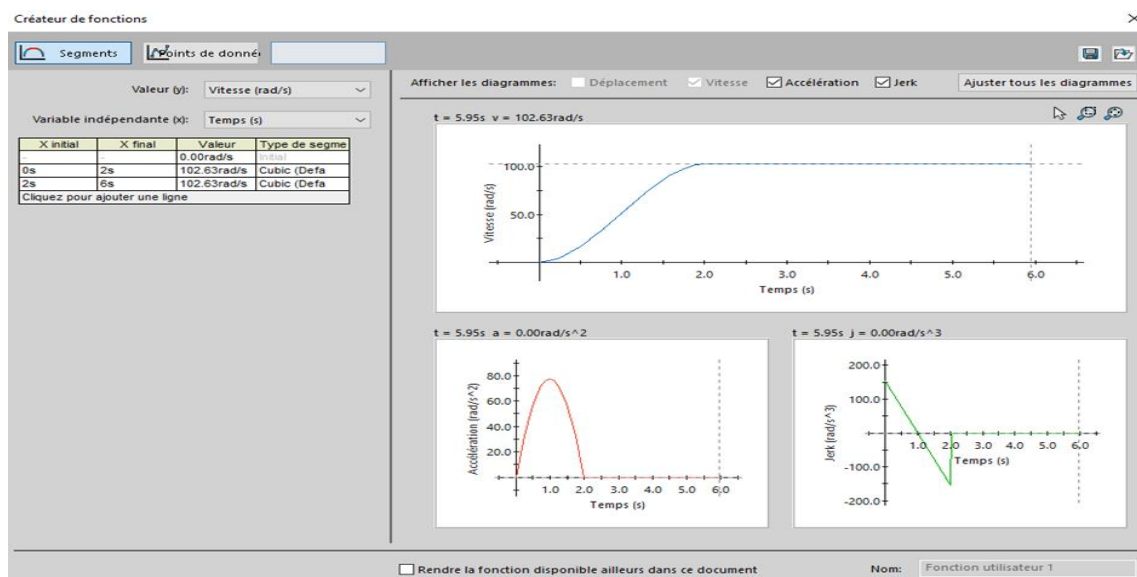


Figure 3.21 : La détermination de la valeur de vitesse et la durée de simulation.

- La vitesse de rotation égale à 102.63 rad/s l'équivalent de 980 tr/min à la deuxième seconde et la durée totale de simulation du mouvement est 6 s, dont nous n'avons besoin pour l'analyse vibratoire que de quatre (04) secondes pendant lesquelles la vitesse de rotation est constante, ce qui correspond à un fonctionnement normal de la turbine. Cette période d'échantillonnage est estimée suffisante pour l'analyse vibratoire dans les conditions dynamiques de notre modèle numérique, car ce dernier ne contient pas des perturbations parasites comme pour le cas réel et qui nécessite un temps d'échantillonnage plus important.

#### 4-Conditions de contact :

Nous introduisant les conditions de contacts prédéfinis sur SolidWorks motion pour le contact lubrifié des composants des roulements (Bague extérieure, Bague intérieure et les rouleaux) (Figure 3.17).

- On coche « groupe de contact ».
- Dans le rectangle bleu on sélectionne la bague intérieure et la bague extérieure du roulement.
- Dans le rectangle rose on sélectionne les rouleaux.

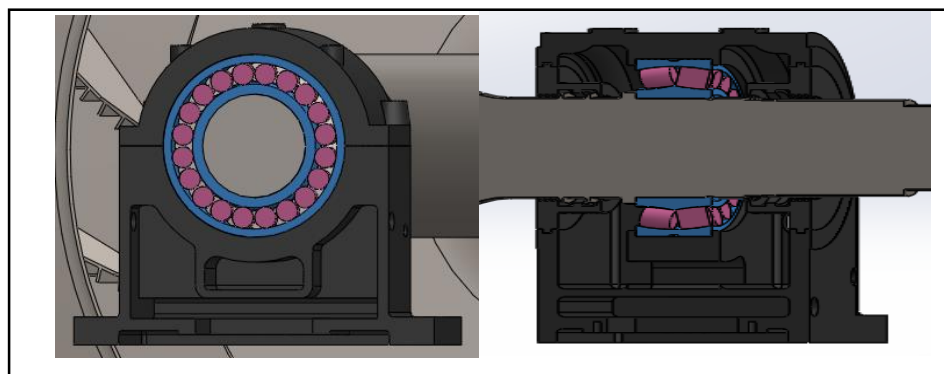


Figure 3.22 : Vue de coupe des composants en contact.

- Ensuite on choisit pour le matériau « steel (greasy) ».

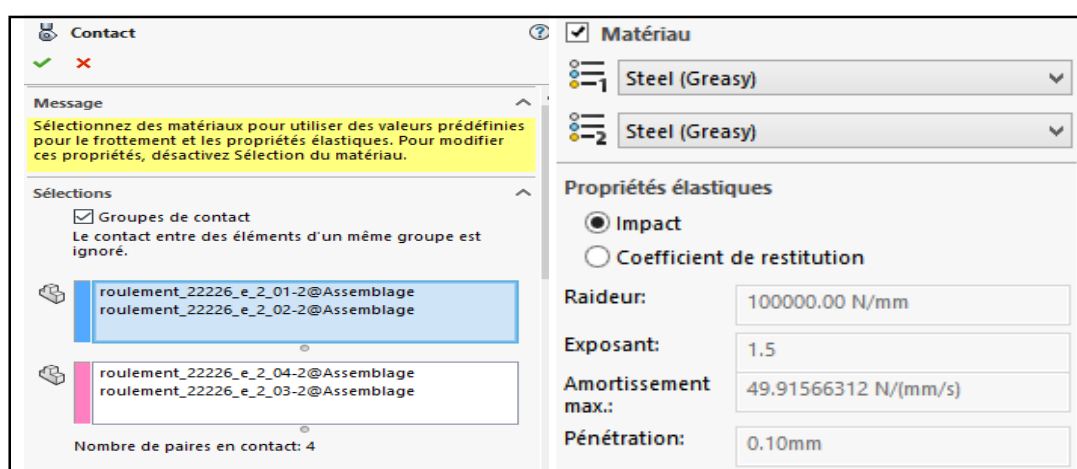


Figure 3.23 : Paramètres des conditions de contact.

On fait ceci pour les deux paliers.

## 5- Résultats :

Nous avons prélevé pour chaque défaut le signal temporel de l'accélération linéaire extrait du palier 3 dans la direction horizontale. Une fois l'acquisition terminée, les signaux sont importés dans MATLAB. Pour pouvoir effectuer leur transformé de fourrier et pouvoir être comparés aux signaux expérimentaux.

## 3.6 Modélisation des défauts et discussion des résultats de simulation

### 3.6.1 Le défaut de balourd

#### a. Modélisation de Balourd

Un balourd est un déséquilibre massique autour de l'axe de rotation qui provient généralement du défaut de conception, défaut de fabrication ou défaut de montage. Dans le cas du ventilateur ce phénomène est présent dans la roue centrifuge à cause de la poussière ou la farine humide et superposé de façon non homogène sur les pales de la roue.

Pour modéliser simplement le balourd, nous avons fait plusieurs barres de poussières selon les étapes suivantes :

- Sur une pale de la roue nous avons réalisé plusieurs rectangles (Figure 3.24) qui représentent les encoches qui se trouvent entre les petites ailettes à l'aide de la fonction ' **base bossage extrudé** (Figure 3.25), ensuite nous avons fait un **enlèvement de matière** pour obtenir la forme de l'ailette (Figure 3.26).

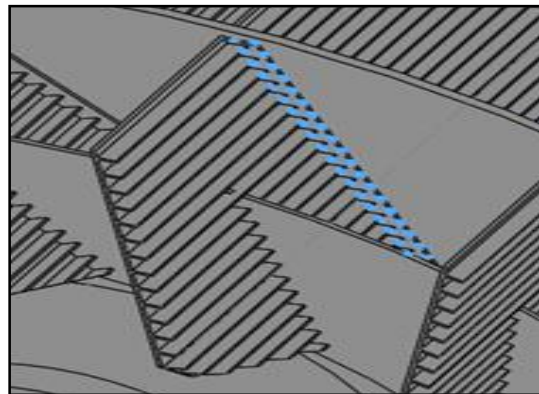


Figure 3.24 : Esquisse des barres de poussière.

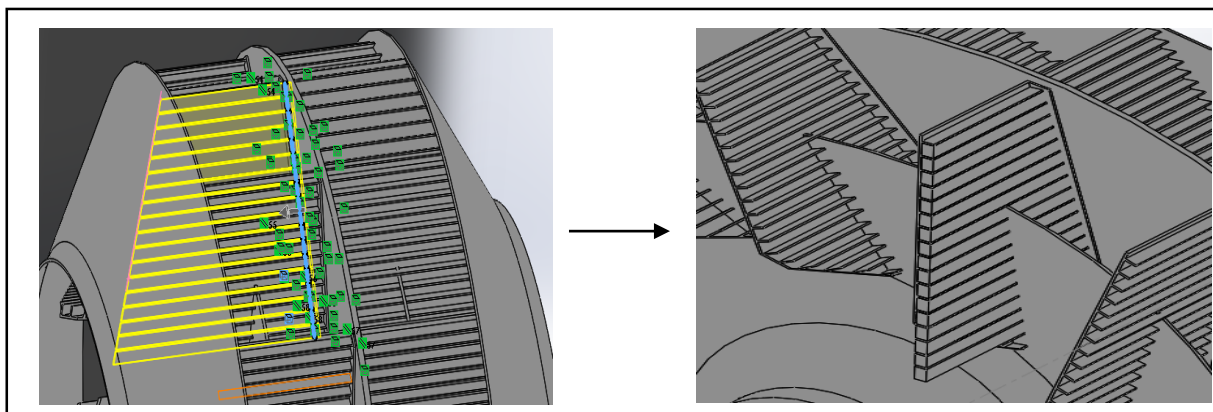


Figure 3.25 : Bossage extrudé des barres.

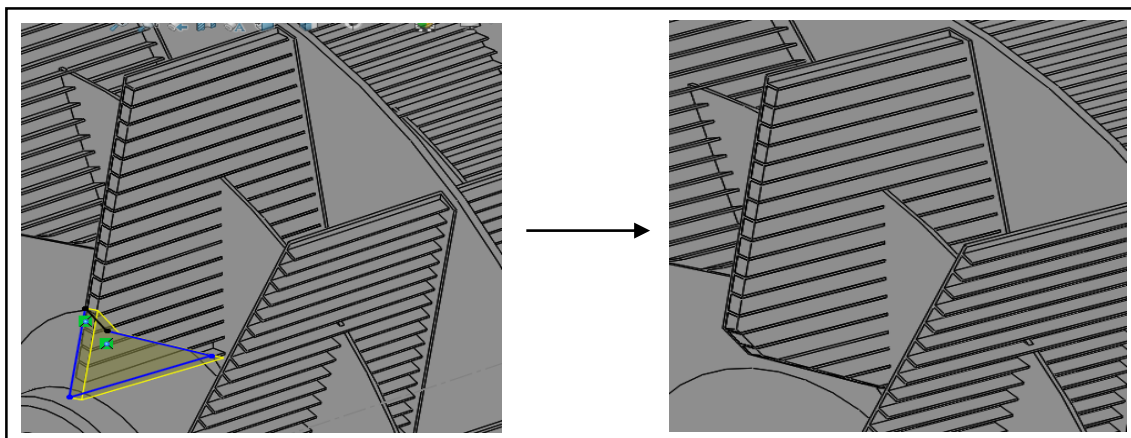


Figure 3.26 : Enlèvement de matière.

- Par la suite, nous avons fait une **symétrie** pour l'ensemble des barres, puis la **répétition circulaire** de tous les corps, à cette étape, nous avons obtenu des barres de poussière sur tout le corps de l'hélice (Figure 3.27)

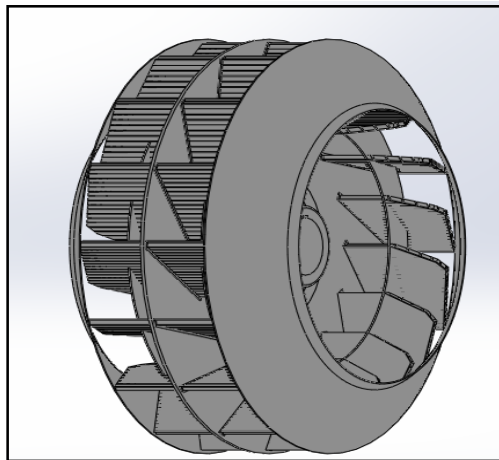


Figure 3.27 : Barres de poussière en 3D sur tout l'ensemble des pales.

- Après cela, nous avons supprimé le corps de l'hélice et certaines barres de poussières de manière que les barres restantes créent un déséquilibre massique dans l'hélice représenté par le balourd. La dernière étape est l'assemblage de la poussière avec l'hélice, ceci est réalisé facilement à l'aide des contraintes '**coïncidence**' et '**coaxiale**' existantes déjà dans le fichier assemblage. La figure ci-dessous montre la répartition de la poussière sur la roue du ventilateur.

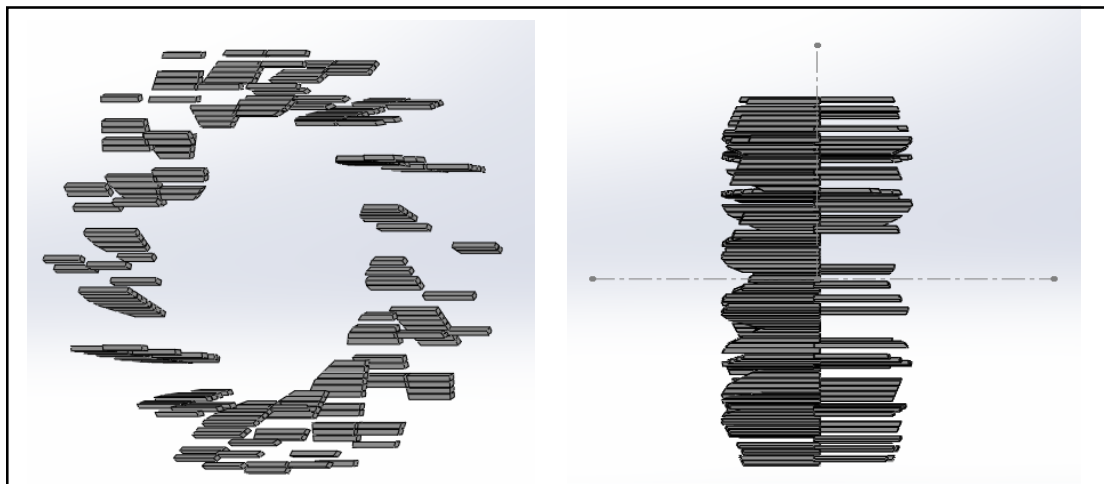


Figure 3.28 : Les barres de poussière qui généreront le déséquilibre.

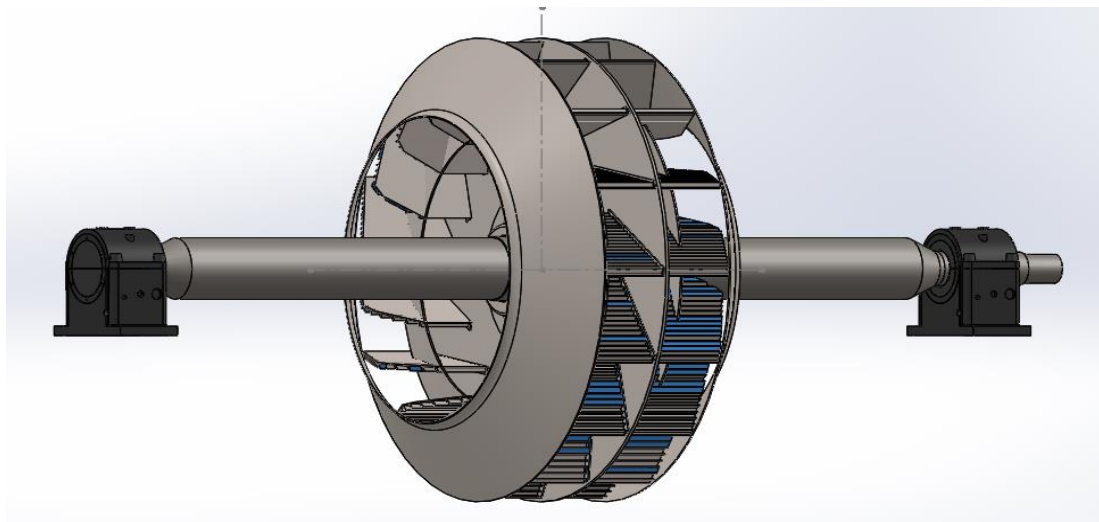


Figure 3.29 : Répartition de la poussière sur la turbine.

### b. Résultats de simulation

Puisque le niveau global n'accède pas de faire un diagnostic des défauts direct, donc il faut passer à l'analyse spectrale pour identifier les défauts dans la bande de fréquence [0 - 200Hz].

Le tracé ci-dessous montre le spectre de simulation du défaut de balourd et la figure 3.24 montre les spectres superposés du défaut de balourd des deux modèles expérimental et numérique.

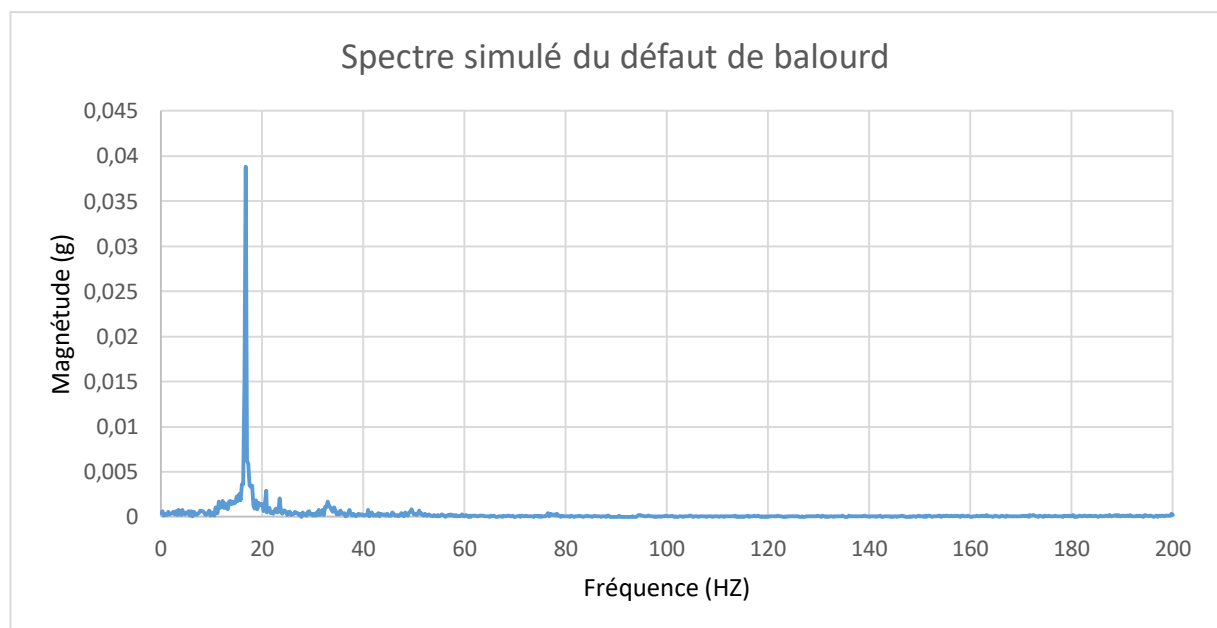


Figure 3.30 : Spectre simulé du défaut de balourd.

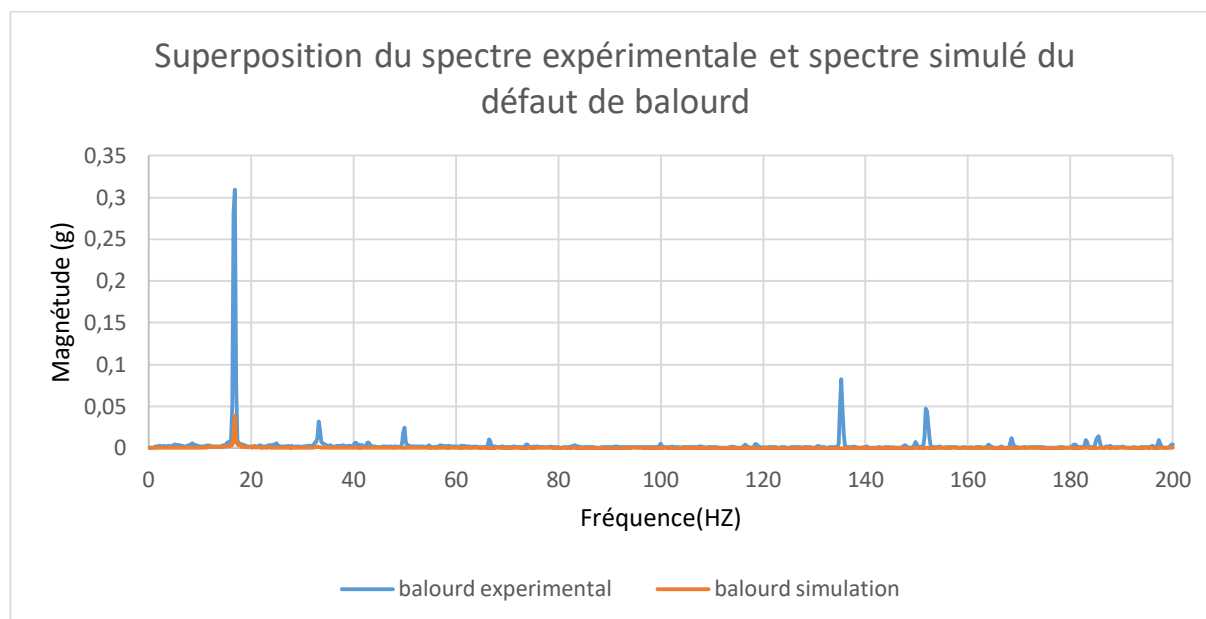


Figure 0.31: Superposition du spectre expérimentale et spectre simulé du défaut de balourd.

### c. Discussion des résultats et validation

Les résultats des spectres de la simulation numérique sont très proches à ceux de l'expérimental, où les pics à la première fréquence de rotation qui caractérisent le défaut de balourd se coïncident avec une diminution de l'amplitude à la fréquence de rotation visible dans le spectre de simulation et l'absence de quelques pics. Les différences constatées peuvent être expliqués par les conditions extérieures pouvant affecter le fonctionnement de l'équipement (vent, température, etc.) et qui ne sont pas pris en compte dans cette étude.

Après la comparaison des résultats de la simulation numérique avec les résultats expérimentaux en mesurant le degré d'inter-corrélation (CC) entre les deux signaux correspondant aux modèles expérimental et numérique, nous avons obtenu un taux de similarité de 85%. Ce niveau de corrélation entre les deux modèles confirme la bonne modélisation de la chaîne de ventilateur et constitue un bon départ pour les études d'essais ultérieurs.

### 3.6.2 Le défaut d'alignement

#### a. Modélisation de désalignement

Le désalignement est un problème presque aussi commun que le balourd. Il est difficile d'aligner deux arbres de telle sorte qu'au le niveau du point de transfert des forces d'un arbre à un autre et les axes de rotation des deux arbres soient colinéaires quand la machine fonctionne dans des conditions normales.

Pour étudié ce phénomène dans la chaîne de la ventilation X205 nous avons besoin de toutes leurs composantes tel que le moteur qui nous n'avons pas le modélisé mais nous avons

plutôt utilisé une fonctionnalité dans SolidWorks qui nous a permis d'avoir l'effet du moteur sans leur présence.

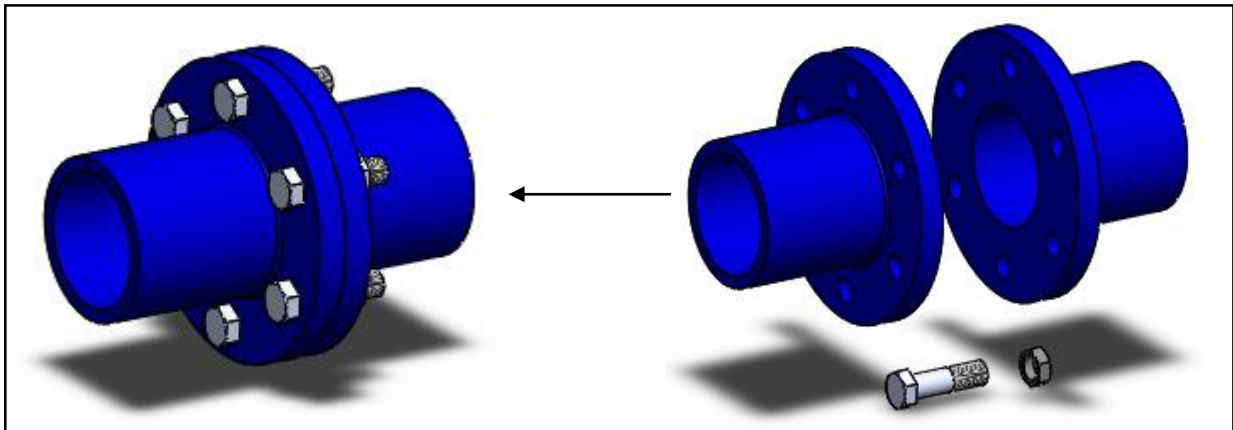


Figure 0.32: Modélisation d'accouplement.

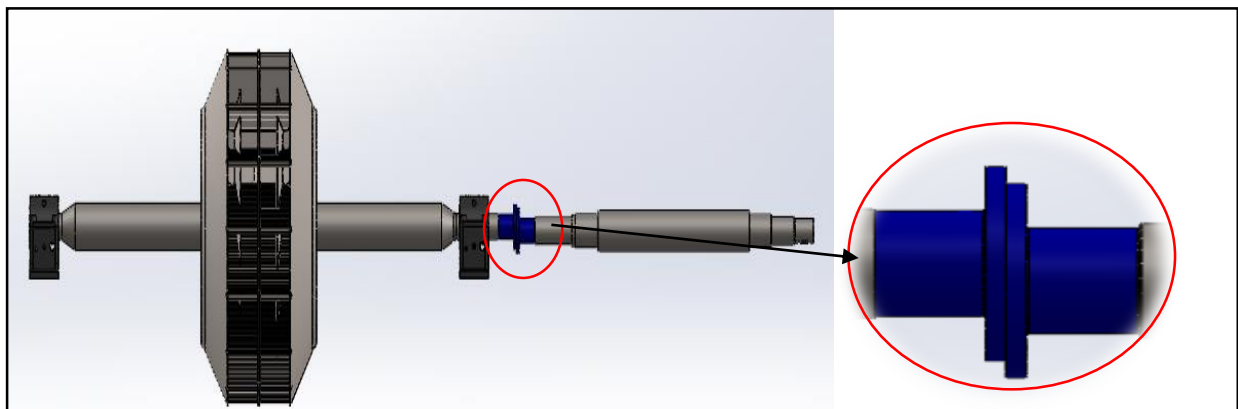


Figure 0.33: Modélisation du défaut d'alignement radial.

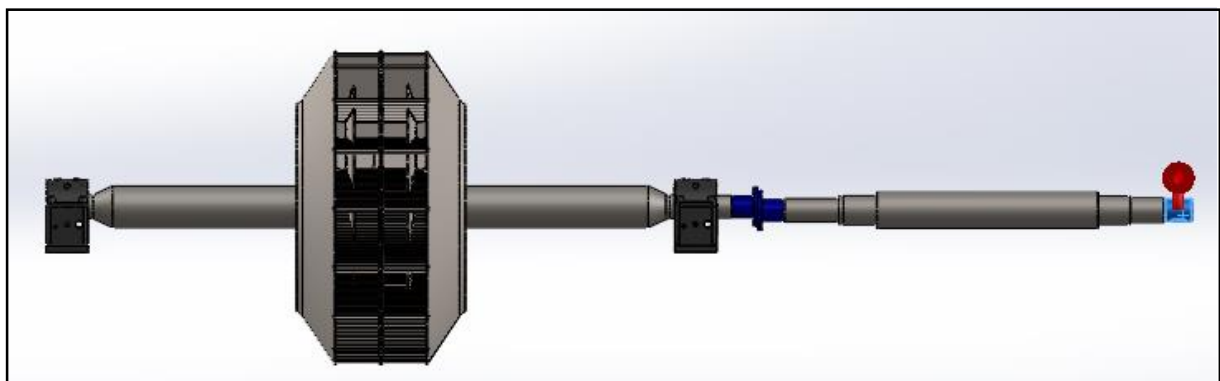


Figure 0.34: Application du moteur circulaire.

## b. Résultat de simulation

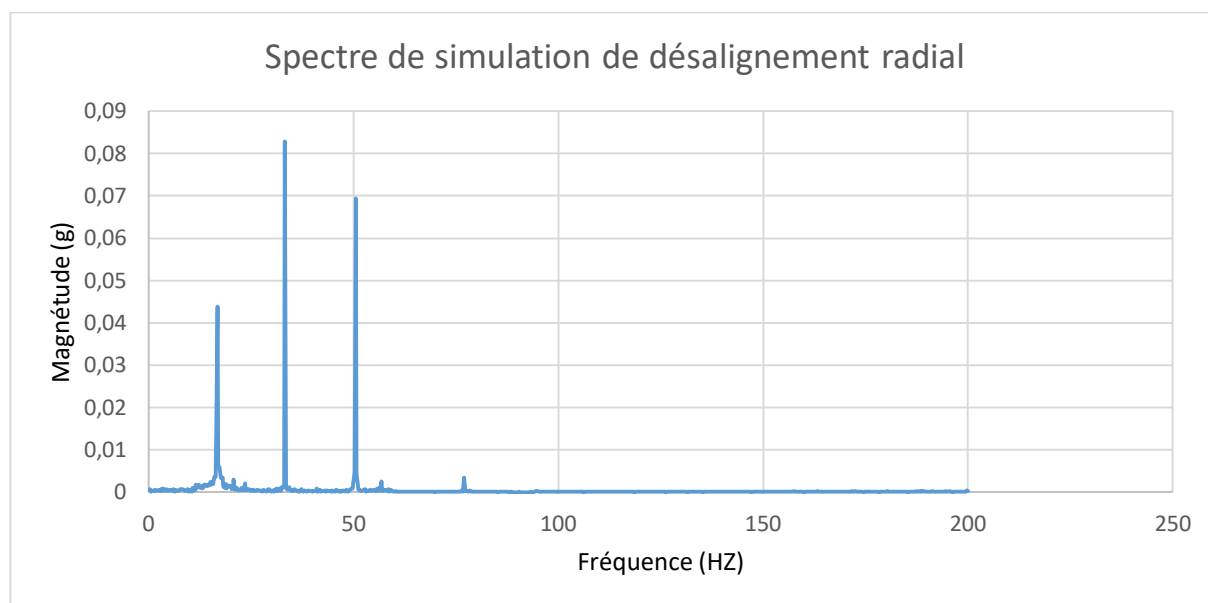


Figure 0.35: Spectre de simulation de désalignement radial.

## c. Discussion des résultats

Un défaut d'alignement radial est révélé par un pic d'amplitude prépondérante généralement 2 fois la fréquence de rotation. Il apparaît une vibration dans la direction radiale de composante d'ordre 2 de la fréquence de rotation, avec des amplitudes (vibrations d'ordre 2, 3 et parfois 4) supérieures aux composantes d'ordre 1.

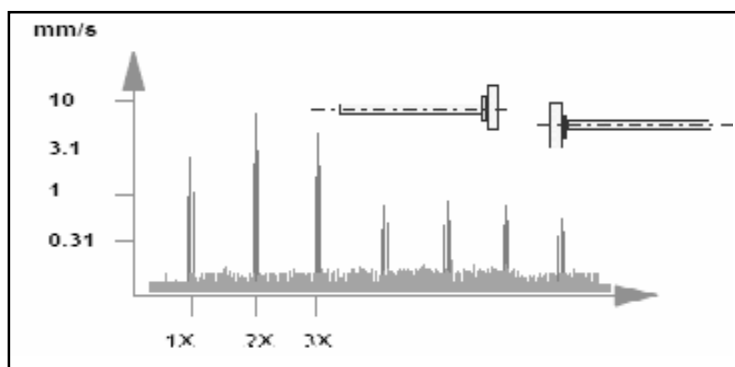


Figure 3.36 : Spectre typique de désalignement parallèle [29]

C'est ce qui est représenté dans la figure 3.35 où on a remarqué un pic très important pour le composante d'ordre 2 Fr (à 32,66 HZ) avec un pic d'ordre 3Fr (à 48,99HZ) d'amplitude supérieur au composante d'ordre 1 (à 16,33 HZ), ce qui signifie la présence d'un défaut d'alignement radial avec une absence de quelques pics qui peut être expliquée par les conditions extérieures qui ne sont pas pris en compte dans cette étude.

### 3.6.3 Le défaut de serrage

#### a. Modélisation

Pour modéliser le défaut de serrage nous avons supposé qu'il y'a un jeu entre les deux parties de palier qui apparait pendant que le ventilateur est en mouvement. Nous avons modélisé ce jeu par une modification des contraintes sur le palier parfait ; c'est à dire lorsque nous avons assemblé les deux surfaces de contact pour la partie supérieure et la partie inférieure du palier, nous n'avons pas utilisé la contrainte standard (coïncidence) comme d'habitude. ce qui incarne en situation réelle que les vis sont bien serrées, mais nous avons plutôt utilisé les contraintes avancées pour maintenir un jeu entre la partie supérieure et inférieure comprise entre 0 mm et 0.5 mm comme une distance maximale lorsque le ventilateur tourne, ce qui incarne en situation réelle que les vis sont desserrées.

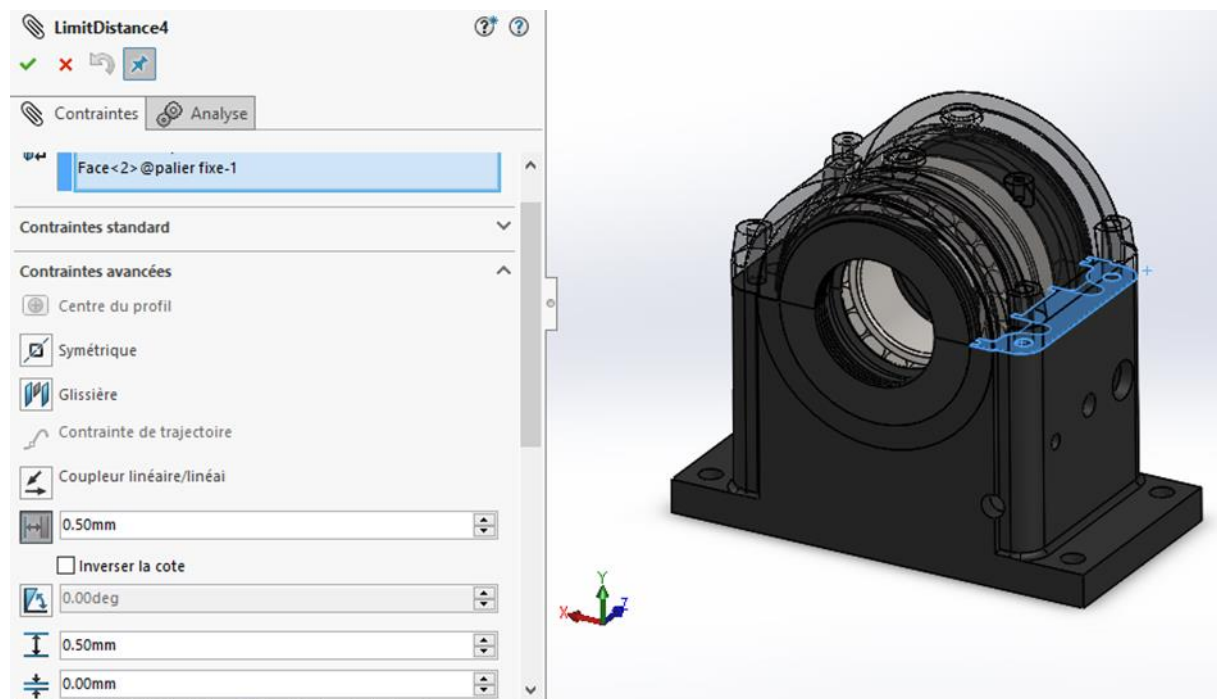


Figure 3.37 : La modélisation du défaut de serrage au niveau du palier fixe.

## b. Résultat de simulation

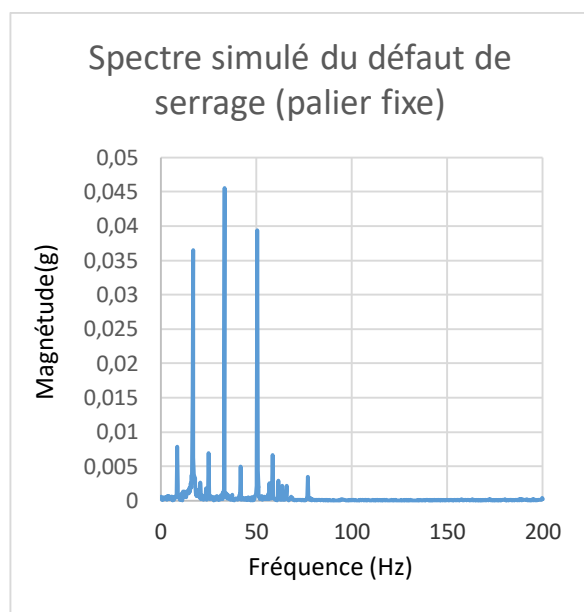


Figure 3.38 : Spectre simulé de desserrage (Palier fixe).

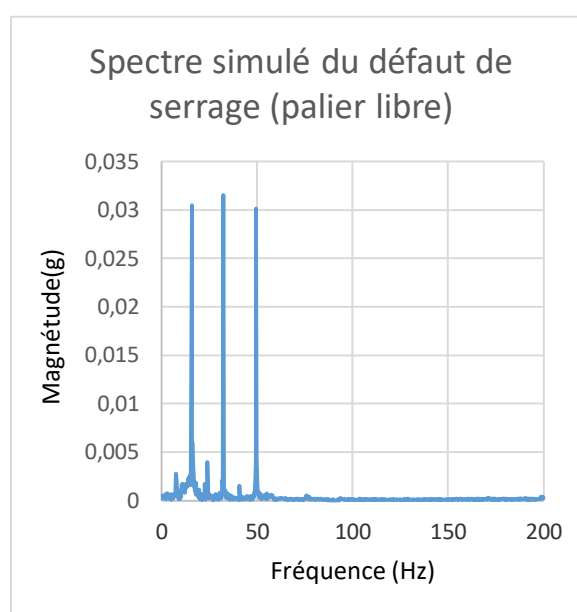


Figure 3.39 : Spectre simulé de desserrage (Palier libre).

## c. Discussion des résultats :

Le spectre typique d'un mauvais serrage mesuré sur une machine dans laquelle il existe un jeu contient un grand nombre de pic à des fréquences multiples de la fréquence de rotation (jusqu'à 10ème ordre). Il est également parfois possible de retrouver des pics à l'harmonique  $\frac{1}{2}$  ( $\frac{1}{2}$  x la fréquence de rotation) et ses multiples à un niveau toutefois moindre que les harmonique de la fréquence fondamentale. [11]

C'est ce qui est représenté dans les figures 3.38 et 3.39 ou on a remarqué l'apparition des pic à des fréquences multiples de la fréquence de rotation et des pics à l'harmonique  $\frac{1}{2}$  ( $\frac{1}{2}$  x la fréquence de rotation) et ses multiples ce qui signifie la présence d'un défaut de serrage avec une absence de quelque pics qui peut être expliquée par les conditions extérieures qui ne sont pas pris en compte dans cette étude.

### **3.7 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons fait une présentation sur le logiciel de CAO SolidWorks qui nous avons utilisé pour modéliser le modèle numérique du ventilateur X205 et pour modéliser les trois défauts qui sont pris en charge dans notre étude tels que le défaut de balourd, le désalignement et le desserrage. Après l'étape de modélisation nous avons fait la simulation et la validation des résultats pour s'assurer du crédit que l'on peut porter aux résultats fournis par la simulation, afin qu'ils puissent servir d'outil d'aide à la décision plus tard. Cette approche permettra de reproduire et d'étudier le comportement vibratoire en présence des défauts à un moindre coût et dans un intervalle de temps réduit, et ce en évitant d'avoir recours à des installations d'essais pour reproduire les défauts réels.

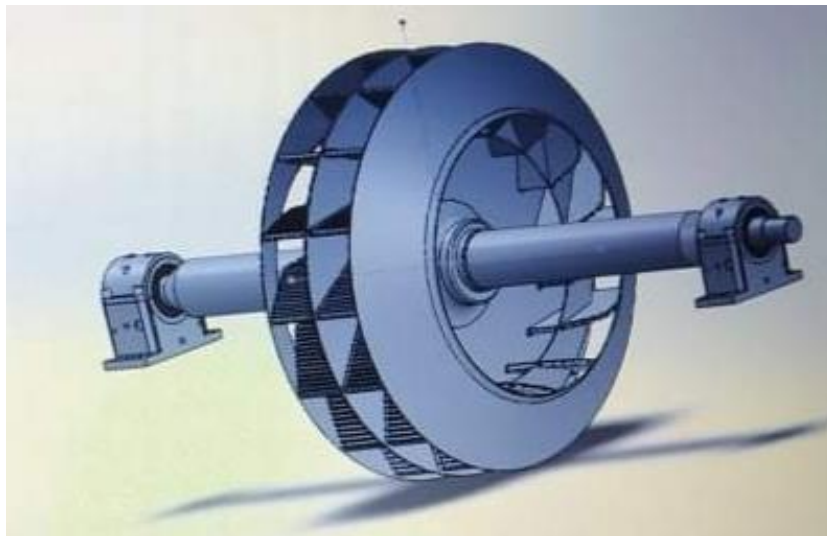
## Chapitre 4 : Localisation de défauts par la machine d'apprentissage extrême

### 4.1 Introduction

Les machines tournantes sont des composantes essentielles des applications industrielles et de production d'énergie. Pour cela, le diagnostic et la surveillance sont nécessaires pour garantir la disponibilité et la fiabilité de ces machines et orienter l'action de maintenance. Dans ces dernières décennies, les ingénieurs cherchent à développer des méthodes de contrôle et de surveillance automatique. Les techniques de l'intelligence artificielle concentrent sur l'élaboration de modèles capables de représenter certaines caractéristiques qui nous entourent, d'apprendre certaines données afin d'accomplir diverses tâches, d'aider à la prise des décisions. Parmi ces techniques les RNA et l'ELM qui se caractérisent par leurs capacités et rapidité d'apprentissage.

Dans ce travail, un algorithme basé sur une machine d'apprentissage extrême (ELM) est utilisé pour estimer la position des défauts à l'aide de données extraites de la simulation.

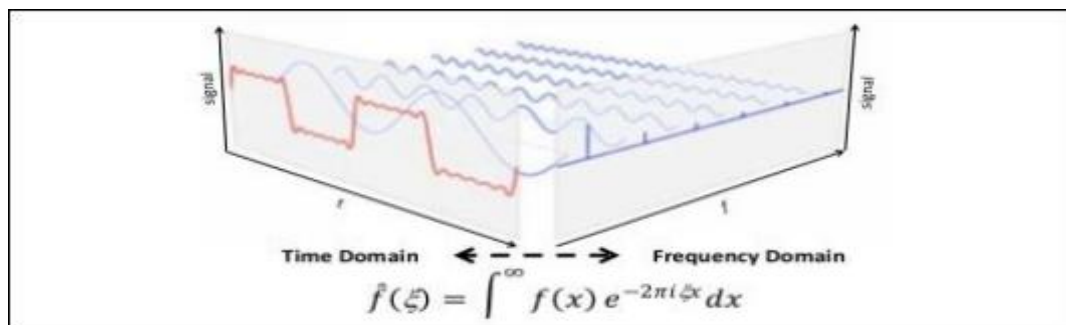
### 4.2 Principe du schéma ELM pour la localisation des défauts



Extraction des signaux de la turbine



Transformée de Fourier (domaine temporel → domaine fréquentiel)



Amorçage de données

(Bruit blanc)



Utilisation des données

Extreme Learning Machine (ELM)

(Formation / test)

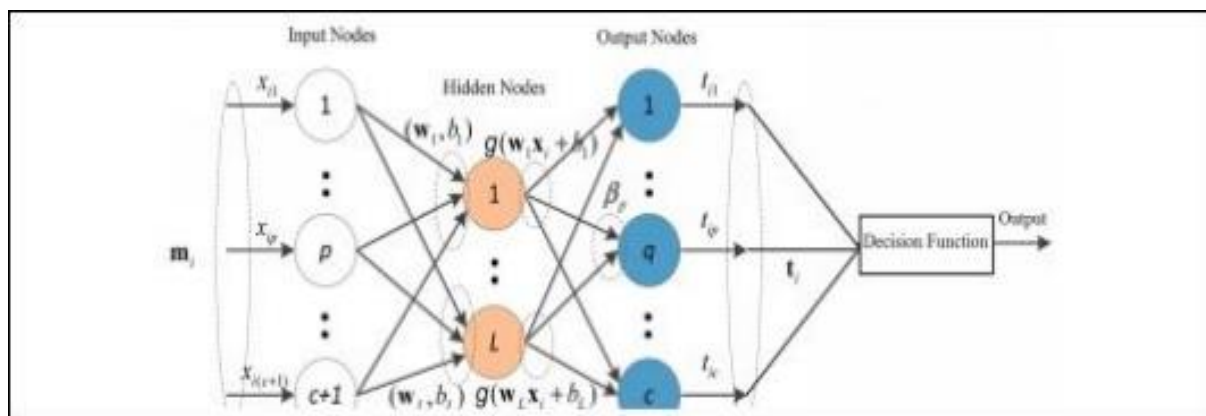


Figure 4.1 Étapes d'estimation de localisation des défauts [32]

Le schéma de localisation des défauts proposé comprend deux étapes, comme le montre la figure 4.2. Dans la première étape, le procédé basé sur l'analyse vibratoire, qui a été utilisé pour détecter et localiser les défauts de la chaîne de ventilateur, et fournir une indication sur les défauts. Après la localisation des défauts, l'ELM, qui a été déjà appris à l'aide du réseau de neurone, par les signaux extraits du palier peut prédire la position du défaut.

Les signaux extraits doivent subir une série de prétraitements afin d'être utilisées comme modèles d'entrée pour l'ELM.

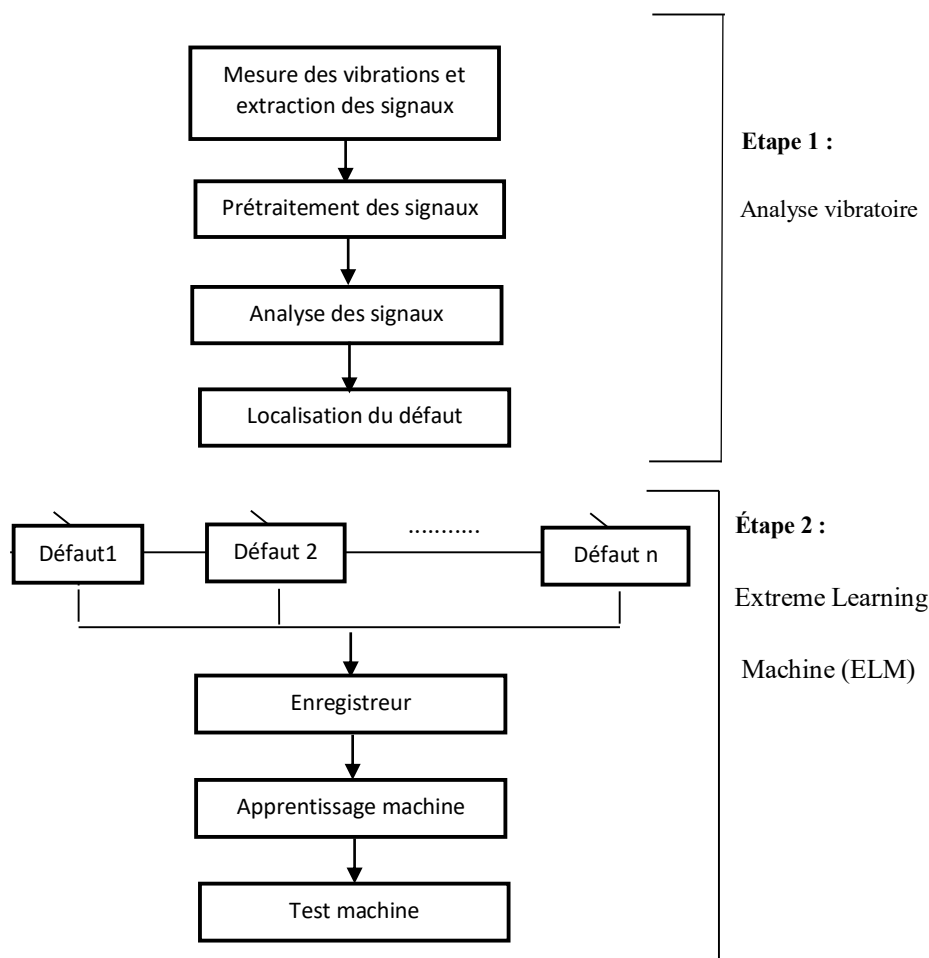


Figure 4.2: Schéma de localisation des défauts [32]

### 4.3 Préparation des données pour localiser les défauts

Afin de créer un modèle basé sur une machine d'apprentissage pour l'estimation de la position du défaut, il est important de collecter suffisamment d'informations sur les différentes positions pour atteindre la performance de la technique de la machine d'apprentissage. Pour maintenir la généralisation de performance du réseau de neurone, c'est-à-dire la capacité de prédiction sur de nouveaux cas similaires à ceux formés, les caractéristiques doivent être suffisantes.

#### 4.4 Localisation des défauts :

Il est important d'estimer la position des défauts dans les machines tournantes. Cela sera effectué à partir de la simulation des défauts sur les paliers du ventilateur X205.

Les simulations ont été effectuées pour générer des signaux fréquentiels des défauts introduits. La figure 4.3 et la figure 4.4 montrent les résultats du tracé des 5 spectres de défaut de serrage (jeu entre les 2 parties de palier causé par le desserrage des boulons) au niveau des paliers libre et fixe respectivement, avec des jeux de 0.5 mm, 1 mm, 1.5mm, 2mm et 4mm.

Les données de ces spectres sont utilisées comme des entrées pour entraîner (former) le modèle d'ELM dans chaque palier. Et pour tester le modèle, on va utiliser 5 autres signaux de desserrage qui ont été extraies à partir des petites modifications au niveau des paramètres de simulation pour chaque cas de jeu, au niveau de chaque palier.

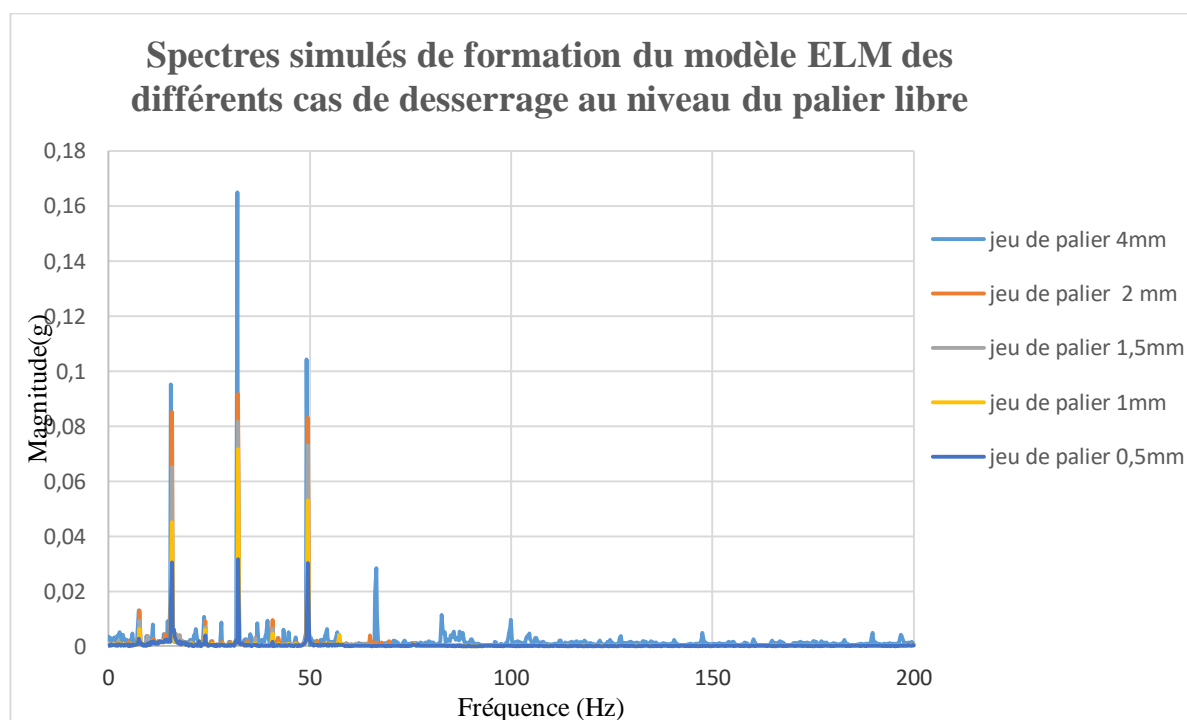


Figure 4.3 : Spectres simulés de formation du modèle ELM des différents cas de desserrage au niveau du palier libre.

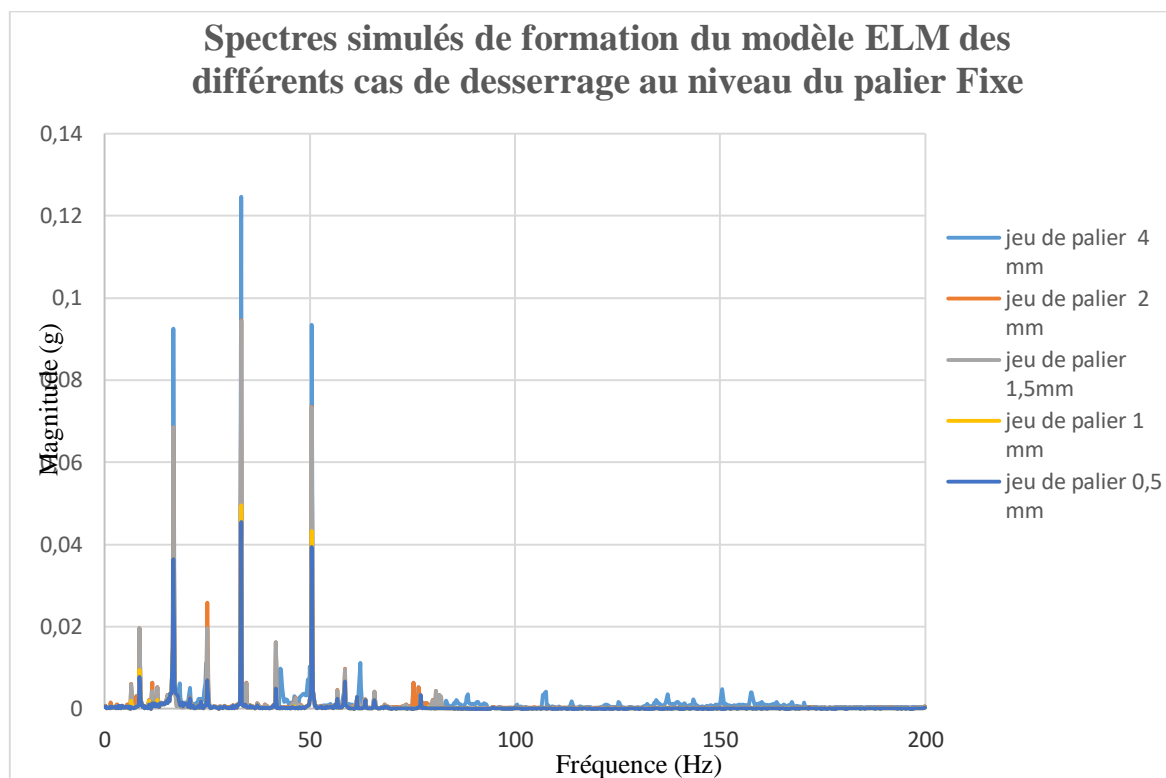


Figure 4.4 : Spectres simulés de formation du modèle ELM des différents cas de desserrage au niveau du palier fixe.

#### 4.5 Extraction des données

L'exploitation des signaux vibratoires et des techniques d'analyse, pour le diagnostic, passe par l'extraction des informations sous forme d'indicateurs. L'extraction de données a pour but de réduire la taille des données et d'obtenir les informations les plus importantes pour conclure au défaut.

On a extrait plusieurs indicateurs. Tout d'abord, les caractéristiques statistiques, ces caractéristiques comprennent les valeurs min, max, moyenne, écart type, énergie et skewness, et 8 pics également répartis. Ce qui constitue un nombre de 14 indicateurs extraits à partir des spectres fréquentiels. Toutes les caractéristiques mentionnées sont décrites mathématiquement dans le tableau 4-1

No	Désignation	Description	Expression
1....8	$p_i$	Pics également repartis	$\mathbf{Max}[y_i, y_j]$ tel que : $i-j=d$
9	<b>MIN</b>	Amplitude minimale du signal	$\mathbf{Min}(x_i)$
10	<b>MAX</b>	Amplitude maximale du signal	$\mathbf{Max}(x_i)$
11	<b>SKW</b>	Skewness factor	$\mathbf{SKW}$ $= \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3 / (n - 1) \delta^3$
12	<b>STD</b>	Déviation standard	$\delta = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / (n - 1)$
13	<b>MEAN</b>	L'amplitude moyenne du signal	$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n$
14	<b>ENERGIE</b>	Energie du signal	$E = \sum_{i=1}^n x_i^2$

Tableau 4-1 : Liste des indicateurs d'entrée pour l'apprentissage de l'ELM

#### 4.6 Résultats de l'application du l'algorithme

Différentes mesures d'évaluation ont été envisagées pour valider les résultats du modèle proposé. Le processus de validation a été effectué sur la base de la matrice de confusion et d'une configuration expérimentale. La matrice de confusion résume les performances de classification par rapport à les données de formation du modèle. Il s'agit d'une matrice bidimensionnelle, indexée dans une dimension par la classe source du défaut et dans l'autre par la classe estimée.

Les calculs associés sont indiqués dans le tableau 4.2 où les matrices représentées par le tableau reflètent la classification des dix positions respectives sur la base de l'approche ELM. Comme le montre clairement le tableau, le système du modèle proposé était capable de prédire les positions correctes avec un pourcentage de probabilité élevé. Cela a été possible pour la plupart des positions, comme le montrent les valeurs élevées générales le long de la diagonale principale de la matrice (c'est-à-dire plus de 90%). La précision globale du système a été calculée sur la base de la valeur moyenne des éléments diagonaux. À son tour, la précision du système s'est avérée être d'environ 95%. En revanche, la différence entre les positions ciblées et estimées peut-être observée sur la figure 4.5 à partir du modèle. Il est évident à quel point les positions estimées et ciblées coïncident, ce qui est clairement démontré par le pourcentage

*Chapitre 4 : Localisation de défauts par la machine d'apprentissage extrême*

élevé de suivi des positions ciblées dans les prévisions du modèle qui sont l'identification de dimension de jeu et la localisation de défaut.

	p1'	p2'	p3'	p4'	p5'	p6'	p7'	p8'	p9'	p10'
p1	0.90	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0
p2	0	0.90	0.1	0	0	0	0	0	0	0
p3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
p4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
p5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
p6	0	0	0	0	0	0.90	0.1	0	0	0
p7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
p8	0	0	0	0	0	0	0.1	0.90	0	0
p9	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.90	0
p10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Tableau 4-2 : Tableau de la matrice de confusion du modèle de prédiction ELM pour la localisation des défauts

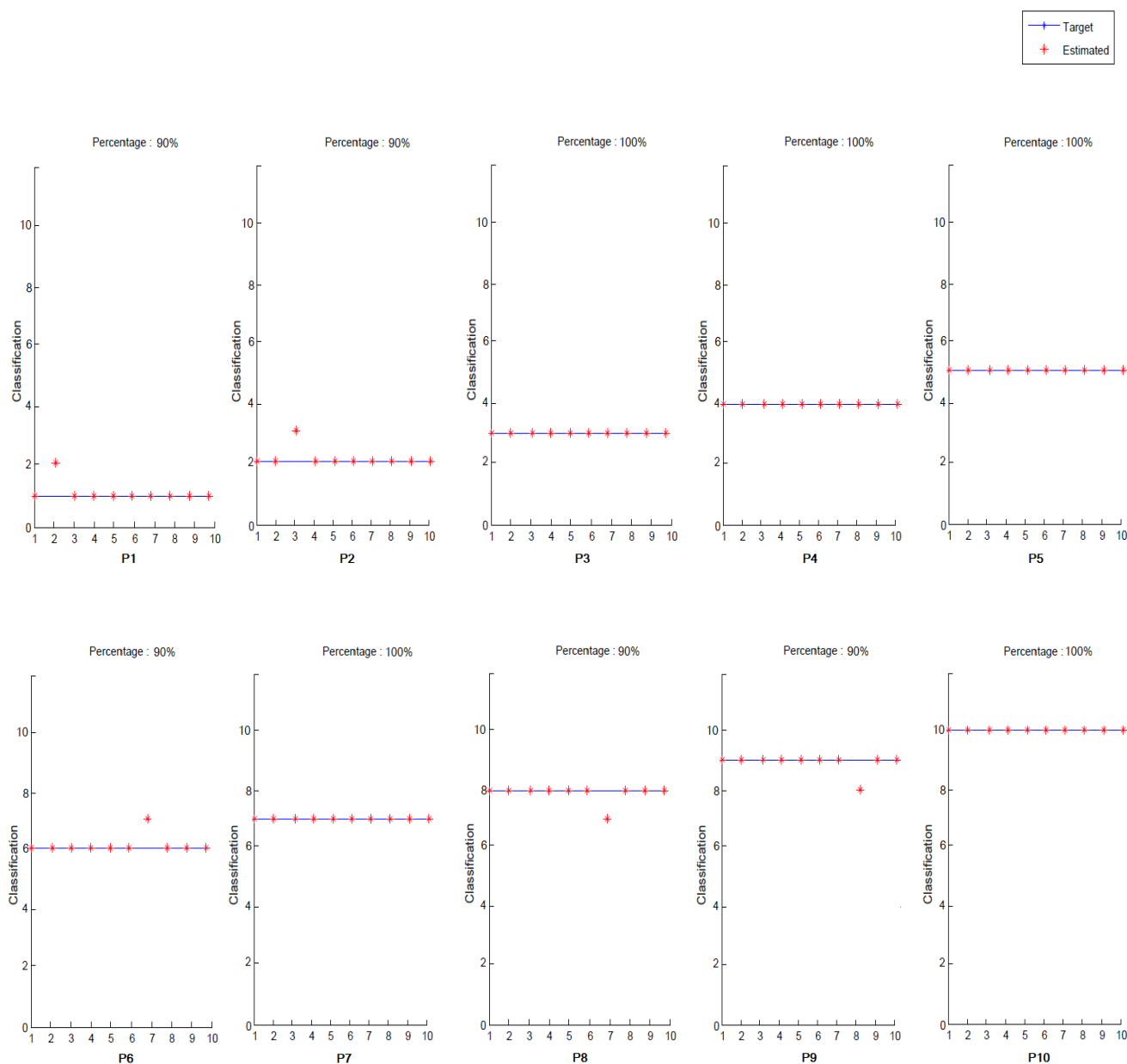


Figure 4.5 : Résultats de localisation par ELM

## 4.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une application de localisation automatique des défauts à l'aide d'une machine d'apprentissage extrême. Au cours du processus, la formation sur l'ensemble de données est effectuée sur la base de réseaux de neurones artificiels et déployée pour estimer la position du défaut.

## **Conclusion générale**

Il n'est plus nécessaire aujourd'hui de montrer l'importance de la maintenance optimale dans les sociétés industriels qui devenue un facteur de compétitivité et de pérennité décisive visant à répondre aux impératifs industriels pour assurer une production permanente et augmenter la durée de vie des machines en réduisant le cout surtout pour les machines tournantes. Ces dernières représentent une classe dominante dans les systèmes de production et c'est le cas pour notre équipement d'étude le ventilateur de circulation X205 où l'apparition d'une défaillance inattendue peut causer d'énormes pertes économiques lourdes et des endommagements inévitables.

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic et surveillance des défauts des machines tournantes, nous avons consacré l'étude pour un ventilateur de circulation a une base des données des pannes riches, qui peut nous soutenir de couvrir le maximum des cas des défauts possibles.

On a essayé tout au long la première partie de ce travail de cadrer les différentes notions relatives à la maintenance , les techniques d'analyse et les techniques de traitement de signal qui ont été exploitées pour l'analyse vibratoire, qui est la technique la plus utilisée pour réaliser une surveillance et un diagnostic fiable et pour détecter l'apparition et l'évolution de la plupart des défauts . Par la suite nous avons cité quelques notions sur les méthodes de classification par l'Intelligence Artificielle.

Dans la deuxième partie de ce travail on a commencé par une présentation des caractéristiques techniques du ventilateur et une description de la chaine de ventilation après on a expérimenté les recherches théoriques de l'analyse vibratoire par l'application des techniques de traitement de signal telles que : l'analyse de niveau global et l'analyse spectrale sur des signaux réels acquis du ventilateur de circulation X205 CRU2 ou on à prendre le balourd comme un exemple d'étude réel.

Afin de surveiller et d'analyser le comportement de la machine, lors d'un fonctionnement normal (état sain) et (avec défaut) et de soutenir nos activités expérimentales nous avons modélisé numériquement le ventilateur et les différents défauts tels que le balourd, le désalignement et le desserrage à l'aide de logiciel SOLIDWORKS 2016 pour faire une simulation dynamique de son fonctionnement réel. Ce modèle, conduit à un gain notable en termes de temps, de cout et de recherche.

Enfin, à l'aide d'une machine d'apprentissage extrême, on a fait une application de localisation automatique de défaut de serrage au niveau des deux paliers. Au cours du

### *Conclusion générale*

processus, la formation sur l'ensemble de données est effectuée sur la base de réseaux de neurones artificiels et déployée pour estimer la position du défaut avec l'indication de pourcentage de la similarité des signaux de simulation par rapports aux signaux d'apprentissage.

## Bibliographie

- [1] Khelf, I. (2013). *Diagnostic des machines tournantes par les techniques de l'intelligence artificielle* (Doctoral dissertation, Thèse de doctorat, Université Badj Mokhtar-Annaba).
- [2] Nabti, M. T. (2018). Etude de l'évolution des indicateurs spectraux et cepstraux dans la détection des défauts mécaniques.
- [3] Heng, J. (2002). *Pratique de la Maintenance préventive* édition" Dunod.
- [4] Ayad, M. (2018). *Recherche de signatures robustes des défauts dans une machine tournante a travers l'analyse de signaux vibratoires* (Doctoral dissertation).
- [5] Benrabeh, D. J. A. I. D. I. R. (2016). Surveillance d'une turbine à gaz à base d'un système de prise de décision pour l'étude de sa stabilité : Vibration Monitoring.
- [6] Zwingelstein, G. (1995). *Failures diagnosis. Theory and practice for industrial systems*.
- [7] Taleb, M. (2018). *Surveillance détection et diagnostic des défaillances dans une cimenterie en utilisant l'analyse fonctionnelle* (Doctoral dissertation, Thèse de doctorat, Université 20 août 1955 de Skikda, Algérie).
- [8] BOUANAKA, ML. (2009). *Contribution à l'amélioration des performances opérationnelles des machines industrielles* (Doctoral dissertation, Thèse de doctorat en génie mécanique, Université Mentouri Constantine).
- [9] Chevalier, R. (2001). État de l'art de la surveillance et du diagnostic des machines tournantes à EDF. *RFM Revue française de mécanique*, (1), 5-11.
- [10] Djebili, O. (2013). *Contribution à la maintenance prédictive par analyse vibratoire des composants mécaniques tournants. Application aux butées à billes soumises à la fatigue de contact de roulement* (Doctoral dissertation, Reims).
- [11] LANDOLSI, Foued. SUPPORT DE COURS DE TECHNIQUES DE SURVEILLANCE. 2017
- [12] Bolaers, F., Dron, J. P., & Rasolofondraibe, L. (2003). Prédiction et suivi de l'évolution d'un écaillage de fatigue de roulement par analyse vibratoire. *XVIème Congrès Français de mécanique, Nice, référence, 649*.
- [13] BERKOUS, H. (2017). *Detection des défauts d'engrenage par analyse vibratoire*, Université Badji Mokhtar d'Annaba, Algérie.
- [14] Morel, J. (1992). *Vibration des machines et diagnostic de leur état defonctionnement*. Eyrolles.
- [15] Randall, R. B. (2011). *Vibration-based condition monitoring: industrial, aerospace and automotive applications*. John Wiley & Sons.
- [16] Djebala, A. (2008). *Application de la transformée par ondelettes à l'étude et l'analyse*

*vibratoire des systèmes mécaniques* (Doctoral dissertation, Thèse de doctorat, Université de Mai 08 1945, Guelma, Algérie).

[17] ABA. A, « *Diagnostic vibratoire sur des pompes rotatives EP2 & P112* ». Rapport de Fin de Mise en Situation Professionnelle du Technicien Supérieur en Mécanique Industrielle, DIRECTION REGIONALE HAOUD BERKAOUI (2015)

[18] COQUAND, Eric (2006). «Analyse vibratoire» (chap. 2), dans *Analyse vibratoire des machines tournantes*.

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

[20] HACHEMI, M. *Application de l'ODS à l'analyse des problèmes de vibration des machines tournantes* (Doctoral dissertation).

[21] Cherifi, F., Amri, A., & Smaili, Y. (2014). *Application de l'analyse vibratoire à la maintenance préventive conditionnelle* (Doctoral dissertation, Université abderrahmane mira béjaia).

[22] Fouzi, B. (2019). *Diagnostic et détection des défauts mécaniques affectant les systèmes électromécaniques* (Doctoral dissertation, UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA).

[23] AUGIEX, D. (2019). *Tout savoir sur l'intelligence artificielle*. Microsoft experiences.

[24] Touzet, C. (1992). *Les réseaux de neurones artificiels, introduction au connexionnisme*.

[25] Metidji, R., & Mendil, B. (2008). *Synthese des stabilisateurs de systemes de puissance (PSS) en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle* (Doctoral dissertation, Université Abderrahmane Mira-Bejaia).

[26] Ezzaki, P. F., Hassani, P. A. R., Hilali, P. A., & Bakkari, P. C. Remerciement.

[27] Harrouche, F. (2011). *Application de la Logique Floue Aux Machines Tournantes. Mémoire de Magister, Université de Setif*.

[28] AISSAOUI, L., & MANSOURI, R. (2019). *Surveillance vibratoire d'une turbine de ventilation à base d'un système de prise de décision*.

[29] Bogard F., " Développement d'une approche numérique visant à optimiser le suivi vibratoire des constituants d'une machine tournante ", Thèse de doctorat de l'Université de Reims (2000).

[30] BOURAS, Abdelkarim. SUPPORT DE COURS DE DIAGNOSTIC DES DEFAILLANCES DES SYSTEMES INDUSTRIELS. 2019.

[31] YENDE, Raphael. SUPPORT DE COURS DE MAINTENANCE INFORMATIQUE. 2018.

[32] DJEMANA, M. (2017). *Electromechanical impedance based structural health monitoring using Extreme Learning Machine*. International Islamic University Malaysia.