

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



Université M'hamed Bouguera

Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie



**Dissertation
ACADEMIC MASTER**

Filière : Hydrocarbures
Spécialité : Génie Mécanique
Option : Mécanique des Chantiers Pétroliers

Présenté par :

Hamici Mohamed

Thème :

**Contrôle de l'état d'un équipement par l'intelligence
artificielle : Application au roulement NU313 de la
pompe 06-P-531-B.**

en présence de :

M. Monsieur	MC(A)	Président	UMBB Boumerdes
M. Monsieur	MC(A)	Examineur	UMBB Boumerdes
M. Monsieur	MC(A)	Examineur	UMBB Boumerdes
M. Halimi Dejamal	MC(B)	Encadreur	UMBB Boumerdes

Année académique 2022/2023

dédicace

Je dédie ce modeste travail au mes chers parents, à mon père qu'est veillé pour mon graduation jusqu'à ce moment ;et ma mère aussi mon frère, mes sœurs et toute ma famille. A tous ceux qui m'ont soutenu dans ma vie, mes chers amis mohamed ,lotfi,abdou rachidi pour sa patience et motivation, pour leur soutien et leurs orientations précieuses, la famille de MACP18. Et enfin à tous ceux qui m'ont aidé de près ou lo

Remerciement

Gloire à dieu qui a créé, dirigé notre parcours et aidé, pour cela nous disons EL-HAMDOULILLAH. Nous remercions nos chers parents pour leurs sacrifices, leurs aides morales et matérielles. Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à tous les professeurs qui nous ont aidés tout au long de notre cursus universitaire en particulier notre encadreur **Mr. Halimi**, il nous a aidé tout le long de la réalisation de notre mémoire, nous saluons en lui sa patience, ses précieux conseils, ses encouragements et surtout son savoir et savoir-faire. Nous adressons nos remerciements à **Mr.ryan alo** pour son aide et soutien et encadrement et les informations fournies depuis janvier .et **Mr. mohamed birem** et **Mr.FARES BETAHHAR** pour l'encadrement dans ma période de stage , Nous tenons à remercier tous enseignants de département de transport et équipements des hydrocarbures pour leurs connaissances et savoir partagés avec nous durant tout notre cursus. Et enfin notre gratitude à toute personne qui a contribué de près ou de loin dans la réalisation de ce travail

Abstract

The oil industry, particularly in gas processing facilities (CPF), faces major challenges in terms of preventive maintenance and failure management. The high costs of production shutdowns and the potentially serious implications for safety and the environment require an effective maintenance approach. In this context, the application of artificial intelligence (AI) in monitoring and diagnostic systems plays a crucial role. This thesis focuses on the implementation of an AI model for the detection of NU313 ECM bearing faults in pump 06-P-531-B in the CPF gas processing facility. By using vibration data and envelope signals, the AI-based automatic monitoring system aims to improve early fault detection, reduce diagnostic time, and optimize preventive maintenance. The adoption of this system will help minimize downtime, enhance equipment safety, and optimize pump performance in the CPF gas processing facility.

ملخص

تواجه صناعة البترول ، وخاصة في مراكز معالجة الغاز ، تحديات كبيرة من حيث الصيانة الوقائية وإدارة الأعطال. تتطلب التكاليف المرتفعة لوقت التوقف عن العمل والعواقب الوخيمة المحتملة على السلامة والبيئة اتباع نهج فعال للصيانة. في هذا السياق ، يلعب تطبيق الذكاء الاصطناعي في أنظمة المراقبة والتشخيص دورًا حاسمًا. تركز هذه الرسالة على تنفيذ نموذج ذكاء اصطناعي للكشف عن أخطاء محمل في المضخة في مركز معالجة الغاز. باستخدام بيانات الاهتزاز وإشارات الأظرف ، يهدف نظام المراقبة الأتوماتيكي القائم على الذكاء الاصطناعي إلى تحسين الكشف المبكر عن الأخطاء وتقليل وقت التشخيص وتحسين الصيانة الوقائية. سيؤدي اعتماد هذا النظام إلى تقليل وقت التوقف عن العمل وتحسين سلامة المعدات وتحسين أداء المضخة في المصنع.

Résumé

L'industrie pétrolière, en particulier dans les centres de traitement de gaz (CPF), est confrontée à des défis majeurs en termes de maintenance préventive et de gestion des défaillances. Les coûts élevés des arrêts de production et les conséquences potentiellement graves sur la sécurité et l'environnement nécessitent une approche efficace de la maintenance. Dans ce contexte, l'application de l'intelligence artificielle (IA) dans les systèmes de surveillance et de diagnostic joue un rôle crucial. Ce mémoire se concentre sur l'implémentation d'un modèle d'IA pour la détection des défauts de roulements NU313 ECM dans la pompe 06-P-531-B du centre de traitement de gaz CPF. En utilisant des données de vibration et des signaux d'enveloppe, le système de surveillance automatique basé sur l'IA vise à améliorer la détection précoce des défauts, à réduire le temps de diagnostic et à optimiser la maintenance préventive. L'adoption de ce système permettra de minimiser les temps d'arrêt, d'améliorer la sécurité des équipements et d'optimiser les performances de la pompe dans le centre de traitement de gaz CPF.

Table des matières

Introduction	1
1 Présentation de site Tiguentourine	1
1.1 situation géographique	2
1.2 Situation géographique de Tiguentourine	2
1.3 Description du projet d'in amenas :	3
1.4 Organisation de l'entreprise :	4
1.5 Description de l'unité centrale de traitement de gaz (CPF)	5
1.6 conclusion	12
2 Caractéristiques de la pompe centrifuge 06-P-531-B	12
2.1 Types des pompes	13
2.1.1 Les pompes volumétriques	13
2.1.1.1 Pompes volumétriques alternatives	13
2.1.1.2 Pompes volumétriques rotatives	13
2.1.2 Les pompes centrifuges	14
2.1.2.1 fonctionnement d'une pompe centrifuge	14
2.1.2.2 Classification des pompes centrifuges	14
2.1.2.3 Les avantages et les inconvénients des pompes centrifuges	15
2.2 Caractéristiques des pompes centrifuges :	16
2.2.1 Débit de la pompe	16
2.2.2 Les pertes au niveau de la pompe	16
2.2.3 La charge d'une pompe	17
2.2.4 Les rendements de pompes	17
2.2.4.1 Rendement mécanique	17
2.2.5 Rendement hydraulique	17
2.2.5.1 Rendement manométrique	17
2.2.6 Rendement volumétrique	18
2.3 Phénomène de cavitation	18
2.3.1 Endroits attaqués par la cavitation	18
2.4 description de la pompe à eau domestique 06-P-531-B	19
2.4.1 plane technique de la pompe 06-P-531-B	21
2.4.2 La pompe dans le processus processus	22
2.5 Le plan de maintenance de la pompe 06-P-531-B	23
2.5.1 types de maintenance	23
2.5.1.1 maintenance corrective	23
2.5.1.2 la maintenance préventive	25

2.5.1.3	Test de performance de la pompe à eau domestique 06-P-531-B/C	25
2.5.2	conclusion	30
3	Analyse des vibrations pour la détection des défauts de roulement	30
3.1	Principes de base des vibrations	31
3.1.1	paramètres permettant d'évaluation des niveaux de vibrations (peak to peak ,0-peak ,RMS)	32
3.1.2	types des vibrations	33
3.1.3	Déplacement, Vitesse et Accélérations.	37
3.1.4	Forme d'onde temporelle et Transformation de Fourier rapide (FFT)	37
3.1.4.1	La forme d'onde temporelle	37
3.1.4.2	transformation de Fourier rapide (FFT)	38
3.2	Acquisition de données	39
3.2.1	instruments	39
3.2.1.1	Les mesures de vibrations en ligne (on-line) et hors ligne (off-line)	40
3.2.2	les captures de vibrations	40
3.2.3	processus de transfert des données de vibrations	42
3.3	Causes courantes des vibrations d'une pompe centrifuge	44
3.3.1	La détection des défauts des roulements a rouleaux	47
3.3.2	La conception des roulements a rouleaux	48
3.3.3	Le calcul des fréquences des roulements à rouleaux	49
3.3.4	Les étapes de défaillance des roulements à rouleaux	50
3.4	Méthode d'analyse d'enveloppe pour la détection des défauts de roulements à rouleaux.	54
3.4.1	III.3.3 L'analyse d'enveloppe "HFRT" :	54
3.4.2	Étapes pour obtenir l'enveloppe du signal de vibration	56
3.5	conclusion	57
4	LA Détection des défauts du roulement NU313 ECM à l'aide de l'IA	57
4.1	L'Apprentissage Automatique (Machine Learning)	58
4.1.1	Les Algorithmes d'apprentissage de ML	59
4.1.1.1	Support Vector Machine (SVM)	59
4.1.1.2	Arbre de décision (Decision Tree)	60
4.1.1.3	XG Boost Classificateur	61
4.1.1.4	Nearest Neighbors (KNN)	61
4.1.1.5	La régression	62
4.2	Le Sur-apprentissage (Overfitting)	62
4.3	La structure et le fonctionnement du ANN	62
4.3.1	Les principales composantes du réseau de neurones	63
4.3.2	Types et architectures des réseaux de neurones artificiels	64
4.3.2.1	Perceptron monocouche (un seul neurone)	64
4.3.2.2	Multi Layer Perceptron (MLP)	65
4.3.2.3	Réseau de neurones récurrent (Recurrent Neural Network)	65
4.3.2.4	. Réseau de neurones de convolution (Convolution Neural Network)	66
4.3.3	La Classification par le réseau des neurones	66

4.4	La détection des défauts du roulement NU313 ECM à l'aide de L intelligence artificielle	67
4.4.1	Diagnostic FFT pour les points de mesure	67
4.4.2	déscription des points de mesure de la pompe	67
4.4.2.1	Prétraitement des données (preprocessing of datas)	68
4.4.2.2	Roulement à rouleaux cylindriques à une rangée, type NU	71
4.4.2.3	Roulement à rouleaux cylindriques UN	72
4.4.3	calcul des fréquences de défaillance de roulement NU313ECM	72
4.4.4	Classification des défauts du roulement NU313 ECM en utilisant les signaux d'enveloppe	73
4.4.5	La Construction des modèles d'intelligence artificielle AI	76
4.4.5.1	Les algorithmes de Machine Learning	76
4.5	Implémentation du modèle d'IA dans le système de surveillance de la pompe 06-P-531-B.	79
4.6	conclusion	80
	General Conclusion	81

Table des figures

1.1	Situation géographique de Tiguentourine.	2
1.2	Organisation Opérationnel De L'entreprise.	4
1.3	l'unité centrale de traitement de gaz (CPF).	5
2.1	Les types des pompes volumétriques.	13
2.2	Les différents composants de la pompe 06-P-531 B	20
2.3	21
2.4	21
2.5	Plan technique de la pompe 06-P-531-B.	21
2.6	la pompe 06-P-531 B dans le processus	22
2.7	les types de maintenance	23
2.8	Courbes de test de performance de la pompe C	27
2.9	Courbes de test de performance de la pompe B	28
3.1	Amplitude,période,fréquence	32
3.2	paramètres d'évaluation des niveaux de vibrations	33
3.3	vibrations -A périodique	34
3.4	vibrations transitoire	35
3.5	Variation de l'amplitude des vibrations en fonction de la fréquence	37
3.6	Forme d'onde temporelle	38
3.7	les instruments utilisés pour la collection des données	39
3.8	les capteurs des vibrations	40
3.9	capteur d' accélération	41
3.10	l capteur de vitesse	41
3.11	capteur de déplacement	42
3.12	capteur de déplacement	42
3.13	les types de Désalignement	44
3.14	les types de déséquilibre	45
3.15	roulement à rouleaux,	46
3.16	palier lisse	47
3.17	les composants des roulements a rouleaux	49
3.18	les quatre stades de défaillance de roulements	50
3.19	Spectre de défaillance de roulements (Stade 1)	51
3.20	Spectre de défaillance de roulements (Stade 2)	51
3.21	51
3.22	dommage subsurfacique des roulements	52
3.23	Spectre de défaillance de roulements (Stade 3) avec fréquence BPGI mise en évidence	52

3.24	Spectre de défaillance de roulements (Stade 3) avec fréquence BPFO mise en évidence	53
3.25	Spectre de défaillance de roulements (Stade 3) avec fréquence BS mise en évidence	53
3.26	Spectre de défaillance de roulements (Stade 3) avec fréquence BPFO mise en évidence	54
3.27	enveloppe du défaut de bague intérieure avec défaut 0.007 mm	57
4.1	Optimale Hyperplan Support Vector Machine	59
4.2	– SVM : Illustration de la transformation de l'espace initia	60
4.3	Exemple d'arbre de classification	60
4.4	Algorithme de KNN	61
4.5	La Fonction logistique sigmoïde	62
4.6	Mise en correspondance neurone biologique / neurone artificie	63
4.7	structure d'un neurone artificiel	63
4.8	Le Perceptron : structure et comportement	65
4.9	Architecture simplifié d'un réseau RNN	66
4.10	Architecture de CNN avec des couches convolution et pooling	66
4.11	les points de mesure des vibrations de la pompe	68
4.12	schéma des points de mesure de la pompe	68
4.13	importation des donnés	69
4.14	description des donnés	69
4.15	FFT signale de 01VV MOTEUR COA VER VITet 02AV MOTEUR CA AXI VIT	70
4.16	FFT signale de 02VV MOTEUR CA VER VIT et02HV MOTEUR CA HOR VIT	70
4.17	FFT signale de 03HV POMPE CA HOR VIT	71
4.18	Calcul des fréquences de défaillance des roulements avec le module math en Python	73
4.19	les fréquences des défauts	73
4.20	importation des données	74
4.21	informations sur les données en utilisant la fonction info()	74
4.22	code pour visualiser les les signaux des défauts de NU313 ECM	75
4.23	enveloppe signal de défaut BPF1	75
4.24	enveloppe signal de défaut BDF	75
4.25	enveloppe signal de défaut BPFO	76
4.26	Dernier stade de défaillance des roulements (BLS) Enveloppe du signal	76
4.27	- La précision de diagnostic des algorithmes de ML	77
4.28	Indicateurs supplémentaires sur la performance du modèle RF de modèle RF	77
4.29	La matrice de confusion de modèle RF	78
4.30	Comparaison entre les valeurs réelles et prédites par le RF	78
4.31	Indicateurs supplémentaires sur la performance du modèle XGB	79
4.32	F La matrice de confusion de modèle XGB	79

Liste des tableaux

1.1	caracteristiques du gaz export	6
2.1	Les différents types de pompes centrifuges	19
2.2	Caractéristiques de la pompe modèle 06-P-531-B	20
2.3	Maintenance corrective de la pompe 06-P-531-B	24
2.4	Performances de la pompe 06-P-531-C	27
2.5	Performances de la pompe 06-P-531-B	28
2.6	Performances de la pompe 06-P-531-c	29
2.7	Performances de la pompe 06-P-531-B	29
4.1	Spécifications techniques du roulement NU313 ECM	72

Introduction

Introduction générale :

L'industrie pétrolière fait face à des enjeux importants en matière de maintenance et de défaillance des équipements, avec des répercussions significatives sur la sécurité, l'environnement et les coûts. Pour remédier à ces défis, l'intelligence artificielle (IA) est devenue une solution prometteuse dans le domaine de la surveillance et du diagnostic des équipements.

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous concentrons sur l'implémentation d'un modèle d'IA pour la surveillance de la pompe 06-P-531-B située dans le Centre de Traitement de Gaz (CPF) de Tiguentorine. Notre objectif principal est de détecter les défauts de roulements NU313 ECM de cette pompe en utilisant la méthode de transformée de Fourier FFT ET l'enveloppe (HERT). Cette approche combine l'analyse des vibrations et les techniques de Machine Learning pour développer un système automatisé de détection précoce des signes de défaillance des roulements.

L'utilisation de l'IA dans le domaine de la surveillance des équipements présente de nombreux avantages, notamment la réduction des temps d'arrêt, l'amélioration de la sécurité et l'optimisation des coûts de maintenance. Ce mémoire explore en détail les principes théoriques des vibrations et de l'IA, ainsi que la méthode spécifique de transformée de Fourier FFT ET l'enveloppe HERT utilisée pour détecter les défauts de roulements NU313 ECM dans la pompe 06-P-531-B. Les résultats obtenus contribueront à renforcer les pratiques de maintenance préventive dans l'industrie pétrolière et à accroître la fiabilité des équipements.

Ce mémoire est divisé en quatre (04) chapitres :

1. **Chapitre 1** : Présentation de site Tiguentourine.
2. **chapitre2** :Caractéristiques de la pompe centrifuge 06-P-531-B
3. **chapitre3** :Analyse des vibrations pour la détection des défauts de roulement
4. **chapitre4** :LA Détection des défauts du roulement NU313 ECM à l'aide de l'IA

Chapitre 1

Présentation de site Tiguentourine

1.3 Description du projet d'in amenas :

L'association d'in amenas est une joint entre SONATRACH, BP et STATOIL.

SONATRACH « Société Nationale pour la Recherche, la Production, le transport, la Transformation, et la Commercialisation des Hydrocarbures » est une entreprise publique algérienne et un acteur majeur de l'industrie pétrolière, c'est la clé de voûte de l'économie algérienne. Le groupe pétrolier et gazier Sonatrach intervient dans l'exploration, la production, le transport par canalisation, la transformation et la commercialisation des hydrocarbures et de leurs dérivés .

British petroleum Company : C'est une compagnie britannique de recherche, d'extraction, de raffinage et de vente de pétrole fondée en 1909, Anciennement nommée Anglo-Persian Oil Company (APOC, 1909), puis Anglo-Iranian Oil Company (AIOC, 1935), puis British Petroleum Company (BP, 1954), puis BP Amoco.

Statoil : C'est une compagnie pétrolière norvégienne fondée en 1972. C'est la plus grande entreprise de Norvège avec environ 29 000 employés. Statoil est coté à la bourse d'Oslo et au NYSE, néanmoins l'État norvégien détient toujours la majorité de la société, avec 70.26.5% des actions, dont 3.26.5% par Folketrygdfondet, le fonds national d'assurances. Statoil est basée dans la capitale norvégienne du pétrole, Stavanger. Le nom Statoil vient d'une contraction de « State oil », ou Pétrole d'État .

In amenas est la plus grande opération de gaz humide en Algérie qui implique le développement et la production du gaz naturel, gaz du pétrole liquéfié(GPL) et de condensat de quatre gisement de gaz humide dans l'est de l'Algérie, environ 1519 km au sud-est d'Alger. Le projet a été démarré le mois d'avril 2006, ça capacité de production est entre de 25 et 29 millions de m³ par jour.

Actuellement le gaz humide est extrait de plus de 47 puits du champ de Tiguentourine et traité dans l'installation centrale de traitement(CPF) par élimination d'eau, le dioxyde de carbone, l'hydrogène sulfuré, le monoxyde de carbone et le mercure.

Le site de l'opération IA se compose d'un centre de traitement(CPF) avec une salle de contrôle et un laboratoire, des immeubles de bureaux (IBO) adjacents comprenant l'hébergement pour un petit nombre du personnel, atelier mécanique et des zones de stockage.

Le champ de Tiguentourine a été découvert en 1957 par les premiers puits d'exploration. Le puits TG2, qui était l'un des premiers puits foré, une importance quantité de gaz humide dans le cambro-ordoviciens, suivi de plusieurs autre puits producteurs appartenant à la SONATRACH, à l'arrivée de l'association SONATRACH-BP-STATOIL en 1998, cette dernier a transformé ces SONATRACH en monitoring et a commencé le développement du champ par le forage et la ré-complétion de nouveaux puits

1.4 Organisation de l'entreprise :

Le projet INA est organisé comme suite :



FIGURE 1.2 – Organisation Opérationnel De L'entreprise.

a-division HSE :

La division HSE a pour rôle d'assurer la sécurité du personnel, matériel et l'environnement. Elle est chargée aussi de faire les évaluations des risques en participant à la délivrance du permis de travail avant d'entrer les tâches de maintenance préventives et correctives. La revue initiale de ce département consiste à recenser les éléments nécessaires en vue d'élaborer un plan d'action et d'identifier les éléments du système existant pour la mise en place d'un système de management HSE. Dans son plan de travail le département sert à assurer la sécurité des travailleurs ou visiteurs de champs d'in amenas à travers un ensemble d'action relative à la sécurité humaine à savoir : Le département est composé des services suivants :

- Service prévention.
- Service intervention.
- Service environnement.

b- Division DEP (division Exploitation puits) :

la division exploitation est chargée d'exploiter les puits, le système de production et de collecte. Elle assure aussi l'acheminement du Gaz au CPF pour le traitement.

c- TS (Technique support) :

La division technique et support a pour rôle de :

- -Suivre la production et établir les bilans.
- -Etude et gestion de modification (Management Of Change).
- -La division apporte aussi un support technique multidisciplinaire à la maintenance à travers le service Technical autoritemnt.

d-Exploitation :

La division exploitation a pour rôle de gérer toute l'unité centrale de production (CPF), et veiller sur le bon fonctionnement de tous les équipements et machines de traitement.

e-Logistique :

La division logistique a le rôle de mettre à disposition et d'assurer tous les moyens de travail, transport, pièces de rechange...etc., pour toute l'autre division.

f-Maintenance :

La division maintenance avec ses cinq services (mécanique, électricité, instrumentation, TAR et planning) est chargée de préparer et faire toutes les opérations mécaniques électriques et instrumentation, dans l'unité centrale de production (CPF) et au niveau de système de collecte tel que les puits (maintenance corrective et préventive).dernièrement le service support était ajouté.

C

En plus une **division Projet** qui s'occupe et suivre la réalisation de plan des projets du site, et aussi des MOC. Et aussi une **direction des ressources** humaine qui s'occupe à la gestion des personnels, affaires social, et activités culturelle.

1.5 Description de l'unité centrale de traitement de gaz (CPF)



FIGURE 1.3 – l'unité centrale de traitement de gaz (CPF).

Le CPF est composé des sections suivantes :

- Installation de réception (Slug catcher).
- IACP "Boosting"
- -Trois trains identiques de traitement.
- -Section de compression de gaz résiduel.
- -Section de stockage et expédition de GPL et condensat.
- -Les utilités communes et de procès.

NOTES :

- Le CO₂ : fourchette de concentration entre 2.5% et 4.6% Mole (Design est calculé sur la base d'une teneur en CO₂ à 4% Mole).
- Gaz à saturation aux conditions du réservoir de 230 Bara et 114 °C.
- Concentration H₂S : 5 ppmv (Maximum).
- Concentration en Mercaptan : 4 ppmv.
- Le Mercure (Hg) dans le fluide d'entrée est limité à 200 ng/Sm³ .[1]

Caractéristiques du Gaz Export

Caractéristique de produit	Spécification
Dioxyde de carbone	2.0 <i>mole%</i>
Total de gaz Inertes (He, N2)	6.5 <i>mole%</i>
Hydrogène Sulfuré	≤ 2.00 ng/m ³
Hydrogène Sulfuré	≤ 1500 mg/m ³
Total Sulfure	≤ 50.00 mg/m ³
Eau	≤ 50 ppm volume
Point de rosée d'hydrocarbure	-6 à 81.5 Bara
Pression au point de piquage	70 bar g

TABLE 1.1 – caractéristiques du gaz export

[1]

Qualité produit finis :

GAZ RESIDUEL :

Méthane (CH₄) = 89% Ethane (C₂H₆)=8% GPL : Propane (C₃H₈) = 69% Butane(C₄H₁₀) = 26%

CONDENSATS :

Butanes =4% Pentanes = 8% Hexanes = 18% Heptanes et plus = 67%

A. Installation de réception :

Le fluide provenant du manifold d'admission entre dans le Slug Catcher où aura lieu la première séparation du gaz humide en trois phases vapeur, liquide hydrocarbures et eau. Le slug catcher sert également de stockage temporaire des liquides et permet la tranquillisation des débits transitoires d'eau et des hydrocarbures liquides accumulés dans les canalisations des systèmes de collecte. - La vapeur sortante du Slug Catcher (00-V-051) est combinée et envoyée vers les trois trains de traitement sous contrôle de pression. - Le débit des hydrocarbures liquides alimentant le séparateur de pré-flash d'entrée de chaque train (01/02/03-V-211). - L'eau produite est évacuée sous le contrôle de niveau vers chacun des ballons de dégazage des trois trains (01/02/03-V-281).[1]

A.1 Traitement de la phase vapeur :

La vapeur (gaz) sortante du slug catcher alimente les 3 trains qui sont identiques.

A.2 Refroidissement et séparation du gaz d'entrée :

La pression du gaz sortant du slug catcher à destination du train de traitement de gaz est normalement contrôlée à 71,3 bars g. Durant les mois d'été, la température du gaz peut atteindre 82°C ; il est donc refroidi à une température de 56°C dans l'aéroréfrigérant d'entrée (01-E-101). En hiver avec une température ambiante aussi basse que -5°C, la température du gaz peut descendre jusqu'à 25°C et l'aéroréfrigérant d'entrée (01-E-101) est by-pass pour éviter la formation d'hydrate. Le gaz sortant de l'aéroréfrigérant (01-E-101) est combiné avec le gaz provenant de l'aéroréfrigérant (01-E-262) de l'unité de récupération des vapeurs d'hydrocarbures (VRU) et entre dans le séparateur d'entrée

(01-V-101). Ce ballon sépare les hydrocarbures liquides et l'eau et les dirige respectivement vers le séparateur de pré-flash d'entrée des hydrocarbures liquides (01-V-211) et le séparateur de l'eau produite (01-V-281), sous contrôle de niveau. [1] **A.3. Désulfuration et dé-mercurisation :**

Les teneurs en Sulfure d'hydrogène (H₂S) et en mercure dans le gaz humide peuvent atteindre respectivement, 5 ppm/volume, 200 ng/Sm³. Environ 75 du gaz sortant du séparateur d'entrée (01-V-101) est dirigé vers l'absorbeur de H₂S et Hg (01-V-1110), et 25% vers l'absorbeur de mercure (01-V-1112). L'absorbeur de H₂S (01-V-1110) contient le catalyseur PURASPEC 1038 qui élimine l'H₂S et le mercure. L'absorbeur de mercure (01-V-1112) contient le catalyseur PURASPEC 1156 qui élimine seulement le mercure. Le gaz provenant de chacun des absorbeurs est recombinaé et entre dans une batterie de filtre (01-V-111 A/B) où les liquides et les particules du catalyseur entraînés sont éliminés. La teneur en mercure du gaz recombinaé est ramenée à moins de 10 ng/Sm³ ce qui évite des dommages aux échangeurs en aluminium dans les sections cryogéniques du centre de traitement. La teneur en H₂S du gaz recombinaé est ramenée à moins de 2 ppm/Volume afin de satisfaire les spécifications du gaz de vente[1]

A.4 Décarbonatation :

La teneur en CO₂ du gaz est contrôlée en traitant une partie du gaz sortant des filtres (01-V-111 A/B) après la désulfuration dans la colonne d'absorption, qui est verticale contenant deux lits à garnissage aléatoire de type Métal Intalox. Le gaz d'alimentation entre par le fond de l'absorbeur et s'écoule en amont vers la colonne jusqu'aux deux lits à garnissage où il est en contact avec le solvant d'amine pauvre en CO₂. Le gaz décarbonaté sort par la tête de l'absorbeur et le solvant d'amine riche en CO₂ est collecté au fond. Le gaz traité passe vers le haut d'un ballon tampon 01-V-114 pour récupérer des gouttelettes d'amine riche en CO₂. La quantité de gaz qui passe dans cette unité est régulée par un régulateur de débit et ajustée de sorte que la teneur en CO₂ soit maintenue à moins de 2% mole. La partie du gaz traitée dans l'unité de décarbonatation est mélangée au gaz non traité et au gaz de régénération des sécheurs. L'absorbeur de CO₂ fonctionne à une pression de 69.2 bar et alimenté par le solvant à une température de 58°C.[1]

A.5 Régénération d'amine :

La fonction du régénérateur d'amine est d'enlever le CO₂ de la solution d'amine sortante

A.6 Déshydratation : Le gaz pauvre en CO₂ alimente l'unité de déshydratation (01-V-103) où l'eau est éliminée du gaz pour éviter la formation d'hydrate dans la section froide de l'installation. Les trois ballons parallèles de déshydratation de gaz contiennent un adsorbant de type tamis moléculaire. Durant le cycle d'adsorption le gaz circule de haut en bas et en sens inverse durant le cycle de régénération. Durant l'exploitation normale, deux dés-hydrateurs sont en service alors que le troisième est en régénération. La teneur en eau du gaz sortant des dés hydrateurs (01-V-121 A/B/C) devra être inférieure à 0,1ppmv. Le gaz utilisé pour la régénération (01-V-121 A/B/C) est pris du gaz sec à la sortie des dés hydrateurs qui est d'environ de 12% , puis il est comprimé jusqu'à 72,5 bar par des compresseurs (01-C-121 A/B) ce qui permet de faire circuler le gaz dans la boucle de régénération en passant par des étapes intermédiaires de refroidissement et de récupération d'eau.[1]

A.7 Boite froide et Séparation :

Le gaz sec venant des sécheurs est refroidi à une température d'environ 12,5 °C dans

la Boite froide 01-E-141 (échangeur à plaques fabriqué en aluminium brasé) par le gaz de tête du dé-éthaniseur et celui du ballon d'alimentation (01-V-141) du turbo-expandeur. Le gaz sortant de la boite froide partiellement condensé entre dans le ballon 01-V-141, où les liquides condensent et les gaz sont séparés. Le liquide sortant du fond du 01-V-141 est vaporisé à travers une vanne et chauffé à environ 29°C dans la boite froide (01-E-141). Et 26% du gaz sortant par la tête du ballon 01-V-141 et sous refroidit jusqu'à -69°C par les gaz de tête. A.8 Turbo-Expandeur : Les 74% du gaz sortant de la tête du ballon (01-V-141) est détendu dans le coté Expandeur du turbo-expandeur (C-141) jusqu'à environ 17,8 bar, il alimente ensuite le 15^{iem} plateau du dé-éthaniseur (01-V-151), l'énergie extraite par l'expandeur est utilisée pour entraîner le compresseur du turbo-expandeur (01-C-141) qui comprime le gaz sortant de la tête du dé-éthaniseur jusqu'à 23 bar pour assurer la pression d'admission des compresseurs d'expédition. Lors d'un déclenchement ou d'une indisponibilité du Turbo-Expandeur, une vanne Joule-Thomson PV1420 assure le fonctionnement continu du train. Toutefois, la chute de pression due à l'arrêt du compresseur doit être compensée par l'augmentation de la pression du dé-éthaniseur à 27 bar, pour éviter la surcharge des compresseurs de gaz export (pression d'aspiration 23 bar). La pression du dé-éthaniseur (27 bar) doit maintenir en tenant compte des pertes de charge de la pression d'aspiration des compresseurs à 23 bar. Dans le cas de l'utilisation de la vanne J-T, la récupération des liquides est réduite d'une manière significative[1]

A.9 Dé-éthaniseur :

Le dé-éthaniseur (01-V-151) est conçu pour séparer l'éthane et les composants plus légers du propane et des composants lourds. L'éthane sort en tête de la colonne tandis que les produits lourds sortent du fond de colonne pour alimenter le débutaniseur. Le dééthaniseur est composé de 33 plateaux à soupape à deux voies. Une première alimentation froide provient de l'expandeur et entre au 15^{ème} plateau. Une deuxième alimentation chaude constituée de liquides vaporisés provenant du fond du ballon (01-V-141) à travers le (01-E-141) le (01-E-103) alimente le 27^{ème} plateau. Le débit de reflux est assuré par une partie des gaz du ballon (01-V-141) refroidi via le (01-E-141) et une vanne de détente. La température et la pression de la tête de colonne sont respectivement de -72°C et 17,3 bar. Dans le cas de l'utilisation de la vanne JT (Turbo-Expandeur à l'arrêt) les valeurs de ces paramètres seront respectivement de -16°C et 27,0 bar [1]

A.10 Traitement du liquide hydrocarbure : Les hydrocarbures liquides provenant du slug catcher (00-V-051) et du traitement du gaz humide sont ramenés à une pression d'environ 30 bar et alimentent le séparateur de pré-flash des hydrocarbures liquides (01-V-211). Dans ce séparateur les hydrocarbures liquides et l'eau sont séparés des gaz légers (en particulier l'azote, le méthane et l'éthane). Le liquide passe ensuite dans le filtre coalesceur (01-V-213A/B) qui éliminent toute eau libre restante. En fonctionnement normal la pression de la tête du stabiliseur est maintenue 19,7 bar.[1]

A.11 Stabilisation du condensât :

Les hydrocarbures liquides prévenant du coalesceur alimentent le stabiliseur de condensât (01-V-221) au 1^{er} plateau (tête), le stabiliseur est conçu pour séparer l'éthane et les composants plus légers du propane et des composants plus lourds, et elle est composé de 20 plateaux a soupapes. Toute eau libre accumulée sur le plateau supérieur (plateau de tête) est envoyée au ballon dégazeur d'eau produite (01-V-281) pour rejet[1]

A.12 Débutaniseur :

Le débutaniseur (01-V-231) est alimenté par le propane et les composants plus lourds venant du stabiliseur. Ce dernier est conçu pour séparer le butane et les composants plus légers du pentane des composants les plus lourds. Le produit de tête quitte la colonne puis se condense dans le ballon de reflux (01-V-232) où une partie de liquide collecté est renvoyé vers la tête du débutaniseur comme débit de reflux et le reste vers stockage comme GPL. Les produits lourds quittent le fond du débutaniseur sous contrôle de niveau comme condensât Envoyer pour stockage en passant par la batterie d'échangeurs (01-E-233 A/B). Le débutaniseur est composé de 36 plateaux à soupapes à deux voies et reçoit deux alimentations, une première charge provenant du fond du dééthhaniseur entre au 16eme plateau après préchauffage à 106°C dans la batterie d'échangeurs (01-E-233 A/B), une deuxième alimente le 26 ème plateau à partir du fond du stabiliseur (01-V-221).[1]

A.13 Eau produite : Eau produite provenant des équipements suivants : Slug catcher, Séparateur Gaz/Condensât d'entrée, Séparateur d'alimentation déshydratation, Epurateur de gaz de régénération, Coalesceur de liquide D'aspiration, Séparateur d'entrée « pré-flash de condensât » et le stabilisateur, s'écoulent vers le ballon de Flash d'eau puis dirigé vers les bassins d'évaporation.

A.14 Stockage du condensat et GPL : Dans ce centre de traitement on a deux types de stockages : - Stockage du condensat dans des bacs. - Stockage du GPL dans des ballons cylindriques.

A.15 Stockages du GPL :

Les bacs de stockage du GPL sont des ballons sous pression cylindriques où la pression est de 16.3bar et la température de 60°C jusqu'à 91°C. Il y a 8 bacs de stockage de GPL divisé en 2 groupe de 4 (4 pour le on-spec et 4 pour le off-spec) chaque groupe partage les canalisations communes d'entrée et de sortie et la canalisation d'équilibrage de vapeur pour relier l'espace de vapeur de chaque bac qui est assuré par le gaz carburant

A.16 Stockage du condensat : Les deux réservoirs de stockage du produit condensât on-spec sont de type toit flottant avec une capacité de 7950m³ et d'une autonomie de 24H. Le condensât est stocké à la pression atmosphérique et approximativement 56°C. Le condensât Off-Spec produit durant des conditions de perturbations ou de conditions anormales d'exploitation est dirigé vers le ballon de dégazage de condensât puis envoyé au bac de stockage de condensât Off-Spec qui est de type a toit fixe [1]

A.17 Pompes d'expédition du GPL :

Les pompes booster GPL sont des pompes verticales multi étage équipées d'une cuvette cylindrique entraînées par des moteurs électriques, et fonctionne à une pression d'aspiration de 17.3 bar et à une pression de refoulement normale de 22.6 bar. La température de refoulement dépend aux conditions de stockage mais est prévue d'être au environ 60°C. Les pompes principales GPL sont des pompes centrifuge horizontales multi -étage entraînées par des moteurs électriques, et fonctionne à une pression d'aspiration de 22.6 bar et à une pression de refoulement normale de 95.8 bar. La température de refoulement dépend aux conditions de stockage mais est prévue d'être au environ 60°C. [1]

A.18 Les pompes d'expédition du condensat :

Les pompes booster du produit condensât sont entraînées par des moteurs électriques, et fonctionne avec une pression d'aspiration de 1.05 bar et une pression de refoulement normale de 3.02 bar. La température de refoulement dépend des conditions de stockage

mais est prévue pour être 57°C. Les pompes principales de pipeline de produit condensât sont centrifuge, horizontale, multi-étage, entraînées par des moteurs électriques, et elles fonctionnent avec une pression d'aspiration de 2.7 bar et une pression de refoulement normale de 79 bar. La température de refoulement dépend des conditions de stockage mais est prévue pour être autour de 57°C. A.19 Compresseur du gaz résiduel : Les compresseurs du gaz Résiduel sont des compresseurs centrifuges, entraîné par des turbines à gaz et qui sert à augmenter la pression du gaz de 24 bar à une pression environ 85 bar. Les performances des compresseurs sont ajustées en changeant la vitesse de la turbine pour maintenir la pression du collecteur d'aspiration à la valeur désirée. La température du gaz comprimé augmente, le gaz sort du compresseur à une température environ 183°C puis refroidi jusqu'à 57°C.

A.19 Description des utilities :

Les systèmes des utilities requis pour les installations centrales de traitement à IN AMENAS sont décrits ci-dessous :

A.19.1 Gaz Combustible :

Les installations du CPF sont autonomes quant aux besoins en Gaz combustible pendant le fonctionnement normal. Le système de gaz combustible comprend un réseau de gaz combustible HP pour tenir compte des exigences des surchauffeurs de gaz combustible, des turbines de gaz des compresseurs de gaz export, des turbines des générateurs électriques, des cigares de stockage de GPL pour couverture et du système de gaz combustible BP. Le système de gaz combustible BP alimente les fours de chauffe, la purge de gaz des collecteurs de torche ainsi que les brûleurs de bec de torche. Au démarrage, une alimentation de gaz combustible dédiée est disponible à partir de la canalisation d'évacuation de gaz export, acheminée directement jusqu'à l'épurateur.

A.19.2 Carburant Diesel :

Le carburant diesel est fourni à l'installation dans des camions citernes et déchargé dans un réservoir de stockage pour assurer l'alimentation des pompes eau anti-incendie et le générateur de secours.

A.19.3 Système d'huile chaude :

L'objectif du système de circulation d'huile chaude est d'assurer les besoins en chauffage du procès et des utilities. La chaleur provient de trois unités de récupération et de deux fours de chauffés. L'huile chaude alimente tous les rebouilleurs du CPF, échangeurs de chaleur d'huile chaude et réchauffeurs de gaz de régénération. [1]

A.19.4 Torche à haute pression :

Les trois trains de traitement et les compresseurs de gaz export partagent un système d'évacuation et de purge composé d'un réseau de tuyauterie de collecte, d'un ballon tampon de torche haute pression et d'une torche haute pression avec brûleur continu.

A.19.5 Fosse de brulage :

Une fosse de brûlage est également fournie pour brûler les liquides hydrocarbures provenant du système de drainage fermé et des ballons tampons de la torche HP.

A.19.6 Torche basse pression :

L'objectif du système de torche basse pression est d'éliminer les vapeurs des ballons de dégazage de condensât et des réservoirs de condensât Off-spec. La torche est constituée d'un réseau de tuyauterie et d'une cheminée de torche à basse pression.

A.19.7 Système d'air instrument et d'utilité :

L'air instrument et d'utilité est fourni par un système autonome constitué de cinq (5) Compresseurs lubrifiés mono étages à vis, d'un réservoir d'air humide, d'une unité de séchage avec filtres et d'un réservoir d'air instrument. Le système de distribution d'air instrument fonctionne à environ 8barg. L'air d'utilité représente la source d'alimentation du système de génération d'azote.[1]

A.19.8 Système de génération de gaz inerte (azote) : L'azote est utilisé à travers l'unité pour maintenir une pression positive sur les équipements Contenant des hydrocarbures et la purge des équipements contenant des hydrocarbures ou de l'oxygène pendant les arrêts pour maintenance et inspection. L'azote est extrait de l'air instrumenté dans une unité d'azote, en utilisant des séparateurs par membranes. [1]

A.19.9 Système d'eau utilitaire : Les pompes de distribution d'eau brute fournissent l'eau à partir des trois réservoirs de stockage d'eau brute, au réservoir de stockage eau anti-incendie, l'unité d'eau déminéralisée (dotée de deux réservoirs de stockage d'eau déminéralisée) et les deux réservoirs de stockage d'eau domestique, par une unité de traitement / filtration d'eau de puits qui assure une filtration et ensuite le traitement pour obtenir une qualité d'eau potable. L'eau brute est également pompée jusqu'à la "base de vie" et le Camp de l'entrepreneur via une canalisation. L'eau domestique est distribuée aux installations sanitaires via des pompes d'eau domestique. Le système d'eau déminéralisée est utilisé pour alimenter les unités de décarbonatation avec l'eau d'appoint.

A.19.10 Système de drainage fermé :

Tous les fluides pressurisés avec un potentiel de libérer d'importants volumes de vapeurs d'hydrocarbures pendant la dépressurisation vers l'atmosphère, sont acheminés vers le ballon de drainage fermé connecté directement au système de torche commun pour une évacuation sans danger des vapeurs d'hydrocarbures.

A.19.11 Système de drainage ouvert et de surface :

Les liquides provenant des trois réservoirs de vaporisation d'eau produite s'écoule dans un séparateur d'interception à tôle ondulée (CIP) pour la séparation et l'élimination du condensât d'hydrocarbures. Le condensât déborde dans le puisard d'hydrocarbures (huile) d'un séparateur API. L'eau est collectée dans les systèmes de drainage ouverts souterrains ou au-dessous du niveau de sol.

A.19.12 inhibiteurs de corrosion :

L'inhibiteur de corrosion est injecté continuellement dans les courants de fluide de puits, à chaque tête de puits, par des systèmes dédiés d'injection d'inhibiteur de corrosion afin de protéger la tuyauterie et les équipements contre les taux de corrosion élevés. Les inhibiteurs de corrosion de la phase vapeur doivent être utilisés comme requis par le contrôle continu des taux de corrosion. Ces inhibiteurs sont injectés dans les lignes de vapeur avant la déshydratation au niveau du capteur-bouchon

A.19.13 Système d'injection de méthanol : L'objectif du système de méthanol est de dissoudre les hydrates pouvant se produire périodiquement dans les équipement froids tels que les échangeurs de chaleur, ballons et lignes de gaz ainsi que dans les courants de gaz naturel pressurisé à des températures aussi chaude que 18°C en présence des traces

d'eau condensée.

A.33 Production d'électricité :

L'électricité au CPF est fournie par trois générateurs de 11 KV entraînés par turbines à gaz, de Puissance nominale de 18.6 MW chacune à une température d'entrée de 45 degrés Celsius. Dans des Conditions de fonctionnement normal, deux des générateurs fourniront les exigences en matière d'électricité du CPF et de l'infrastructure, alors que le troisième générateur est en réserve.[1]

1.6 conclusion

le traitement de gaz dans un CPF est un processus complexe et technologiquement avancé, mettant en œuvre une combinaison d'équipements, tels que les pompes, les compresseurs et les turbines. Grâce à ces équipements, le CPF est en mesure de traiter efficacement le gaz naturel, assurant ainsi sa qualité et sa conformité aux exigences du marché.

Chapitre 2

Caractéristiques de la pompe centrifuge 06-P-531-B

Introduction

Les pompes sont des machines servant à élever les liquides ou les mélanges de liquides d'un niveau inférieur à un niveau supérieur, ou refouler les liquides d'une région à faible pression vers une région à haute pression. Le fonctionnement d'une pompe consiste à produire une différence de pression entre la région d'aspiration et la région de refoulement au moyen de l'organe actif (piston, roue,...etc.) de la pompe. Du point de vue physique, la pompe transforme l'énergie mécanique de son moteur d'entraînement en énergie hydraulique.

2.1 Types des pompes

Suivant le mode de déplacement des liquides entre la région d'aspiration et de refoulement, on divise les pompes en deux grands groupes :

1. Les pompes volumétriques.
2. Les pompes centrifuge centrifuge

2.1.1 Les pompes volumétriques

Les pompes volumétriques sont constituées d'un volume hermétiquement clos (corps de pompe) à l'intérieur duquel se déplace un élément mobile engendrant soit une dépression à l'aspiration, soit l'impulsion nécessaire au refoulement afin de vaincre la contre-pression régnant à l'aval de la pompe, soit enfin l'une et l'autre de ces fonctions et permettant ainsi le transfert d'un volume de liquide, de viscosité plus ou moins importante, depuis l'aspiration vers le refoulement. Le fluide véhiculé étant incompressible, ces pompes sont toujours équipées d'un dispositif de sécurité d'excès de pression associé. Les pompes volumétriques caractérisées par une grande diversité d'emploi et une grande variété de réalisations technologiques. On se limitera ici, à la présentation de quelques types de ces deux grandes familles de machines tournantes [2]

2.1.1.1 Pompes volumétriques alternatives

2.1.1.2 Pompes volumétriques rotatives

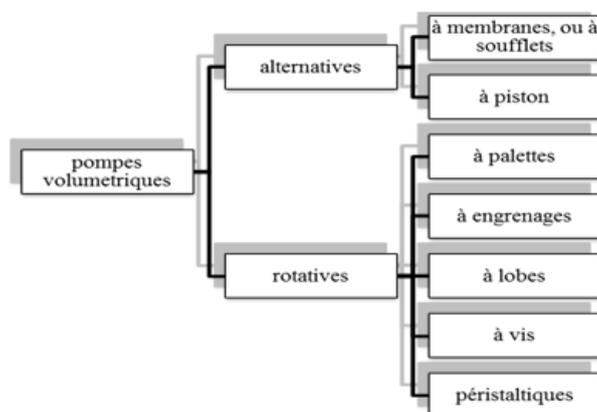


FIGURE 2.1 – Les types des pompes volumétriques.

2.1.2 Les pompes centrifuges

Ce sont des pompes hydrodynamiques d'une construction très simple : en version de base, elles sont essentiellement constituées d'une pièce en rotation, le rotor appelé aussi roue ou hélice qui tourne dans un carter appelé corps de pompe. Une certaine vitesse est ainsi communiquée au fluide. La différence entre les pompes centrifuge hélico-centrifuge et à hélice porte essentiellement sur la direction de la vitesse donnée au fluide.[3]

2.1.2.1 fonctionnement d'une pompe centrifuge

Elément actif principale de la pompe, la roue ou le rotor qui tourne à grande vitesse, transmet au liquide un surplus de pression et le rejette à une grande vitesse supérieure à sa vitesse initiale dans le diffuseur entre les aubes à recevoir le liquide sort du rotor et le courant liquide se produit une interaction qui a pour résultat de provoquer la transformation de l'énergie mécanique en énergie hydraulique.

2.1.2.2 Classification des pompes centrifuges

La classification des pompes centrifuge est basée sur la forme de la trajectoire du liquide à l'intérieur du rotor, mais aussi la variété des types de classification[3] dont les critères les plus souvent utilisée sont :

a. la disposition de l'axe

- axe horizontale.
- axe vertical.
- axe incliné.

b. le nombre de récupération

- -Un seul étage (monocellulaire)
- - Plusieurs étages (multicellulaires)

c. le type de récupération

- Pompe avec diffuseur.
- Pompe avec ailettes.
- Pompe avec volute.

d. l'importance de la pression engendrée

- -Pompe à base pression.
- -Pompe à moyenne pression.
- -Pompe à haute pression.

e. Le moyen d'entraînement

- -Entraînement par courroie.
- -Entraînement par accouplement direct.

f. la force de roue

- Roue à simple aspiration.
- Roue à double aspiration.

g. la destination

- -Pompe à eau.
- -Pompe à acide.
- -Pompe à liquide chargé.

h. La force motrice utilisée

- -Moteur électrique.
- -Moteur diesel.

2.1.2.3 Les avantages et les inconvénients des pompes centrifuges

Pour les avantages :

1. ce sont des machines de construction simple, sans clapet ou soupape, d'utilisation facile et peu coûteuses à caractéristiques égales, elles sont plus compactes que les machines volumétriques .
2. elles sont adaptées à une très large gamme de liquides
3. leur débit est régulier et le fonctionnement silencieux
4. Construction simple en général, une seule pièce en mouvement : le rotor.
5. Prix peut élever.
6. Encombrement réduit.
7. Jeu assez large, donc facilité de manipuler des liquides contenant des solides en suspension.
8. Entretien en général peu coûteux.
9. Peu d'influence de l'usure ou de la corrosion sur les caractéristiques.
10. Très large gamme de qualités matières suivant le service requis.
11. Faible NPSH requis en général.
12. Grande flexibilité d'utilisation.

Du côté des inconvénients :

1. impossibilité de pomper des liquides trop visqueux.

2. Production d'une pression différentielle peu élevée (de 0, 5 à 10 bar).
3. Elles ne sont pas auto-amorçantes.
4. À l'arrêt ces pompes ne s'opposent pas à l'écoulement du liquide par gravité (donc, vannes à prévoir. . .)
5. Débit légèrement instable dans les basses valeurs difficulté de contrôler le débit.
6. Débit et pression de transport interdépendants.
7. Faible rendement.

2.2 Caractéristiques des pompes centrifuges :

2.2.1 Débit de la pompe

Débit théorique : Le débit théorique caractérisé par la pompe idéale, là où n'existent pas des fuites de liquides véhiculé, il est donné par la formule suivant[3] :

$$Q = V \cdot 2\pi r b \quad (2.1)$$

ou :

- **V** : La vitesse radiale à la sortie de la pompe.
- **r** : Le rayon extérieur de la même roue.
- **b** : Largeur de fonte de la roue de sortie.

Débit réel : Le débit réel diffère du débit théorique à cause des fuites .Ces pertes de débit sont : Pertes extérieur qui peuvent être éliminées par un système d'étanchéité. Pertes intérieures dues aux jeux fonctionnels entre la partie statique et la partie mobile, ces pertes doit être minimaux :

$$Q_r = Q_t - q_r \quad (2.2)$$

D'où

- **Qt** : Débit théorique en circulation.
- **qr** : Débit de fuites.

2.2.2 Les pertes au niveau de la pompe

Il existe plusieurs types de pertes qui sont :

a. Perte d'énergie massique :

C'est pertes sont deux types :

- Pertes par frottement dans la roue et dans le diffuseur.
- Pertes par choc à l'entrée de la roue et l'entrée du diffuseur.

b. Pertes par fuites :

On distingue deux types de ces pertes :

- Fuite extérieure.
- Fuite intérieure.

c. Pertes de puissance mécanique :

Cette perte est au niveau des paliers de frottement de disque de la roue de liquide.

2.2.3 La charge d'une pompe

a) Hauteur théorique :

C'est une hauteur assurée par une pompe idéale dans laquelle les nombres des aubes est fini, l'épaisseur des aubes est nulle ainsi que dans la pompe ne se produit aucune perte d'énergie disposée à faire tourner le rotor est transmise intégralement au liquide[3].

$$Ht = (1/g)(U^2.V^2u) \quad (2.3)$$

Ou :

- U^2 : est la vitesse tangentielle à la sortie de la roue.
- V^2u : est la projection de (V) suivant la direction de (U).

b) Hauteur réel

Dans le cas réel ou la condition d'une pompe idéale n'est pas vérifiée d'où on aura une notion de la hauteur réelle donnée par la formule suivante :

$$H = K.Ht.h \quad (2.4)$$

Ou :

- K : coefficient qui tient compte du nombre d'aubes.
- h : rendement hydraulique de la pompe.

2.2.4 Les rendements de pompes

Par définition on appelle Rendement net de la pompe c'est la quantité d'énergie fournie à la pompe par rapport l'énergie fournie au fluide[3]

$$\text{Rendement net de la pompe} = \frac{\text{Énergie fournie à la pompe}}{\text{Énergie fournie au fluide}}$$

2.2.4.1 Rendement mécanique

$$\text{Rendement mécanique} = \frac{\text{Travail utile}}{C_a \cdot \omega} \times 100$$

- ω : la vitesse angulaire de rotation de l'arbre de la roue.
- C_a : est le couple des forces appliqué à l'arbre de la roue.

2.2.5 Rendement hydraulique

:

$$\text{Rendement hydraulique} = \frac{\text{Puissance hydraulique utile}}{\text{Puissance hydraulique fournie}} \times 100$$

2.2.5.1 Rendement manométrique

:

$$\text{Rendement hydraulique} = \frac{\text{Puissance hydraulique utile}}{\text{Puissance hydraulique fournie}} \times 100$$

2.2.6 Rendement volumétrique

$$\text{Rendement volumétrique} = \frac{\text{Débit volumétrique réel}}{\text{Débit volumétrique théorique}} \times 100$$

$$\text{Débit volumétrique théorique} = A \cdot V$$

- **A** : représente la section transversale de la chambre de la pompe, exprimée en m²
- **V** : correspond à la vitesse du fluide à la sortie de la pompe, exprimée en m/s.

On peut montrer que :

$$\eta = \eta_M \cdot \eta_h \cdot \eta_m \cdot \eta_v \quad (2.5)$$

-
- η représente le rendement global,
- η_M représente le rendement mécanique,
- η_h représente le rendement hydraulique,
- η_m représente le rendement volumétrique,
- et η_v représente le rendement global.

2.3 Phénomène de cavitation

Le problème de cavitation est un problème qui peut arriver durant le fonctionnement de notre pompe. La pompe centrifuge est faite pour pomper un liquide, on peut imaginer qu'elle fonctionne correctement que si aucune vapeur ne se forme. Donc, toutes les pompes centrifuges ne fonctionnent pas normalement qu'au cas où la pression absolue à l'entrée de ces dernières n'est pas trop faible. Dans le cas contraire, à l'entrée du liquide dans les carreaux formés par les aubes du rotor, la pression absolue atteint une valeur minimum, la cavitation fait son apparition. Le fonctionnement normal des pompes centrifuges est assuré par une pression absolue suffisante à l'entrée de la pompe. Au cas où la pression absolue du liquide à l'entrée atteint la tension du vapeur à la température ambiante, il se produit à cet endroit une évaporation et un dégagement intense de gaz, ceci est causé par une diminution locale de la pression portant le nom de cavitation[4].

2.3.1 Endroits attaqués par la cavitation

Les aubes de la roue, les ailettes directrices et les surfaces limitant le passage de liquide dans la pompe peuvent être endommagés par la corrosion, l'érosion et la cavitation. Au stade initial de la cavitation, l'écrasement des bulles de vapeurs se termine dans l'enceinte de la roue. Au stade de cavitation complètement développer le majeur parti des bulles est écrasés dans la roue, et le reste est entraîné dans la directrice à ailette et la volute. Alors ces éléments sont endommagés par l'impulsion des bulles[4].

TABLE 2.1 – Les différents types de pompes centrifuges

Tag num	Liquide	Asp (bar)	Ref (bar)
01.02.03-P-112	AMINE	4	67
05-P-412	GPL Off-Spec	16.5	25
00-P-115	AMINE	0.1	6
00-P-119	Hydrocarbure	0.1	6
00-P-118	Amine	6	13
01.02.03-P-111	Amine	0.5	1
06-P-581	Fuel Diesel	1	4
08-P-581	Fuel Diesel	1	4
06-P-521	Eau brut	1	5
06-P-541	Eau d'utilité	1	8
06-P-551	Eau déminéralisé	1	13
06-P-531	Eau traité domestique	1	13
08-P-531	Eau traité domestique	1	13
12-P-531	Eau traité domestique	4	25
06-P-572	Huile & eau diesel	0.1	2
05-P-411	GPL	25	110
05-P-413	GPL	17	25
05-P-431	Condensât	13	65
05-P-434	Condensât	1	13
06-P-322	Huile chaude	1	3
01.02.03-P-113	Amine	1	5.5
01.02.03-P-117	Amine Riche	0.1	1
01.02.03-P-231	GPL	16	25
05-P-432	Condensât	0.05	5
05-P-433	Condensât off-spec	1	13
06-P-323	Huile chaude	0.1	5
06-P-341	Condensât	2	13
06-P-561	Eau de procès	1	15
01.02.03-C-141 P1A	Huile de lubrification	5	45
01.02.03-C-141 P1B	Huile de lubrification	5	45
01.02.03-C-141 P2	Appoint d'huile	1	5
06-P-601/602	Eau d'incendie CPF	2	14
08-P-601/602	Eau d'incendie BDV	2	14
06/08-P-603	Eau d'incendie CPF/BDV	1	6.5

Parmi toutes ces dernières pompes notre étude sera sur La **pompe à eau domestique**, modèle **06-P-531-B**

2.4 description de la pompe à eau domestique 06-P-531-B

La pompe 06-P-531-B est un équipement dédié à assurer l'approvisionnement en eau domestique dans les CPF (Centres de Traitement des Hydrocarbures) et les bâtiments,

même en cas de besoin du système de secours d'eau domestique (BDV). Cette pompe mono-étage, couplée à un moteur électrique, est spécifiquement conçue pour répondre à ces exigences de fonctionnement.

Avec sa capacité normale de 30 m³/h, la pompe 06-P-531-B peut fournir un débit adéquat pour les besoins en eau domestique. Elle est capable de gérer une pression d'aspiration maximale/nominale allant de 1,78 à 0,85 bar, avec une pression de refoulement de 16,90 bar. La pompe peut également générer une hauteur de refoulement de 169 m et dispose d'un NPSHA (Net Positive Suction Head Available) de 7,1 m.

Elle fonctionne avec une tension de 400 V et est équipée d'un moteur électrique pour fournir la puissance nécessaire au fonctionnement de l'impulseur. Le diamètre maximal de l'impulseur est de 341 mm. La puissance nominale du moteur est de 40,7 kW, et l'efficacité de la pompe est de 37

TABLE 2.2 – Caractéristiques de la pompe modèle 06-P-531-B

Modèle	06-P-531-B
Capacité	30 m ³ /hr
RPM	2970
Puissance	40.7 kW
Nombre d'étages	1
Montage	Horizontal
Couplage	Metastream TSKS 0075 Dry
Roulements DE	NU313EC
Roulements NDE	NU313EC
Roulement de butée	7312BECB
Numéro de série	03.21034.00

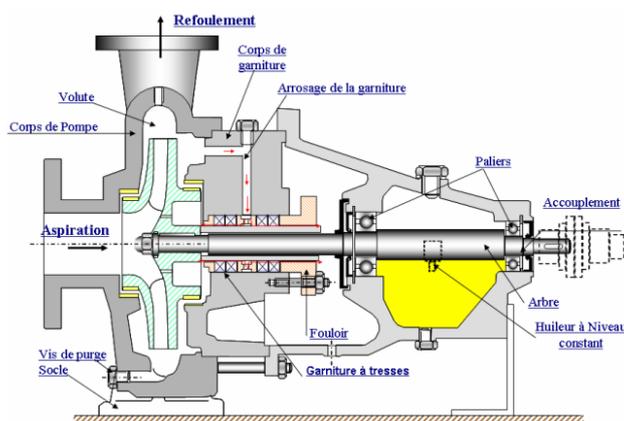


FIGURE 2.2 – Les différents composants de la pompe 06-P-531 B

voici une liste des composants :

1. **Corps de pompe** : Il abrite les composants internes de la pompe et assure le passage du fluide à travers la pompe.
2. **Impulseur** : Il est responsable de la conversion de l'énergie mécanique du moteur en énergie cinétique pour déplacer le fluide.

3. **Diffuseur** : Il guide le fluide sortant de l'impulseur et convertit l'énergie cinétique en énergie de pression.
4. **Garniture mécanique** : Elle assure l'étanchéité autour de l'arbre de la pompe pour empêcher les fuites de fluide.
5. **Arbre** : Il transmet la rotation du moteur à l'impulseur pour générer le mouvement du fluide.
6. **Roulements (paliers)** : Ils soutiennent l'arbre de la pompe, réduisent les frottements et absorbent les charges radiales et axiales.
7. **Joint d'arbre** : Il assure l'étanchéité entre l'arbre de la pompe et le corps de pompe pour éviter les fuites.
8. **Volute** : Elle entoure l'impulseur et le diffuseur, fournissant une forme en spirale pour guider le flux de fluide.
9. **Orifice d'aspiration** : C'est l'ouverture par laquelle le fluide est aspiré dans la pompe.
10. **Orifice de refoulement** : C'est l'ouverture par laquelle le fluide pressurisé est évacué de la pompe.
11. **Moteur** : Il fournit l'énergie nécessaire pour faire tourner l'arbre et l'impulseur de la pompe. Le moteur peut être électrique, à combustion interne ou hydraulique, selon le type de pompe et l'application spécifique.
12. **Garniture mécanique** : Elle assure l'étanchéité autour de l'arbre de la pompe pour empêcher les fuites de fluide. La garniture mécanique est composée de joints et de bagues d'étanchéité qui permettent la rotation de l'arbre tout en maintenant l'étanchéité.

2.4.1 plane technique de la pompe 06-P-531-B

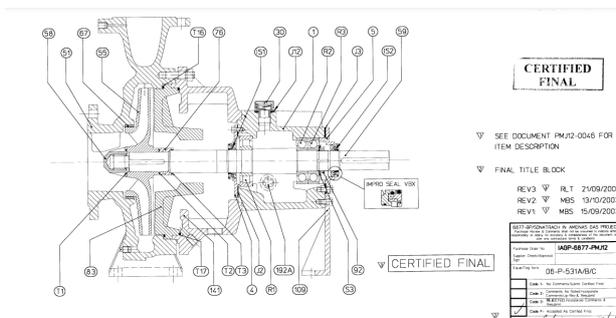


FIGURE 2.3

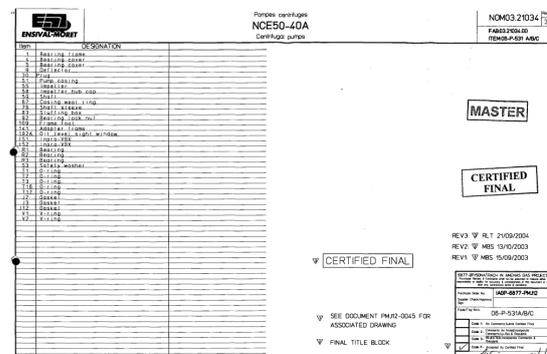


FIGURE 2.4

FIGURE 2.5 – Plan technique de la pompe 06-P-531-B.

2.4.2 La pompe dans le processus processus

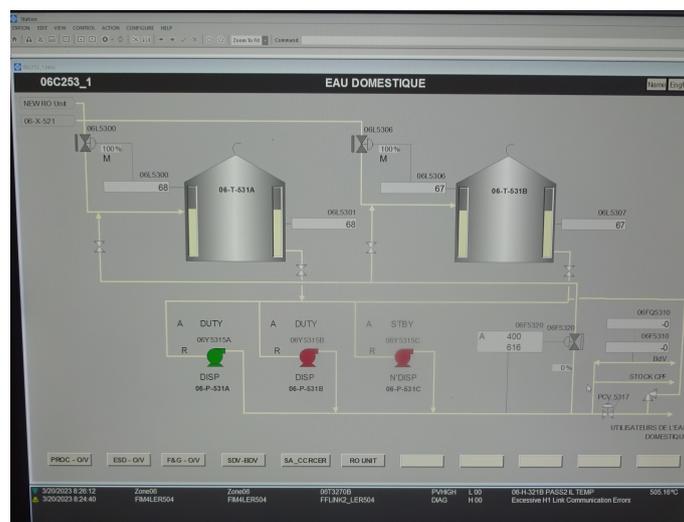


FIGURE 2.6 – la pompe 06-P-531 B dans le processus

Dans le processus décrit :

- Les pompes à eau domestique, désignées comme les pompes (06-P-531 A/B/C), sont des pompes centrifuges horizontales utilisées pour pomper l'eau domestique des réservoirs d'eau domestique vers les utilisateurs d'eau domestique.
- Les pompes sont conçues pour avoir une capacité de pompage de 33 m³/h à une pression de 16,2 barg.
- Les pompes sont installées en configuration parallèle, avec une pompe en service et les autres en attente. Cette configuration permet d'assurer une continuité d'alimentation en eau domestique même en cas de panne d'une des pompes.
- Les pompes sont équipées d'un interrupteur manuel local (06-HS-5315 A/B/C) qui permet de les démarrer et de les arrêter. De plus, elles peuvent également être arrêtées à partir du système de contrôle distribué (DCS) à l'aide d'un autre interrupteur manuel.
-
- L'état de fonctionnement des pompes est indiqué par les voyants (06-YI-5314 A/B/C) situés sur le système de contrôle distribué. Ces voyants permettent de visualiser si les pompes sont en marche ou à l'arrêt.
- Les pompes sont équipées de manomètres (06-PI-5316 A/B/C) sur leur sortie, ce qui permet de mesurer la pression de l'eau à cet endroit.
- Les pompes sont équipées d'un dispositif de protection contre les niveaux très bas dans les réservoirs d'eau domestique. Si le niveau du réservoir devient trop bas, les pompes sont automatiquement arrêtées pour éviter tout dommage.

2.5 Le plan de maintenance de la pompe 06-P-531-B

2.5.1 types de maintenance

chaque équipement, y compris la pompe 06-P-531-B, nécessite un plan de maintenance spécifique qui intègre à la fois des actions préventives et correctives. Ces deux approches complémentaires permettent de garantir le bon fonctionnement de la pompe et d'en prolonger la durée de vie .

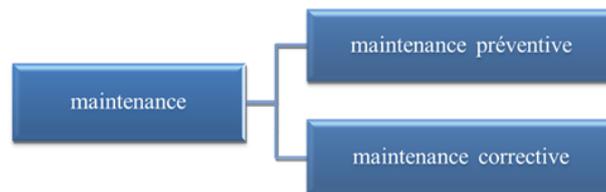


FIGURE 2.7 – les types de maintenance

2.5.1.1 maintenance corrective

La maintenance corrective fait référence aux activités de réparation et de rétablissement du fonctionnement normal d'un équipement après une panne ou une défaillance. Elle intervient lorsque la performance de l'équipement est altérée ou lorsque celui-ci cesse complètement de fonctionner. La maintenance corrective peut être classée en deux catégories[5] :

Maintenance corrective palliative : Il s'agit d'une intervention rapide visant à restaurer temporairement le fonctionnement de l'équipement. Elle vise à minimiser les interruptions de production et à réduire les pertes financières causées par la panne[5]. Cependant, cette approche ne s'attaque pas à la cause profonde du problème et ne prévient pas les futures défaillances.

Maintenance corrective curative : Cette forme de maintenance corrective est plus approfondie et cherche à identifier la cause sous-jacente de la défaillance. Elle implique une analyse approfondie du problème, des investigations techniques et des réparations ciblées pour éliminer la cause fondamentale de la panne[5]. L'objectif est de résoudre le problème de manière permanente afin de prévenir les récurrences.

Work Order	Description FR	Location	Work Type	Target Compl Date
157454	Fuite d'eau à travers la garniture mécanique de la pompe	06-P-531-B	CO	18/01/09 6 :19 AM
1037137	Fuite d'eau au niveau de la pompe	06-P-531-B	CO	22/11/14 8 :33 PM
1118515	Montage d'un spool pour eau diminuée	06-P-531-B	CO	12/09/15 12 :00 AM
1177802	Bruit anormal et la pompe chauffe	06-P-531-B	CO	03/02/16 12 :11 PM
1316357	Fuite d'eau garniture 06-P-531-B côté NDE	06-P-531-B	CO	30/05/17 6 :36 PM
1346196	Bruit anormal côté pompe	06-P-531-B	CO	02/10/17 10 :02 PM
1368185	Élimination de fuite d'eau au niveau de la pompe 06-P-531B	06-P-531-B	CO	27/01/18 5 :44 PM
1391192	Inspection crépine	06-P-531-B	CO	27/03/18 4 :20 AM
1469330	Inspection clapet + la vanne de refoulement	06-P-531-B	CO	26/11/18 4 :40 PM
1537996	Couvercle de moteur est démonté	06-P-531-B	CO	10/05/19 4 :00 PM
1868331	Fuite sur la ligne de refoulement	06-P-531-B	CO	06/07/21 7 :50 AM
1868670	Perçement sur la ligne du refoulement	06-P-531-B	CO	11/07/21 4 :50 PM
1882835	Perçement sur la ligne de refoulement commune du 06-P-531-A/B/C	06-P-531-B	CO	23/08/21 5 :45 AM
2065730	Perçement sur la ligne de refoulement commune du 06-P-531-A/B/C	06-P-531-B	CO	28/09/22 11 :00 AM
2114679	Inspection de la crépine	06-P-531-B	CO	06/01/23 7 :02 PM
2133936	Changement du clapet anti-retour	06-P-531-B	CO	15/02/23 8 :56 PM
2137065	Inspection de la pompe (action de synergie 225037)	06-P-531-B	CO	02/03/23 10 :14 AM
2141288	Changement pipe de refoulement de la pompe (synergie 225037)	06-P-531-B	CO	09/03/23 8 :21 AM
2144077	Démontage du discharge spool	06-P-531-B	CO	17/03/23 3 :43 PM

TABLE 2.3 – Maintenance corrective de la pompe 06-P-531-B

2.5.1.2 la maintenance préventive

La maintenance préventive se réfère aux activités planifiées et régulières visant à maintenir l'équipement en bon état de fonctionnement et à éviter les pannes imprévues. Elle vise à prévenir les défaillances et à maintenir les performances optimales de l'équipement.

La maintenance préventive peut être classée en trois catégories :

Maintenance préventive systématique :

Il s'agit de l'application de procédures de maintenance planifiées basées sur des intervalles de temps prédéfinis. Cela peut inclure des actions telles que l'inspection visuelle, la lubrification, le nettoyage, le remplacement des pièces d'usure et la vérification des paramètres de fonctionnement[5]. Ces activités sont réalisées de manière régulière et conformément à un calendrier établi.

Maintenance préventive conditionnelle :

Cette approche de maintenance est basée sur la surveillance continue des paramètres et des performances de l'équipement. Des techniques de surveillance telles que l'analyse des vibrations, la thermographie, les inspections non destructives, les mesures de débit, etc[2]., sont utilisées pour détecter les signes de dégradation ou les changements anormaux dans le fonctionnement de l'équipement. Lorsque des seuils prédéfinis sont dépassés ou que des anomalies sont détectées, des actions préventives sont entreprises pour éviter les défaillances imminentes.

Tests de performances :

Les tests de performances sont réalisés pour évaluer les capacités et les performances de l'équipement. Cela peut inclure des tests de charge, des tests de rendement, des tests de capacité, des tests d'étanchéité, etc. Ces tests permettent de vérifier si l'équipement fonctionne conformément aux spécifications techniques et d'identifier les éventuelles dégradations ou problèmes de performance[6].

2.5.1.3 Test de performance de la pompe à eau domestique 06-P-531-B/C

Introduction

Premier problème :

Une demande de travail a été créée par l'équipe d'exploitation à l'équipe mécanique pour intervenir sur la pompe 06-p-531-B qui avait déclenché plusieurs fois en raison d'une surcharge de son moteur électrique.

Deuxième problème :

Après l'intervention effectuée par l'équipe mécanique pour déterminer l'origine de la défaillance et le déclenchement de la pompe à cause de la surcharge, il a été constaté que le joint mécanique était endommagé et bloqué en raison d'une obstruction de la tuyauterie de fluide d'étanchéité. Un deuxième problème a été détecté par l'équipe d'exploitation après l'installation et le fonctionnement de la pompe 06-p-531-B avec la deuxième pompe 06-p-531-C, la pompe C a déclenché. Après avoir effectué un test de performance par l'équipe mécanique le 25 avril 2023 afin de définir l'origine de la défaillance.

Équipes impliquées :

Ce travail a été réalisé par une combinaison de différentes équipes, notamment :

- Équipe de génie mécanique.
- Équipe de génie électrique.
- Équipe d'exploitation.

Description de la procédure :

Nous avons effectué le test de performance selon la méthode d'essai - NFPA 20 pour les pompes à eau en suivant les étapes suivantes :

- -Démarrer la pompe à eau à l'aide du bouton de démarrage manuel.
- -Ouvrir la ligne d'essai pour recirculer l'eau vers le réservoir de stockage d'eau domestique.
- -En réglant la vanne d'isolation de la ligne d'essai, régler le débit de la pompe aux points de test spécifiés par le constructeur :
- 0 tonne/jour : Point de fonctionnement de la pompe.
- 248,64 tonne/jour : Point de fonctionnement de la pompe.
- 297,76 tonne/jour : Point de fonctionnement de la pompe.
- 596,16 tonne/jour : Point de fonctionnement de la pompe.
- 793,2 tonne/jour : Point de fonctionnement de la pompe.
- 1064,88 tonne/jour : Point de fonctionnement de la pompe.

À ces points, les mesures de pression de refoulement, de pression d'aspiration, de débit, de puissance, de tension et de courant seront prises et enregistrées dans le système d'analyse des tests informatiques.

4. Pump Characteristics

- Capacité normale : 30 m³/h
- Pression d'aspiration maximale/nominale : 1,78 - 0,85 bar
- Pression de refoulement : 16,90 bar
- Différence de pression : 169 m
- NPSHA : 7,1 m
- Tension : 400 V
- Diamètre de l'impulseur : 341 mm (max)
- Puissance nominale : 40,7 kW
- Rendement : 37

1- Test Performance de la pompe 06-P-531-C

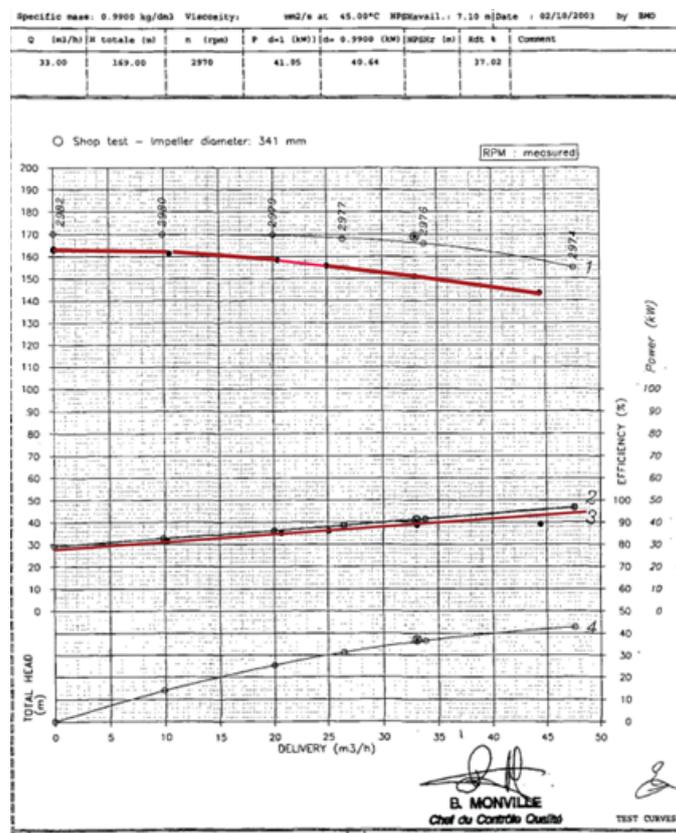


FIGURE 2.8 – Courbes de test de performance de la pompe C

Débit (m ³ /h)	0	11.088	20.664	25.2	33.6
Débit (Kg/h)	0	11088	20664	25200	33600
Pression d'aspiration (bar)	1	1	1	1	1
Pression de refoulement (bar)	16.75	17	16.75	16.5	16.25
Palier T1 (NDE) (°C)	36.2	36.6	49.3	58.58	68
Palier T2 (NDE) (°C)	31.8	33.2	35.9	39.6	40.2
Palier T3 (DE) (°C)	29	29.6	30.6	31.5	33.5
Courant (A)	80	87.8	90.2	98.5	98.5

TABLE 2.4 – Performances de la pompe 06-P-531-C

1- Test Performance de la pompe 06-P-531-B

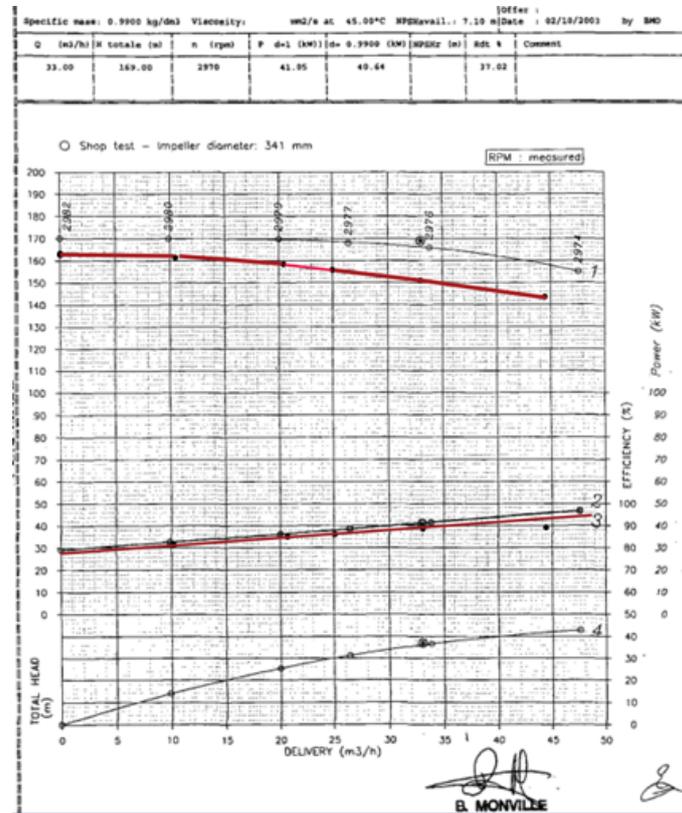


FIGURE 2.9 – Courbes de test de performance de la pompe B

Débit (m ³ /h)	0	9.87	21	25.494	33.6
Débit (Kg/h)	0	9870	21000	25494	33600
Pression d'aspiration (bar)	1	1	1	1	1
Pression de refoulement (bar)	17	16.75	16.5	16.25	15.75
Palier T1 (NDE) (°C)	28.2	29.3	32	33.3	34
Palier T2 (NDE) (°C)	32.8	35.3	42.3	44.1	46.8
Palier T3 (DE) (°C)	31.1	32.2	34.5	36.5	38.4
Courant (A)	80	87.8	90.2	98.5	98.5

TABLE 2.5 – Performances de la pompe 06-P-531-B

Real Flow	Different Pressure	Current	Pressure IN METER HEAD	Flow m3/h
0	16	0	163.0988787	0
264	15.75	80	160.5504587	10.44288
492	15.5	87.8	158.0020387	20.90592
600	15.25	90.2	155.4536188	25.03872
800	14.75	98.5	150.3567788	33.3144
890	14.25	98.5	145.2599388	44.72496

TABLE 2.6 – Performances de la pompe 06-P-531-c

Real Flow	Different Pressure	Current	Pressure IN METER HEAD	Flow m3/h
0	15.75	0	160.5504587	0
235	16	80	163.0988787	9.87
500	15.75	87.8	160.5504587	21
607	15.5	90.2	158.0020387	25.494
800	15.25	98.5	155.4536188	33.6
1000	14.75	98.5	150.3567788	42

TABLE 2.7 – Performances de la pompe 06-P-531-B

En se basant sur les résultats des tests de performance et la fiche technique du fabricant, on peut faire certaines observations et conclusions :

1. La pression en tête à différents débits pour le test réel est inférieure à celle indiquée dans la fiche technique du fabricant. Cela indique que la pompe 06-P-531-C peut rencontrer des problèmes de performance hydraulique.
2. La consommation d'énergie lors du test réel de la pompe 06-P-531-B se situe dans la plage spécifiée par la fiche technique du fabricant. Cela pourrait indiquer que les composants mécaniques de la pompe fonctionnent efficacement.
3. Les pressions en tête à différents débits pour le test de la pompe 06-P-531-B sont plus élevées que celles de la pompe 06-P-531-C. Cela pourrait indiquer que la pompe B fonctionne de manière plus efficace que la C.
4. Les éventuelles défaillances selon la norme API 610 pour la pompe 06-P-531-C peuvent inclure des problèmes tels que la cavitation, qui peuvent endommager la pompe et réduire son efficacité.

recommandations

- Nettoyer la volute de la pompe 06-P-531-C afin d'améliorer ses performances.
- Élaborer un plan de maintenance pour les pompes qui comprend des inspections régulières, des nettoyages et des lubrifications, ainsi que des tests périodiques et un suivi des performances. Ce plan devrait être basé sur les recommandations du fabricant.
- Vérifier régulièrement l'état des roulements et des joints d'étanchéité de la pompe 06-P-531-C et les remplacer si nécessaire. Des roulements défectueux ou des joints usés peuvent entraîner des fuites et une diminution des performances de la pompe.

- Surveiller attentivement les paramètres de pression d'aspiration et de refoulement de la pompe 06-P-531-C lors de son fonctionnement. Si des variations importantes sont observées, cela peut indiquer des problèmes de fonctionnement ou de réglage qui nécessitent une attention particulière

2.5.2 conclusion

notre étude s'est concentré sur une analyse détaillée de la pompe à eau domestique 06-P-531-B, mettant en évidence ses caractéristiques techniques, son fonctionnement dans le processus et ses performances en termes de débit, de pertes et de rendements. Cependant, pour garantir une durée de vie optimale de la pompe, il est essentiel d'intégrer l'analyse des vibrations dans notre plan de maintenance. Cette analyse des vibrations joue un rôle essentiel dans l'optimisation de la durée de vie de la pompe 06-P-531-B. En surveillant régulièrement les vibrations et en les intégrant à notre approche de maintenance, nous pouvons améliorer la fiabilité et l'efficacité de la pompe, assurant ainsi un fonctionnement continu du système tout en réduisant les coûts de réparation et de remplacement.

Chapitre 3

Analyse des vibrations pour la détection des défauts de roulement

Introduction

L'analyse vibratoire est une technique de surveillance et de diagnostic largement utilisée dans le domaine de la maintenance préventive. Elle consiste à mesurer et à analyser les vibrations générées par les équipements mécaniques tels que les machines tournantes, les moteurs, les pompes, les roulements, etc. Ces vibrations fournissent des informations précieuses sur l'état de santé de ces équipements, permettant ainsi de détecter les signes précurseurs de défaillance et d'entreprendre des actions correctives avant que des dommages majeurs ne se produisent[7].

L'importance de l'analyse vibratoire réside dans sa capacité à fournir une surveillance continue et en temps réel des équipements. En détectant les anomalies dès leur apparition, elle permet d'éviter les arrêts imprévus, les pannes coûteuses et les temps d'arrêt prolongés. En optimisant les intervalles de maintenance et en ciblant les composants spécifiques nécessitant une attention particulière, elle permet également d'optimiser les ressources et de réduire les coûts de maintenance.

3.1 Principes de base des vibrations

Les principes des vibrations sont basés sur le concept d'oscillation, qui est le mouvement répétitif d'un système autour d'un point d'équilibre. Ces principes sont importants pour comprendre le comportement des systèmes soumis aux vibrations, tels que les systèmes mécaniques, électriques et acoustiques[7]. L'équilibre est la position ou l'état où le système est en équilibre et n'a aucune force nette agissant sur lui.

Voici quelques-uns des principes clés des vibrations :

1- Amplitude

L'amplitude est le déplacement ou la distance parcourue par une particule ou une onde en oscillation à partir du point d'équilibre. Elle est directement liée à la quantité d'énergie transportée par l'onde. Elle représente également l'intensité des vibrations et l'on peut dire que plus l'amplitude est élevée, plus la vibration est forte.

2-Fréquence :

La fréquence est le nombre de cycles complets d'oscillation effectués par le système par unité de temps. Elle est mesurée en hertz (Hz). La fréquence des vibrations est directement liée à la rapidité avec laquelle le système oscille [7].

3- Période :

La période est le temps nécessaire pour qu'un cycle complet d'oscillation se produise. Elle est représentée par la durée entre deux points équivalents dans le mouvement périodique, tels que deux crêtes successives d'une onde sinusoïdale. La période est inversement proportionnelle à la fréquence, c'est-à-dire que plus la fréquence est élevée, plus la période est courte, et vice versa.

La période des vibrations est liée à la fréquence, et il existe une relation entre la

fréquence (f) et la période (T) qui peut être exprimée de deux manières :

$$f = \frac{1}{t} \tag{3.1}$$

Où :

- f : est la fréquence des vibrations,
- t : est le temps de mesure.

$$f = \frac{n}{T} \tag{3.2}$$

Où :

- f : est la fréquence des vibrations,
- n : est le nombre de périodes,
- T : est la durée d'un cycle complet.

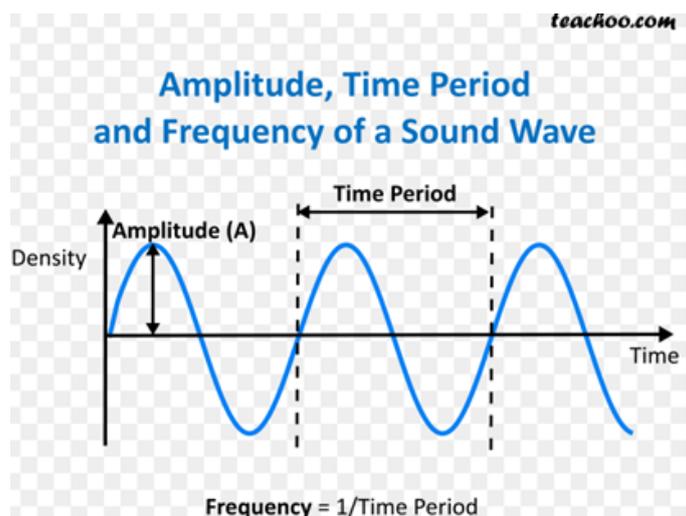


FIGURE 3.1 – Amplitude,période,fréquence

3.1.1 paramètres permettent d'évaluation des niveaux de vibrations (peak to peak ,0-peak ,RMS)

L'amplitude dépend de la rigidité de la structure, mais aussi de la force appliquée et la taille des vibrations peut être exprimée par trois paramètres :

Peak-to-peak (crête-à-crête) :

Indique la différence entre les amplitudes maximales positives et négatives d'une forme d'onde de vibration. La valeur crête-à-crête est 2,82 fois la valeur RMS et deux fois la valeur de 0-crête pour les signaux de forme sinusoïdale. Utilisée lors de la mesure des pièces en mouvement des machines où le déplacement ne doit pas dépasser une certaine valeur, par exemple les vibrations d'arbre[7].

0-crête (0-peak) :

Utilisée pour indiquer des événements uniques (ponctuels) ou de courte durée, tels que des chocs et des impacts. Cette valeur est utilisée lorsque la valeur crête-à-crête n'apporte aucune valeur ajoutée à l'évaluation du signal. Utilisée pour enregistrer des notions harmoniques pures. 0-crête est 1,414 fois la valeur RMS et la moitié de la valeur crête-à-crête[7].

RMS (valeur efficace) :

La valeur RMS d'un signal de vibration est un paramètre utile dans l'analyse des vibrations qui peut être utilisé pour évaluer l'état de santé des machines, spécifier l'amplitude des signaux de vibration, évaluer l'impact des vibrations sur les structures et évaluer l'efficacité des mesures de contrôle du bruit et des vibrations. $RMS = \text{temps} * 0,07 * 0\text{-crête} = 0,353 * \text{crête-à-crête}$ [8].

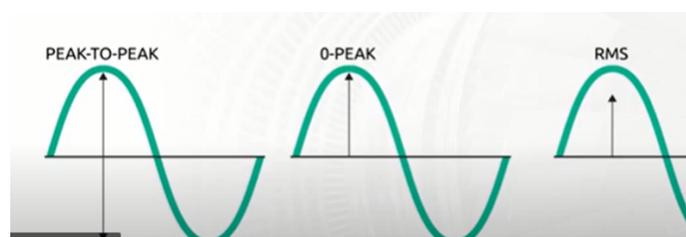


FIGURE 3.2 – paramètres d'évaluation des niveaux de vibrations

3.1.2 types des vibrations

Nous distinguons trois types de vibrations :

Vibrations Apériodiques :

des vibrations aléatoires qui ne se répètent pas dans le temps.

Vibrations transitoires :

des vibrations de courte durée, mais qui se répètent dans le temps.

Vibrations périodiques :

des vibrations continuellement présentes, qui se répètent de manière régulière.

1- vibrations A-périodiques :

Les vibrations apériodiques sont un type de vibrations qui ne se répètent pas régulièrement dans le temps et ne suivent pas de schéma prévisible. En d'autres termes, les vibrations apériodiques sont des vibrations irrégulières qui se produisent sans aucun motif prédictible[9].

Ces vibrations sont souvent causées par des facteurs externes indépendants de notre contrôle, tels que les tremblements de terre ou la conduite hors route d'une voiture. En raison de leur nature imprévisible, il est difficile de prévoir le comportement des vibrations apériodiques et de les étudier de manière systématique[9].

Les vibrations apériodiques ne peuvent pas être utilisées pour surveiller l'état des machines tournantes, car elles ne présentent pas de schéma récurrent qui puisse être analysé pour détecter d'éventuels défauts ou anomalies. Par conséquent, d'autres méthodes de surveillance et d'analyse des vibrations sont nécessaires pour évaluer l'état de santé des machines en fonctionnement.

Il est important de noter que même si les vibrations apériodiques ne sont pas utilisées pour la surveillance des machines, elles peuvent toujours avoir des effets néfastes sur les structures et les équipements, pouvant entraîner une fatigue des matériaux, des dommages mécaniques ou une détérioration des performances. Il est donc essentiel de prendre en compte ces vibrations et de les minimiser dans la conception et l'exploitation des systèmes.

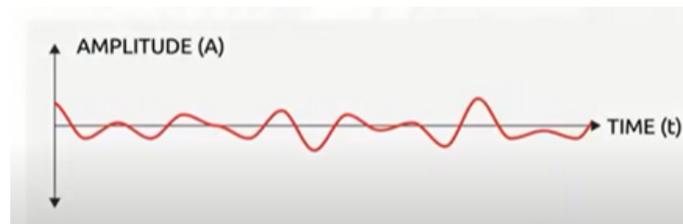


FIGURE 3.3 – vibrations -A périodique

2- vibrations transitoires

sont un type de vibration qui se produit pendant une courte période de temps, généralement causé par un impact ou un choc. Elles diminuent avec le temps en raison de la dissipation d'énergie.

Les vibrations transitoires peuvent être répétitives, mais elles ne sont pas continuellement présentes[9].

exemple : si un piston à l'intérieur d'un compresseur provoque une vibration transitoire, cela est probablement dû à un changement soudain ou à une perturbation des conditions de fonctionnement du compresseur. Cela peut inclure des facteurs tels que des changements soudains de pression, de température ou de débit du gaz comprimé, ou des changements soudains de charge ou de vitesse du compresseur.

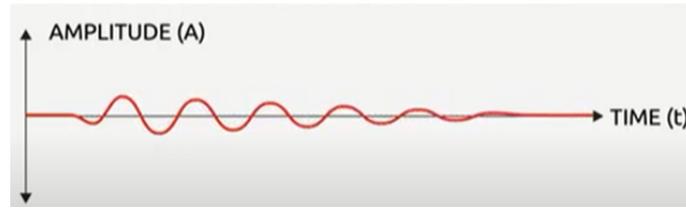


FIGURE 3.4 – vibrations transitoire

3-vibrations périodique

Les vibrations périodiques font référence à une oscillation ou un mouvement répétitif qui se produit sur une période fixe de temps. En d'autres termes, c'est une vibration qui se répète à intervalles réguliers et qui est utilisée dans l'analyse des vibrations, où le comportement du signal est prévisible. Les turbines et les moteurs électriques sont des sources courantes de ce type de vibrations. Elles peuvent être représentées par des équations mathématiques.

La vibration périodique la plus basique est la vibration harmonique pure ou la vibration continue unique caractérisée par des formes d'ondes sinusoïdales. L'amplitude de la vibration dépend de la force d'excitation, tandis que la fréquence dépend de la rigidité et de la masse ou de la vitesse de rotation en tours par minute (RPM).[9]

Les vibrations des machines tournantes deviennent plus complexes lorsqu'elles sont combinées. Le signal n'est plus purement harmonique, mais une combinaison superposée de deux signaux. Les machines tournantes se caractérisent par des vibrations multiples de nature harmonique pure.

En résumé, les vibrations périodiques sont des oscillations répétitives qui se produisent à intervalles réguliers. Elles sont utilisées dans l'analyse des vibrations et peuvent être décrites par des équations mathématiques. Les machines tournantes sont souvent à l'origine de vibrations périodiques, et lorsque plusieurs vibrations se combinent, elles peuvent créer des signaux plus complexes.

Les équations des vibrations périodiques dépendent du système spécifique et des conditions de vibration. Cependant, voici quelques équations utilisées pour décrire les vibrations périodiques :

1-Vibration harmonique simple (oscillation sinusoïdale) :

La vibration harmonique simple, également connue sous le nom d'oscillation sinusoïdale, est un type de mouvement oscillant caractérisé par une trajectoire en forme de sinusoïde. Elle est définie par une équation mathématique qui décrit la position d'une particule en fonction du temps[9].

$$x(t) = A \cdot \sin(\omega t + \phi) \tag{3.3}$$

- $x(t)$: est le déplacement à un instant t ,
- A : est l'amplitude de la vibration,
- ω : est la fréquence angulaire,
- ϕ : est la phase de la vibration.

Cette équation décrit un mouvement oscillant périodique où la particule effectue un aller-retour régulier autour de sa position d'équilibre, suivant une trajectoire sinusoïdale. La période de la vibration est inversement proportionnelle à la pulsation ω , c'est-à-dire que plus la pulsation est grande, plus la période est courte.

La vibration harmonique simple est un modèle fondamental utilisé pour comprendre et analyser divers phénomènes vibratoires dans de nombreux domaines, tels que la physique, l'ingénierie et les sciences naturelles.

2-Vibration harmonique amortie :

La vibration harmonique amortie fait référence à un type de vibration périodique dans lequel l'amplitude diminue progressivement avec le temps en raison de l'amortissement. L'équation générale d'une vibration harmonique amortie est donnée par [9] :

$$x(t) = A \cdot \exp(-\zeta\omega_n t) \cdot \cos(\omega_d t + \phi) \tag{3.4}$$

- **A** : Amplitude initiale
- ζ = Coefficient d'amortissement
- ω_n = Pulsation naturelle non amortie
- ω_d = Pulsation de vibration amortie

$$\omega_d = \omega_n \cdot \sqrt{1 - \zeta^2} \tag{3.5}$$

- ϕ = Phase initiale

Ce modèle d'amortissement est couramment utilisé pour représenter les vibrations dans les systèmes mécaniques où l'amortissement est présent, tels que les structures avec des éléments amortissants ou les systèmes soumis à des forces dissipatives.

3-La vibration forcée :

La vibration forcée fait référence à un type de vibration dans lequel un système est soumis à une force externe périodique. L'équation générale d'une vibration forcée est donnée par :

$$x(t) = X \cdot \sin(\omega t + \phi) \tag{3.6}$$

- **x(t)** : représente le déplacement à un instant donné
- **X** : est l'amplitude de la vibration forcée.
- ω : est la pulsation de la force externe appliquée.
- ϕ : est la phase initiale de la vibration.

Dans ce type de vibration, le système réagit à la force externe en oscillant à la même fréquence que la force appliquée. La réponse du système dépend de ses propriétés dynamiques, telles que sa fréquence naturelle, son amortissement et sa rigidité.

La vibration forcée est couramment observée dans de nombreux systèmes, tels que les ponts soumis à des forces de vent périodiques, les structures sujettes à des vibrations causées par des machines en fonctionnement, ou encore les instruments de musique dans lesquels une force extérieure est appliquée pour produire une vibration spécifique.

3.1.3 Déplacement, Vitesse et Accélérations.

Déplacement :

Le déplacement (unité : s) est le changement de position d'un objet. Pour les vibrations, le déplacement correspond à la distance entre les crêtes de la vibration. Nous utilisons des capteurs de déplacement, également connus sous le nom de capteurs à courants de Foucault ou de sondes de proximité sans contact, pour mesurer les vibrations exprimées en déplacement. Ils sont utilisés dans des applications de paliers à coussinets (film fluide) et également dans d'autres paliers pour mesurer les vibrations de l'arbre [10].

Vitesse :

La vitesse (unité : v) est le taux de variation du déplacement (s) par rapport au temps. Nous utilisons des capteurs de vitesse pour mesurer les vibrations exprimées en vitesse. La vitesse est mesurée en mètres par seconde (m/s) ou en millimètres par seconde (mm/s) [10].

Accélération :

L'accélération (unité : a) est le taux de variation de la vitesse (v) par rapport au temps. Nous utilisons des accéléromètres pour mesurer les vibrations exprimées en accélération. L'accélération est mesurée en unité de la constante gravitationnelle (g) ou en mètres par seconde carrée m/s^2 .

Ainsi, nous pouvons indiquer les vibrations avec les paramètres de déplacement (unité : s), de vitesse (unité : v) et d'accélération (unité : a). Sur la base du graphique ci-dessous, nous pouvons constater que l'amplitude est plus élevée à basses fréquences pour le déplacement et plus élevée à hautes fréquences pour l'accélération.

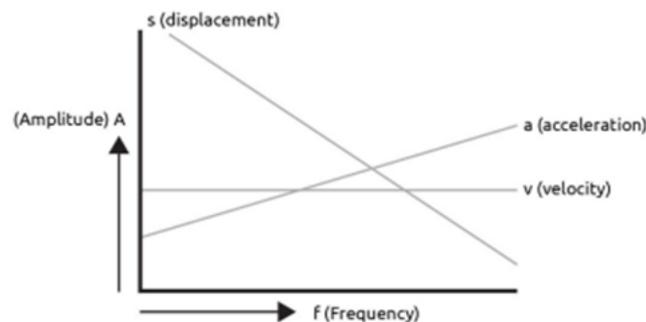


FIGURE 3.5 – Variation de l'amplitude des vibrations en fonction de la fréquence

3.1.4 Forme d'onde temporelle et Transformation de Fourier rapide (FFT)

3.1.4.1 La forme d'onde temporelle

La forme d'onde temporelle est également utilisée dans l'analyse des machines rotatives. Les machines rotatives, telles que les moteurs électriques, les turbines, les compresseurs et les pompes, génèrent des vibrations qui peuvent être étudiées à l'aide de la forme

d'onde temporelle[11].

Dans le contexte des machines rotatives, la forme d'onde temporelle est utilisée pour visualiser les vibrations générées par la machine. Ces vibrations peuvent être causées par des déséquilibres, des défauts de roulement, des jeux mécaniques, des désalignements ou d'autres problèmes. En analysant la forme d'onde temporelle, on peut observer les caractéristiques des vibrations telles que l'amplitude, la fréquence, la périodicité, les harmoniques et les transitoires.

La forme d'onde temporelle peut être mesurée à l'aide de capteurs de vibration placés sur la machine ou sur des points spécifiques de la structure. Les données capturées sont ensuite affichées graphiquement sous forme de courbes temporelles qui représentent les vibrations générées par la machine au fil du temps.

L'analyse de la forme d'onde temporelle des machines rotatives permet de détecter et de diagnostiquer des problèmes potentiels tels que des déséquilibres, des défauts de roulement ou des défaillances mécaniques. Cela permet de prendre des mesures correctives pour éviter des dommages plus importants, améliorer les performances de la machine et prolonger sa durée de vie.

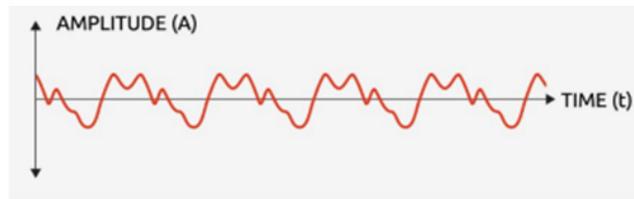


FIGURE 3.6 – Forme d'onde temporelle

Lorsque nous examinons une **forme d'onde temporelle de vibration**, il est difficile de reconnaître les fréquences individuelles.

Pour pouvoir identifier les causes potentielles de vibrations excessives, on utilise la **transformation de Fourier rapide (FFT)**.

3.1.4.2 transformation de Fourier rapide (FFT)

La transformation de Fourier rapide (FFT) est un algorithme utilisé pour convertir un signal du domaine temporel au domaine fréquentiel. Elle permet de décomposer un signal complexe en ses différentes composantes fréquentielles. La FFT est largement utilisée dans le traitement numérique des signaux et l'analyse spectrale.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-\frac{2\pi i}{N}kn} \quad (3.7)$$

- $\mathbf{X(k)}$:est le coefficient de fréquence à la fréquence f_k
- $\mathbf{x(n)}$: est le signal dans le domaine temporel à l'instant n
- \mathbf{N} :est la taille de l'échantillon du signal,
- \mathbf{k} :est l'indice de fréquence

En utilisant la FFT, on peut extraire les différentes fréquences présentes dans le signal vibratoire d'une machine tournante. Cela permet d'identifier les fréquences caractéristiques associées aux différents défauts mécaniques, tels que des déséquilibres, des jeux excessifs, des problèmes de lubrification, des défauts de roulements, etc.

En analysant le spectre fréquentiel obtenu à partir de la FFT, on peut repérer les pics de fréquence correspondant aux défauts spécifiques de la machine. Cela permet de diagnostiquer les problèmes potentiels, de planifier la maintenance préventive et de prendre des mesures correctives pour assurer le bon fonctionnement de la machine tournante.

La FFT est donc une technique essentielle dans l'analyse des vibrations des machines tournantes, permettant d'identifier et de quantifier les défauts et les anomalies qui peuvent affecter leur performance et leur durée de vie.

3.2 Acquisition de données

3.2.1 instruments

: L'acquisition des données vibratoires est le processus de collecte et d'enregistrement des informations relatives aux vibrations d'une machine ou d'un système. Cela permet d'analyser et de surveiller les niveaux de vibrations, d'identifier les problèmes potentiels et de prendre des mesures correctives[10].

Voici différentes instruments de mesure des vibrations :

- **Collecteurs de données portables :**

Ce sont des appareils portables conçus pour collecter des données vibratoires à partir de machines ou d'équipements. Ils permettent de mesurer les niveaux de vibrations et d'enregistrer les données pour une analyse ultérieure.

- **Appareils multi-canaux portables :**

Ces appareils portables sont capables de mesurer les vibrations sur plusieurs canaux simultanément. Ils offrent une capacité d'acquisition de données plus avancée, ce qui permet de collecter des informations plus détaillées sur les vibrations dans différentes parties d'une machine ou d'un système.

- **Systèmes de mesure des vibrations en ligne :**

Ces systèmes sont conçus pour surveiller en continu les vibrations d'une machine ou d'un équipement en temps réel. Ils sont généralement connectés au système de contrôle ou à un réseau informatique, ce qui permet une surveillance et une analyse en temps réel des vibrations. Ils sont couramment utilisés dans des applications critiques où il est essentiel de détecter rapidement les variations ou les anomalies des vibrations.



FIGURE 3.7 – les instruments utilisés pour la collection des données

3.2.1.1 Les mesures de vibrations en ligne (on-line) et hors ligne (off-line)

Les mesures de vibrations en ligne (on-line) et hors ligne (off-line) sont deux approches différentes pour collecter des données vibratoires :

Mesures de vibrations en ligne (on-line) :

Les mesures de vibrations en ligne sont effectuées lorsque la machine ou le système est en fonctionnement normal. Dans cette méthode, des capteurs de vibrations sont installés en permanence sur la machine, et les données vibratoires sont collectées en continu pendant que la machine est en service. Les capteurs peuvent être connectés à un système de surveillance en ligne qui permet de surveiller les niveaux de vibrations en temps réel. Cela permet de détecter rapidement les changements dans les vibrations, d'identifier les problèmes potentiels et de prendre des mesures correctives en temps opportun.

Mesures de vibrations hors ligne (off-line) :

Les mesures de vibrations hors ligne sont effectuées lorsque la machine est arrêtée ou mise hors service. Dans cette méthode, des capteurs de vibrations sont temporairement installés sur la machine pour collecter les données vibratoires. Les mesures sont généralement effectuées à des intervalles planifiés ou lors d'inspections régulières de maintenance. Les données collectées sont ensuite analysées et interprétées pour évaluer l'état de la machine, détecter les problèmes éventuels et planifier les activités de maintenance appropriées.

3.2.2 les captures de vibrations



FIGURE 3.8 – les capteurs des vibrations

Capteurs d'accélération :

Les capteurs d'accélération sont couramment utilisés pour mesurer les vibrations du boîtier, que ce soit en termes d'accélération ou de vitesse (après intégration) des mesures. Ils sont capables de mesurer des fréquences allant des basses aux élevées dans des directions monoaxiales, biaxiales et triaxiales. Ils sont disponibles dans une variété de conceptions à usage général ou spécifiques à une application. Il existe deux principales technologies de capteurs utilisées : les capteurs piézoélectriques et les MEMS (systèmes microélectromécaniques). Les capteurs piézoélectriques sont réputés pour leur fiabilité, leur polyvalence et leur capacité à couvrir une large gamme de fréquences et d'amplitudes. Les capteurs MEMS sont des semi-conducteurs offrant une précision légèrement inférieure en termes de fréquence et d'amplitude, mais avec une consommation d'énergie réduite. Les capteurs MEMS sont capables de mesurer à la fois l'accélération statique et dynamique[10].

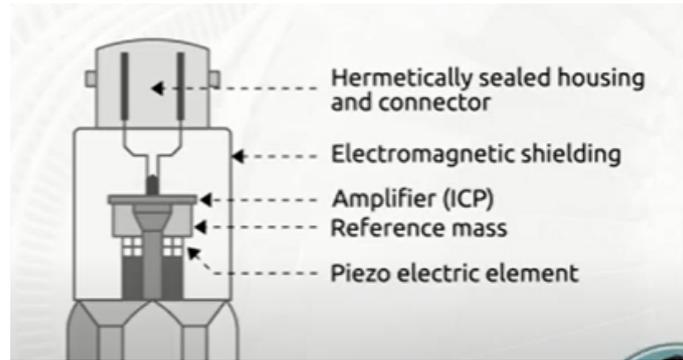


FIGURE 3.9 – capteur d' accélération

Capteurs de vitesse :

Les capteurs de vitesse sont utilisés pour mesurer une plage de fréquences de 1 à 1000 Hz. Le principe de mesure repose sur le déplacement d'une bobine autour d'un aimant, ce qui génère une tension proportionnelle au mouvement[10] Ces capteurs conviennent à la surveillance des vibrations et aux applications d'équilibrage sur les machines rotatives. Comparés aux accéléromètres, ces capteurs ont une sensibilité réduite aux vibrations à haute fréquence, ce qui les rend moins susceptibles de saturation. Dans certaines applications, des capteurs d'accélération piézoélectriques peuvent également être utilisés pour générer un signal de vitesse en intégrant le signal d'accélération.

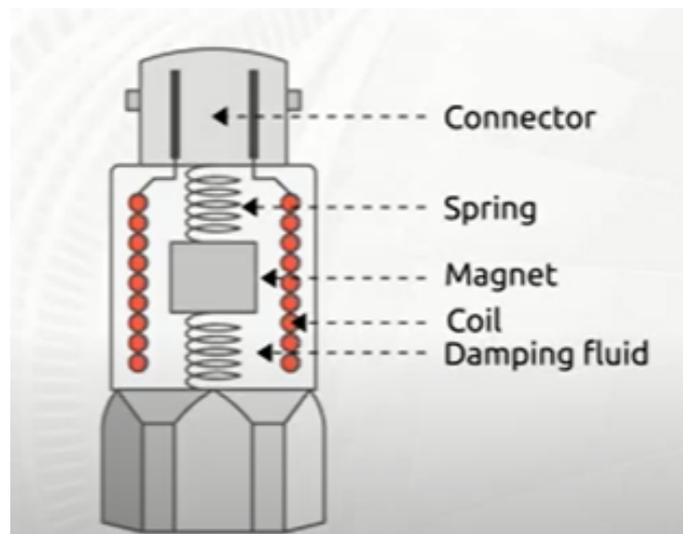


FIGURE 3.10 – l capteur de vitesse

Capteurs de déplacement :

Les capteurs de déplacement, également connus sous le nom de capteurs de proximité sans contact, sont utilisés pour mesurer la position ou le mouvement de l'arbre sans contact physique afin de déterminer les mouvements internes et le jeu des paliers. Les capteurs de proximité mesurent le mouvement (vibration) d'un arbre par rapport à un palier lisse ou à d'autres parties fixes. Ces capteurs sont utilisés pour mesurer une plage de fréquences de 1 à 1500 Hz, avec de faibles amplitudes typiques des applications de paliers lisses [10]. Un capteur de proximité sans contact se compose de trois éléments : une sonde, un câble d'extension et un amplificateur. Ensemble, ils créent une fréquence d'oscillation accordée qui est perturbée par la surface métallique de la cible. Il est essentiel

de remplacer les trois éléments par des composants identiques, car tout remplacement non conforme risquerait d'altérer la calibration du système.

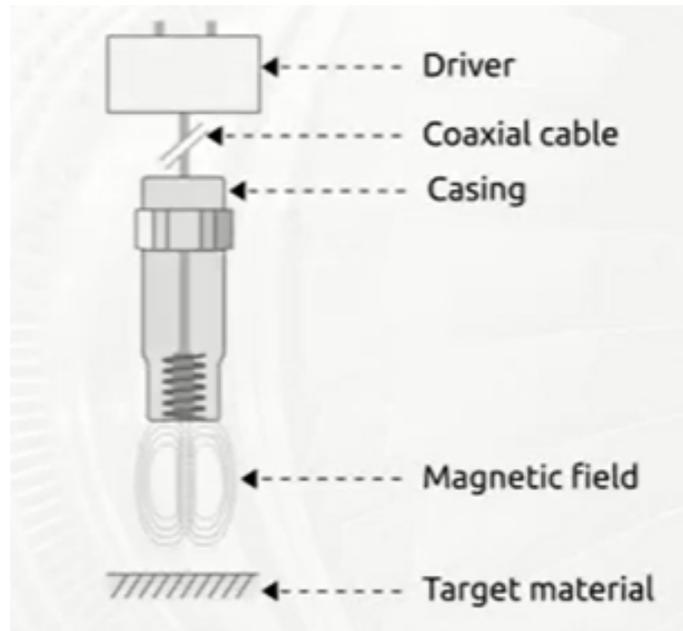


FIGURE 3.11 – capteur de déplacement

Il y a plusieurs facteurs à prendre en compte lors de l'installation d'un capteur de vibrations, qui déterminent largement le type de capteur le plus approprié :

- • La fréquence de mesure ciblée
- • Si le capteur est installé temporairement ou en permanence
- • La longueur de câble requise
- • La température à laquelle le capteur doit pouvoir résister
- • Le point de mesure requis

3.2.3 processus de transfert des données de vibrations



FIGURE 3.12 – capteur de déplacement

Le processus de transfert des vibrations vers/ depuis une base de données informatique implique plusieurs étapes. Voici une explication simplifiée du processus :

1. . Acquisition des données de vibrations : Les capteurs de vibrations sont utilisés pour mesurer les vibrations sur les machines ou les équipements. Ces capteurs convertissent les vibrations en signaux électriques.
2. . Conversion des signaux en données numériques : Les signaux électriques des capteurs de vibrations sont convertis en données numériques compréhensibles par un système informatique. Cela peut être réalisé à l'aide d'un convertisseur analogique-numérique (CAN) ou d'autres dispositifs similaires.
3. . Traitement et analyse des données : Les données de vibrations sont traitées et analysées pour extraire des informations pertinentes, telles que les fréquences de vibration, les amplitudes, les tendances, etc. Différents algorithmes et techniques d'analyse des vibrations peuvent être utilisés pour effectuer ces tâches.
4. . Stockage des données dans une base de données : Les données de vibrations sont enregistrées dans une base de données informatique. La base de données peut être locale (sur le même système informatique) ou distante (sur un serveur distant). Les données peuvent être stockées dans des formats spécifiques adaptés à l'analyse des vibrations, tels que des fichiers au format CSV (valeurs séparées par des virgules) ou des bases de données relationnelles.
5. . Transfert des données vers/ depuis la base de données : Les données de vibrations peuvent être transférées vers la base de données à partir du système de mesure des vibrations, soit automatiquement à intervalles réguliers, soit sur demande. De même, les données de vibrations peuvent être téléchargées depuis la base de données vers d'autres systèmes ou applications pour une analyse plus approfondie ou une visualisation des résultats.
6. . Analyse et utilisation des données : Une fois les données de vibrations transférées vers/ depuis la base de données, elles peuvent être analysées et utilisées à des fins diverses. Cela peut inclure la surveillance de l'état des machines, la détection des anomalies, l'optimisation des performances, la prise de décisions basées sur les données, etc.

Il est important de mettre en place des protocoles de sécurité et de sauvegarde appropriés pour assurer la confidentialité et l'intégrité des données de vibrations lors du transfert vers/ depuis la base de données.

3.3 Causes courantes des vibrations d'une pompe centrifuge

Les vibrations d'une pompe centrifuge peuvent avoir de nombreuses causes, qui sont connues sous le nom de conditions défectueuses. Voici les causes les plus courantes :

1-Misalignment (désalignement) : Le désalignement se produit lorsque les composants de la pompe centrifuge, tels que l'arbre et l'impulseur, ne sont pas correctement alignés. Cela peut entraîner des vibrations excessives et une usure prématurée des composants. Voici les types courants de désalignement[12] :

Désalignement parallèle : Les lignes centrales des arbres sont parallèles, mais ne sont pas alignées. Cela peut être à la fois horizontal et vertical. Le désalignement parallèle est également appelé désalignement décalé.

Désalignement angulaire : Les arbres se rencontrent en un point, mais ne sont pas parallèles. Cela peut être à la fois sur l'axe horizontal et vertical. Le désalignement angulaire est également appelé désalignement avec écart.

Désalignement parallèle-angulaire combiné :

Il s'agit d'une combinaison de désalignement parallèle et angulaire. Le désalignement parallèle-angulaire combiné est le plus courant.

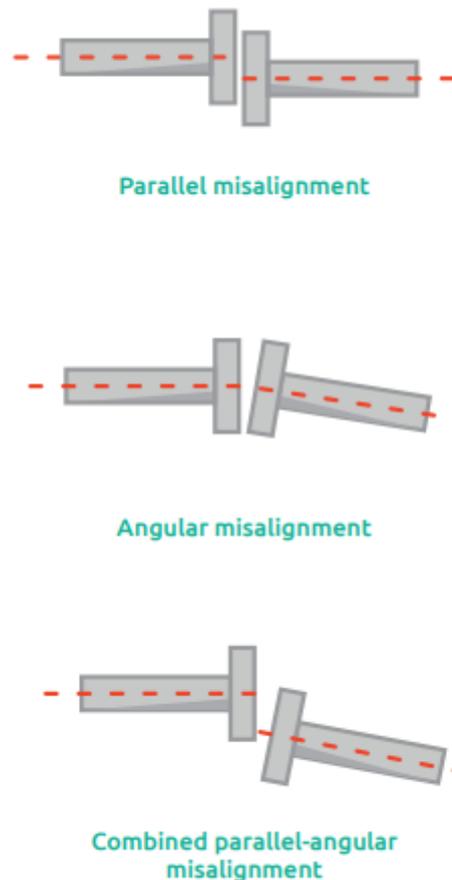


FIGURE 3.13 – les types de Désalignement

2-Le déséquilibre :

Le déséquilibre est une autre cause fréquente de vibrations dans les pompes centrifuges. Il se produit lorsque le centre de gravité d'un objet en rotation n'est pas exactement sur la ligne centrale, ce qui entraîne un déséquilibre de la machine et des vibrations. Voici les types courants de déséquilibre[12] :

Déséquilibre statique :

Le déséquilibre statique se produit lorsque l'axe du centre de gravité (axe d'inertie) n'est pas aligné avec l'axe de rotation (ligne centrale de l'arbre), et le point lourd et le centre de gravité sont dans le même plan. Le déséquilibre statique peut être le résultat d'un déplacement parallèle de l'axe de masse principal par rapport à la ligne centrale de l'arbre, et peut être causé par une répartition de masse non symétrique ou une déformation. En théorie, le déséquilibre statique peut être détecté en plaçant l'objet avec un point de rotation sur chaque extrémité. Lorsqu'il y a un déséquilibre statique et que le frottement est nul, la gravité fera pencher le côté lourd vers le bas.

Déséquilibre couplé :

Le déséquilibre couplé se produit lorsque l'objet en rotation a deux masses déséquilibrées ou plus dans des plans différents, qui s'équilibrent mutuellement en position de repos. L'axe de masse principal n'est plus parallèle au centre de gravité, mais croise l'axe du centre de gravité. Lorsque le système commence à tourner, ces masses seront influencées par les forces centrifuges, ce qui entraînera des vibrations.

Déséquilibre dynamique :

Le déséquilibre dynamique est le type le plus courant de déséquilibre et résulte du déséquilibre statique et couplé. L'axe de masse principal est déplacé et n'est pas parallèle à la ligne centrale de l'arbre.

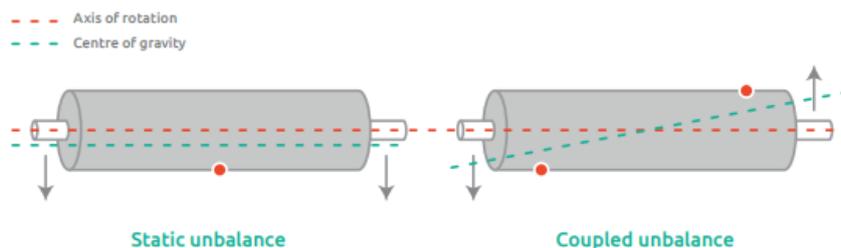


FIGURE 3.14 – les types de déséquilibre

3-Résonance :

La résonance se produit lorsque la fréquence de rotation de la pompe centrifuge correspond à sa fréquence de résonance naturelle. Cela peut amplifier les vibrations et entraîner des contraintes excessives sur les composants de la pompe. La résonance peut être évitée en ajustant les paramètres de fonctionnement de la pompe ou en utilisant des dispositifs d'amortissement appropriés.

4-Cavitation :

La cavitation se produit lorsque la pression du liquide dans la pompe chute en dessous de sa pression de vapeur, entraînant la formation de bulles de vapeur qui implosent violemment lorsqu'elles sont soumises à une pression plus élevée. Cela crée des chocs et des vibrations dans la pompe. La cavitation peut être causée par une conception incorrecte de la pompe, une aspiration d'air, des restrictions du système d'admission ou d'autres conditions de fonctionnement défavorables.

5-Les défauts de roulements :

sont également une cause courante de vibrations dans les pompes centrifuges. Les roulements défectueux peuvent entraîner des vibrations anormales et indiquer des problèmes potentiels dans le fonctionnement de la pompe. Dans les machines rotatives, nous rencontrons principalement deux types de paliers : les paliers à rouleaux et les paliers à coussinet.

Un palier à rouleaux peut être endommagé de plusieurs manières, chacune ayant sa propre signature vibratoire :

1. Dommages à la bague intérieure
2. Dommages à la bague extérieure
3. Dommages à la cage
4. Dommages aux éléments roulants (par exemple, cylindres, cônes et aiguilles)

Chaque partie d'un palier à rouleaux a sa propre fréquence. En calculant ces fréquences, il est possible d'utiliser l'analyse des vibrations pour déterminer la nature de l'endommagement.

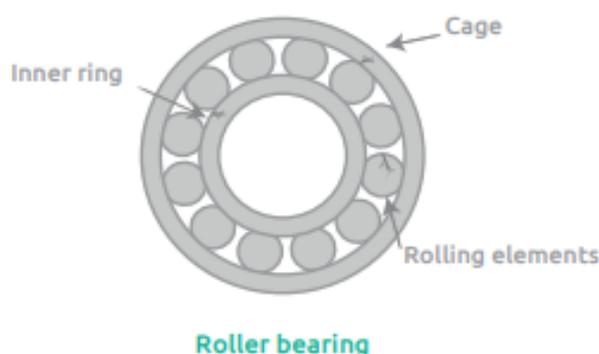


FIGURE 3.15 – roulement à rouleaux,

Contrairement aux roulements à rouleaux, les paliers lisses n'utilisent pas d'éléments roulants, mais utilisent un film fluide (huile) pour réduire les frottements. Les vibrations peuvent être causées par des inexactitudes dans le film fluide ; si un film d'huile stable ne peut pas être formé, il peut se rompre, entraînant une vibration de type "oil whip" ou "oil whirl". De plus, ce type de palier est plus sensible aux influences externes sur la position de l'arbre, car sa position dans le palier n'est pas fixe.

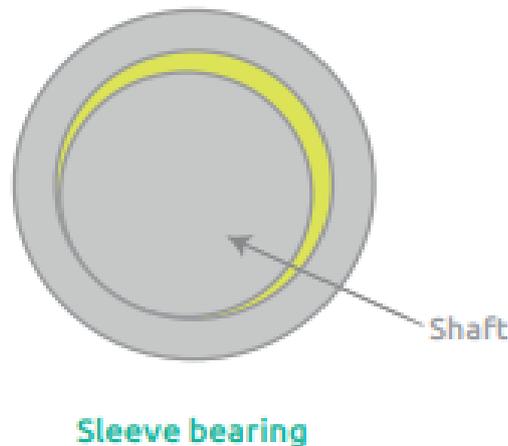


FIGURE 3.16 – palier lisse

les Vibrations des roulements à billes Les vibrations des éléments roulants des roulements font référence aux oscillations et mouvements indésirables qui se produisent au niveau des éléments roulants d'un roulement, tels que les billes, les rouleaux ou les aiguilles. Ces vibrations peuvent être le résultat de divers problèmes, tels que des défauts de fabrication, des dommages, une usure excessive ou des conditions de fonctionnement inappropriées.

L'importance des vibrations des éléments roulants des roulements réside dans le fait qu'elles peuvent indiquer l'état de santé du roulement et fournir des informations précieuses sur les éventuels défauts ou problèmes de fonctionnement. En surveillant les vibrations, il est possible de détecter précocement les signes de défaillance imminente du roulement, ce qui permet de planifier des actions de maintenance préventive pour éviter des pannes coûteuses et des temps d'arrêt imprévus.

3.3.1 La détection des défauts des roulements a rouleaux

La détection des défauts des roulements peut être réalisée à l'aide de diverses techniques de diagnostic. Voici quelques méthodes couramment utilisées pour diagnostiquer les défauts des roulements :

Analyse des vibrations :

Comme mentionné précédemment, l'analyse des vibrations permet de détecter les signatures vibratoires des défauts des roulements. Elle est basée sur la collecte de données de vibrations à l'aide de capteurs spécifiques et sur leur analyse pour identifier les fréquences et les motifs anormaux associés aux défauts des roulements.

Analyse de l'huile :

L'analyse de l'huile consiste à prélever des échantillons d'huile de lubrification des roulements et à les analyser en laboratoire. Cette analyse permet de détecter la présence de contaminants, d'oxydation, de dégradation de l'huile et d'autres signes indiquant des problèmes potentiels dans les roulements[13].

Émissions acoustiques :

Les émissions acoustiques consistent à détecter et à analyser les signaux sonores émis par les roulements défectueux. Les défauts des roulements génèrent des bruits spécifiques tels que des grincements, des cliquetis ou des chocs, qui peuvent être enregistrés et analysés pour diagnostiquer les problèmes.

Analyse des particules d'usure :

Cette méthode consiste à analyser les particules d'usure présentes dans l'huile de lubrification pour déterminer la présence de particules anormales provenant des roulements défectueux. Les particules d'usure peuvent indiquer des problèmes tels que l'usure excessive, le grippage ou la détérioration des surfaces de contact.

Thermographie :

La thermographie consiste à utiliser une caméra thermique pour mesurer les températures des roulements. Des températures anormalement élevées peuvent indiquer une friction excessive due à des problèmes de roulement.

Les défauts des roulements peuvent être causés par l'usure, la fatigue, une lubrification inadéquate, la contamination et un montage incorrect. Il est important de surveiller régulièrement l'état des roulements pour détecter les problèmes. L'analyse des vibrations est une méthode efficace pour diagnostiquer les défauts des roulements et prendre des mesures correctives avant qu'une défaillance grave ne se produise.

3.3.2 La conception des roulements à rouleaux

La conception des roulements joue un rôle crucial dans leur performance et leur durabilité. Voici quelques aspects importants de la conception des roulements :

Bague intérieure : C'est la partie du roulement qui est en contact direct avec l'arbre de la machine. Elle est conçue pour supporter la charge et assurer un mouvement fluide des éléments roulants[13].

Bague extérieure : C'est la partie du roulement qui est fixée au boîtier ou au support de la machine. Elle fournit le support externe et maintient les éléments roulants en place[13].

Cage : La cage des roulements à rouleaux a pour fonction de maintenir les éléments roulants (rouleaux) espacés de manière régulière et de leur permettre de se déplacer librement. Elle réduit les frottements entre les rouleaux et améliore la distribution de la charge sur l'ensemble du roulement.

Éléments roulants : Ce sont les rouleaux qui assurent la transmission de la charge entre les bagues intérieure et extérieure. Les rouleaux peuvent avoir différentes formes, telles que cylindriques, coniques ou sphériques, en fonction des exigences de charge et de la configuration du roulement[13].

Charge : La conception du roulement doit prendre en compte la charge prévue, qu'elle soit radiale, axiale ou combinée. Cela implique de choisir le type et la taille de roulement

appropriés pour supporter efficacement la charge sans compromettre la durée de vie ou la performance du roulement. La loi de charge pour les roulements à billes et les roulements à rouleaux est généralement exprimée sous la forme suivante :

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^3 \times 10^6 \quad (3.8)$$

où :

- L_{10} : est la durée de vie nominale du roulement en nombre de révolutions.
- C : est la capacité de charge dynamique du roulement, exprimée en newtons (N). Il s'agit de la charge maximale que le roulement peut supporter sans subir de dommages pendant une durée de vie de 1 million de révolutions.
- P : est la charge équivalente appliquée sur le roulement, exprimée en newtons (N). La charge équivalente est une combinaison de la charge radiale et de la charge axiale qui agissent sur le roulement.

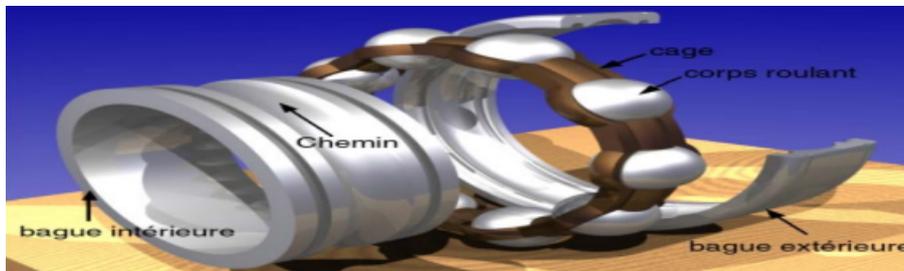


FIGURE 3.17 – les composants des roulements a rouleaux

3.3.3 Le calcul des fréquences des roulements à rouleaux

$$DR = \frac{D1 + D2}{2}$$

n = nombre de billes ou de rouleaux
 f_r = fréquence de rotation
vitesse relative en tr/s entre les pistes intérieures et extérieures.

Fréquences des impacts : f (Hz)

Défaut piste externe BPFO	$= \frac{n}{2} f_r \left(1 - \frac{DB}{DR} \cos \beta \right)$
Défaut piste interne BPFI	$= \frac{n}{2} f_r \left(1 + \frac{DB}{DR} \cos \beta \right)$
Défaut bille BSF	$= f_r \frac{DR}{DB} \left[1 - \left(\frac{DB}{DR} \cos \beta \right)^2 \right]$
Défaut cage FTF	$= \frac{1}{2} f_r \left(1 - \frac{DB}{DR} \cos \beta \right)$

Angle de contact β

es formules pour calculer les fréquences des roulements à rouleaux dépendent du type spécifique de roulement et de ses caractéristiques géométriques. Voici quelques-unes des formules couramment utilisées :

- Défaut de cage :

$$f_c = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{d}{D_m} \cos \alpha \right) f \quad (3.9)$$

$$(f_c = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{d}{D_m} \cos \alpha \right) f_0) \tag{3.10}$$

- Défaut de la bague intérieure :

$$f_{in} = f_c \cdot Z = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{d}{D_m} \cos \alpha \right) f_0 \cdot Z \tag{3.11}$$

- Défaut de la bague extérieure :

$$f_{ou} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{D_m} \cos \alpha \right) f_0 \cdot Z \tag{3.12}$$

- Défaut de l'élément roulant (balle) :

$$f_i = \frac{D_m}{d} \left(1 - \left(\frac{d}{D_m} \cos \alpha \right)^2 \right) f_0 \cdot Z \tag{3.13}$$

f_0 est la fréquence naturelle de rotation du roulement.
 Z est le nombre d'éléments roulants (balles).

D_m est le diamètre moyen du roulement, calculé comme $D_{extérieur} + D_{intérieur} / 2$.

d est le diamètre de l'élément roulant.

α est l'angle de contact de l'élément roulant.

3.3.4 Les étapes de défaillance des roulements à rouleaux

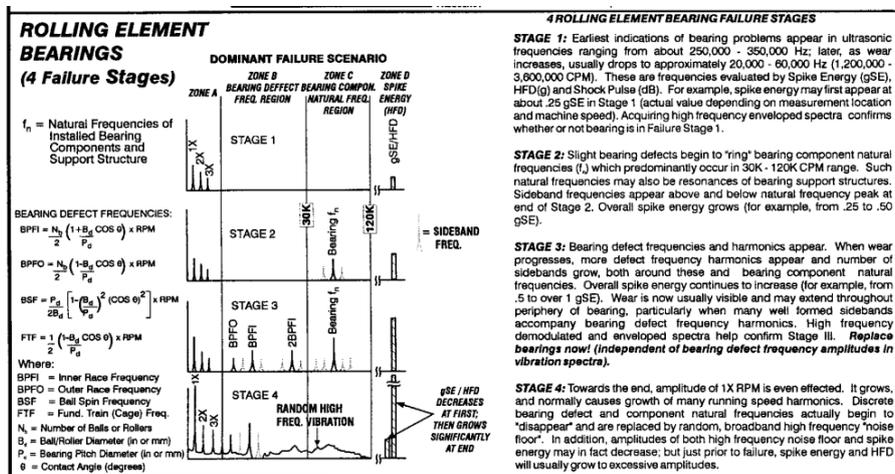


FIGURE 3.18 – les quatre stades de défaillance de roulements

lors de l'analyse des vibrations à l'aide de la FFT (Transformée de Fourier), on peut observer cinq stades distincts de défaillance des roulements. Voici une description de ces stades en relation avec les caractéristiques observées dans la FFT :

Stade 1 :

Dans ce stade, seuls des dommages subsurfaciques sont présents, généralement causés par des frottements et de légers impacts. Les vibrations à très haute fréquence sont générées d'environ 20 kHz, avec l'apparition ondes de contrainte à partir de 5 kHz. On peut également observer de légers bruits, mais la température reste normale. Les impacts sont de courte durée.

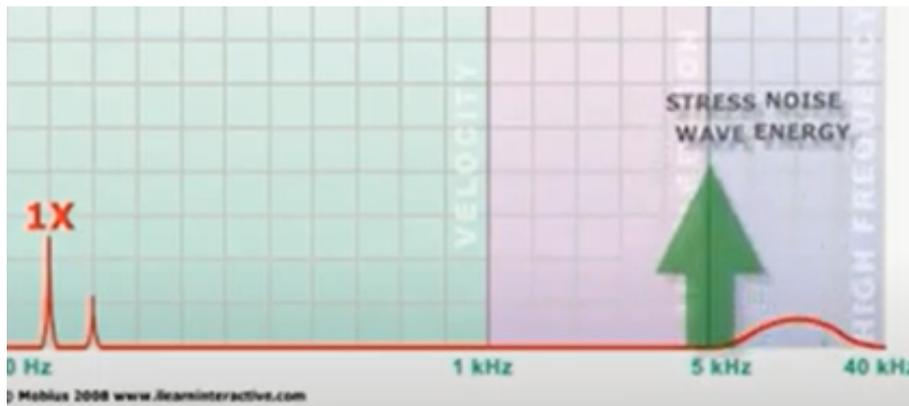


FIGURE 3.19 – Spectre de défaillance de roulements (Stade 1)

stade 2 :

À ce stade, les vibrations ont atteint une amplitude significative, ce qui peut être détecté par les capteurs de roulements. L'analyse de l'enveloppe du signal (démodulation) peut être utilisée efficacement pour détecter les signes de défauts dans le spectre. Cependant, le spectre de vitesse des vibrations ne révèle pas encore clairement la fréquence spécifique du défaut. Des variations harmoniques et des bandes latérales peuvent commencer à apparaître, indiquant une détérioration progressive du roulement

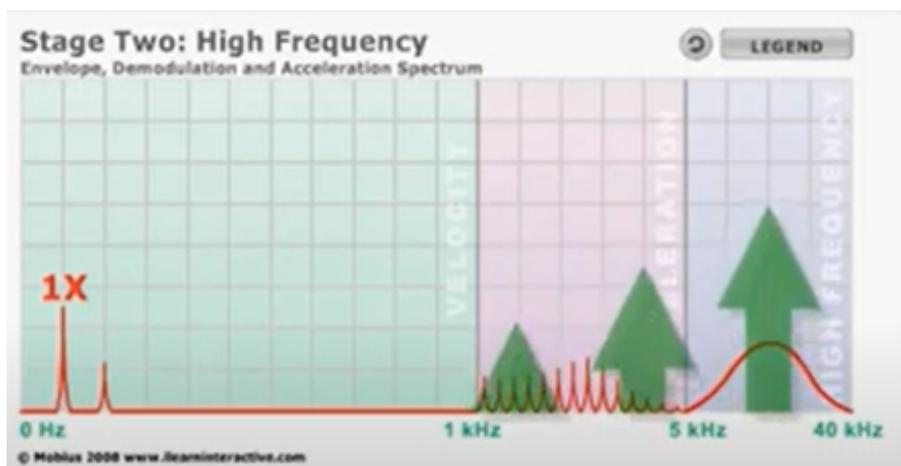


FIGURE 3.20 – Spectre de défaillance de roulements (Stade 2)

FIGURE 3.21



FIGURE 3.22 – dommage subsurfacique des roulements

stade 3 :

Les dommages aux roulements deviennent plus importants et peuvent être causés par plusieurs raisons. Les vibrations à très haute fréquence augmentent en amplitude. La démodulation de l'enveloppe est très efficace pour détecter les défauts, mais il est important de régler correctement les filtres lors de la configuration. Des harmoniques et des bandes latérales peuvent apparaître dans le spectre, indiquant des signes de dommages plus prononcés. Cela peut être le résultat d'une usure accrue, de défaillances structurales ou de tout autre facteur pouvant entraîner une détérioration significative des roulements

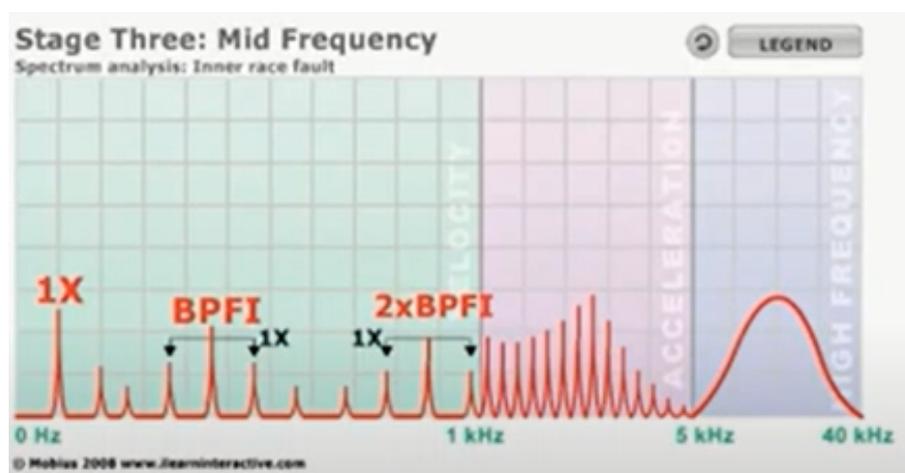


FIGURE 3.23 – Spectre de défaillance de roulements (Stade 3) avec fréquence BPFI mise en évidence

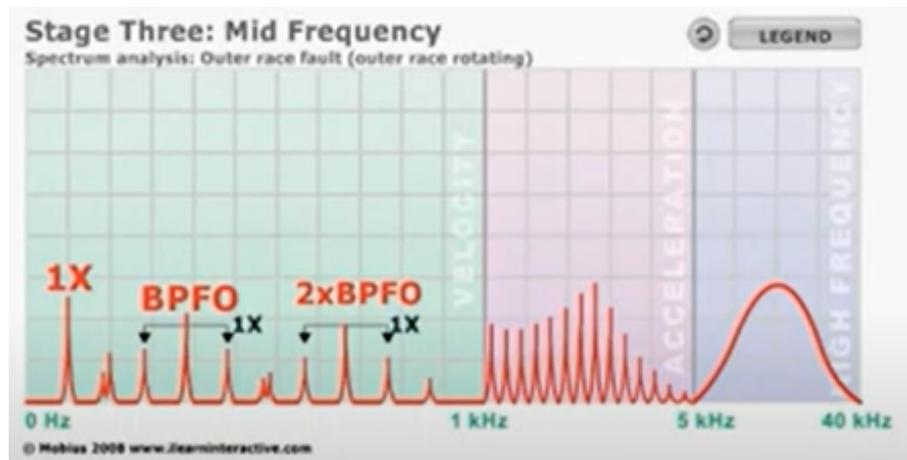


FIGURE 3.24 – Spectre de défaillance de roulements (Stade 3) avec fréquence BPFO mise en évidence

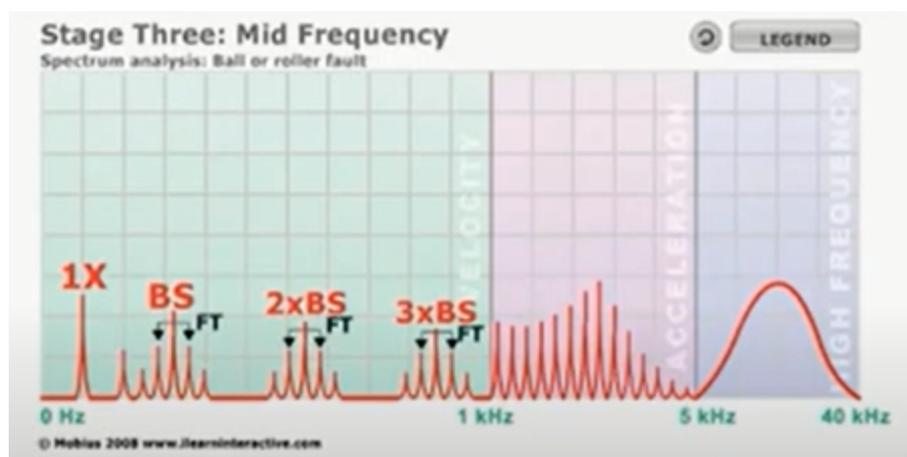


FIGURE 3.25 – Spectre de défaillance de roulements (Stade 3) avec fréquence BS mise en évidence

stade 4 :

Les dommages aux roulements deviennent encore plus importants, et il existe un risque élevé de défaillance imminente des roulements. Dans cette étape, les fréquences de défaut, les harmoniques et les bandes latérales deviennent plus apparentes, mais principalement dans la plage des basses fréquences. Les amplitudes des vibrations sont élevées et se manifestent sous la forme de pics prononcés dans les fréquences les plus élevées. Il est essentiel d'agir rapidement à ce stade pour éviter une défaillance catastrophique du roulement, car les dommages continus peuvent entraîner des conséquences graves pour l'équipement et la sécurité des opérations

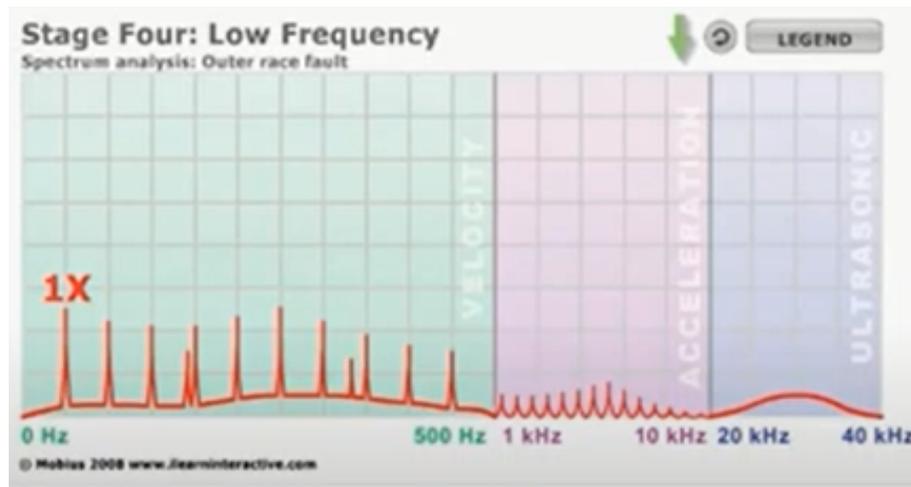


FIGURE 3.26 – Spectre de défaillance de roulements (Stade 3) avec fréquence BPFO mise en évidence

stade 5 :

À ce stade, les dommages aux roulements sont si importants que la fréquence de rotation fondamentale (1x) et ses harmoniques deviennent très visibles dans le spectre des basses fréquences. Les amplitudes des vibrations sont élevées et se manifestent sous la forme de pics larges et prononcés, souvent appelés "humps", dans les fréquences les plus basses. Dans les fréquences plus élevées, seuls des humps à haute amplitude apparaissent. Ces signaux indiquent une détérioration sévère du roulement et la possibilité imminente d'une défaillance complète. À ce stade, il est impératif de remplacer le roulement endommagé dès que possible pour éviter des conséquences graves telles que la casse de l'équipement ou des arrêts de production coûteux.

3.4 Méthode d'analyse d'enveloppe pour la détection des défauts de roulements à rouleaux.

Dans le domaine de la maintenance préventive des machines tournantes, la détection précoce des défauts dans les roulements est essentielle pour éviter les pannes coûteuses et les arrêts non planifiés. Plusieurs méthodes de surveillance des roulements existent, chacune avec ses avantages et ses limites. Parmi ces méthodes, l'analyse d'enveloppe se distingue comme une approche couramment utilisée pour la détection des défauts de roulements.

Il est important de noter que l'analyse d'enveloppe n'est pas la seule méthode disponible pour la surveillance des roulements. D'autres techniques, telles que l'analyse spectrale, l'analyse temporelle, l'analyse de corrélation, etc., sont également largement utilisées. Chaque méthode présente ses propres caractéristiques et avantages, ce qui souligne l'importance de choisir la technique la plus appropriée en fonction des spécificités de l'application et des objectifs de surveillance.

3.4.1 III.3.3 L'analyse d'enveloppe "HFRT" :

L'analyse d'enveloppe, ou la technique de Résonance Haute Fréquence (HFRT), est une méthode de détection précoce des défauts de type choc. La HFRT repose sur l'étude

du signal enveloppe obtenu grâce à la transformée de Hilbert . Mathématiquement, elle est donnée par l'équation :

$$H(s_t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s_t}{t - \tau} d\tau \quad (3.14)$$

$H(s_t)$: C'est la fonction de transformée de Hilbert appliquée au signal $s(t)$.

s_t : C'est le signal de vibration temporel.

t : C'est la variable temporelle.

τ : C'est la variable d'intégration qui représente le décalage temporel.

Pour cela, le signal vibratoire est enregistré dans une large bande de fréquences et filtré autour d'une fréquence de résonance . Ensuite, le signal est redressé en mettant toutes les valeurs négatives au positif, et la transformée de Hilbert est appliquée pour obtenir son enveloppe. Cela permet de séparer le signal modulé (fréquences de résonance) du signal modulant correspondant au défaut recherché. Le diagnostic final peut ensuite être réalisé après une analyse spectrale de l'enveloppe .

En pratique, la méthode d'enveloppe nécessite une série de traitements du signal temporel brut avant d'obtenir le résultat. Elle est particulièrement adaptée au diagnostic des défauts générant des chocs périodiques ou des modulations en amplitude, tels que ceux présents dans les engrenages et les roulements. La première étape consiste à filtrer le signal brut afin d'éliminer les composantes indésirables, ce qui renforce la robustesse de la méthode vis-à-vis du bruit. Ensuite, l'enveloppe est calculée, ce qui correspond à un redressement du signal, fournissant ainsi une information temporelle. Enfin, en utilisant la transformation de Fourier, on obtient le spectre de l'enveloppe, qui est un graphe représentant l'amplitude des vibrations en fonction de la fréquence. C'est à partir de ce spectre que les conclusions peuvent être tirées.

Pour un signal donné $s(t)$, la transformée de Hilbert (HT) dans le domaine temporel est définie comme suit :

$$s_t = \frac{1}{\pi} \int s(\tau) \frac{dt}{t - \tau}$$

Les paramètres utilisés sont :

- - s_t : Le signal de vibration temporel.
- - $s(\tau)$: Le signal de vibration en fonction de la variable d'intégration τ .
- - t : La variable temporelle.
- - τ : La variable d'intégration qui représente le décalage temporel.

Le signal analytique du signal $s(t)$ peut être obtenu à partir de $s(t)$ et de sa transformée de Hilbert s_t :

$$s_t = s(t) + js(t)$$

Les paramètres utilisés sont :

- - s_t : Le signal analytique du signal $s(t)$.
- - $s(t)$: Le signal de vibration temporel.
- - j : L'unité imaginaire.

Le processus peut être suivi en prenant la valeur absolue du signal analytique pour générer l'enveloppe :

$$s_t = s(t)^2 + |s(t)|^2$$

Les paramètres utilisés sont :

- - s_t : Le signal analytique du signal $s(t)$.
- - $s(t)$: Le signal de vibration temporel.

Généralement, les défauts générant des chocs provoquent une modulation du signal. En utilisant l'analyse d'enveloppe, le pic présent dans le spectre correspond à la fréquence caractéristique du défaut.

3.4.2 Étapes pour obtenir l'enveloppe du signal de vibration

1-Acquisition du signal de vibration :

Tout d'abord, le signal de vibration est acquis à l'aide d'un capteur approprié, tel qu'un capteur d'accélération ou de vitesse. Ce capteur mesure les vibrations générées par le roulement et convertit ces vibrations en un signal électrique[14].

2-Prétraitement du signal brut :

Le signal brut peut contenir des composantes indésirables, telles que le bruit ou des fréquences non pertinentes. Par conséquent, une étape de prétraitement est nécessaire pour éliminer ces composantes indésirables. Cela peut être réalisé en appliquant des techniques de filtrage, telles que le filtrage passe-bas pour supprimer les hautes fréquences indésirables.

3-Calcul de l'enveloppe :

Une fois que le signal brut est prétraité, on peut calculer l'enveloppe du signal. L'enveloppe est essentiellement un redressement du signal, qui permet de mettre en évidence les variations d'amplitude du signal dans le temps. Cela peut être réalisé en utilisant la transformée de Hilbert, comme décrit précédemment. Le calcul de l'enveloppe permet d'obtenir une représentation temporelle des variations d'amplitude du signal.

4-Transformation de Fourier de l'enveloppe :

Après avoir calculé l'enveloppe, on peut appliquer une transformation de Fourier à l'enveloppe pour obtenir le spectre de l'enveloppe. La transformation de Fourier permet de représenter les variations d'amplitude de l'enveloppe[14]. en fonction de la fréquence. Ainsi, on obtient un graphe d'amplitude de vibration en fonction de la fréquence, qui peut révéler les caractéristiques de défauts présents dans le roulement.

5-Analyse spectrale de l'enveloppe :

Enfin, l'analyse spectrale de l'enveloppe est réalisée pour identifier les fréquences caractéristiques des défauts. Les défauts dans les roulements génèrent souvent des modulations ou des chocs périodiques dans le signal de vibration, ce qui se traduit par des pics ou des pics harmoniques dans le spectre de l'enveloppe. L'identification de ces pics permet de détecter et de diagnostiquer les défauts présents dans le roulement.

EX :

représentent respectivement les enveloppes et leurs spectres. Le filtre utilisé est sélectionné passebande, après avoir filtré les signaux. Les spectres représentent de nombreuses composantes fréquentielles, à la fréquence de rotation (30 Hz), également aux fréquences caractéristiques

(BPMI=156.12 HZ) et leurs harmoniques. Ces fréquences indiquent clairement des défauts des bagues intérieure .

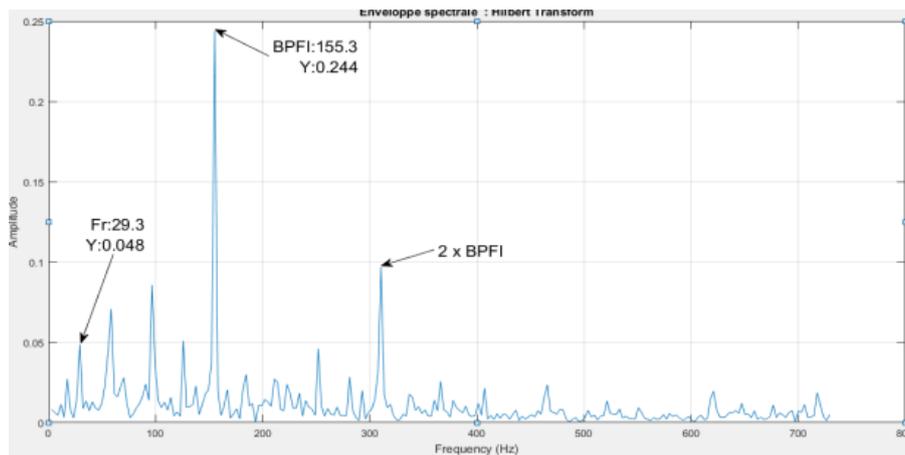


FIGURE 3.27 – enveloppe du défaut de bague intérieure avec défaut 0.007 mm

3.5 conclusion

En conclusion, ce chapitre nous a permis de comprendre l'importance de l'analyse des vibrations dans la détection des défauts de roulements à billes. Nous avons exploré les paramètres de vibration, les différentes méthodes d'acquisition de données et les caractéristiques des vibrations des roulements. Nous avons également examiné en détail la méthode d'analyse d'enveloppe, qui s'est avérée efficace pour détecter les défauts de manière précoce. Cette approche nous permettra d'aborder le prochain chapitre, où nous utiliserons des techniques de machine learning pour la classification des défauts de roulements en se basant sur la méthode de l'enveloppe.

Chapitre 4

LA Détection des défauts du roulement NU313 ECM à l'aide de l'IA

Introduction

ans ce chapitre, nous nous concentrerons sur l'exploitation de l'intelligence artificielle pour la détection des défauts de roulement du roulement NU313 ECM de la pompe centrifuge 06-P-531-B. Nous étudierons plus particulièrement l'application de la méthode de l'enveloppe spectrale dans le processus de détection.

La méthode de l'enveloppe spectrale est une approche couramment utilisée pour extraire les caractéristiques des signaux de vibration et identifier les défauts de roulement. Elle permet de détecter les fréquences caractéristiques associées aux défauts, notamment le BPFI et le BPFO, en isolant les enveloppes spectrales correspondantes. Cette méthode offre une bonne sensibilité à la présence de défauts de roulement, ce qui facilite leur détection précoce et leur diagnostic précis.

Nous aborderons également les concepts clés de l'intelligence artificielle appliquée à la détection des défauts de roulement. Les techniques d'apprentissage automatique, telles que les réseaux de neurones et les algorithmes de classification, sont largement utilisées pour analyser les données de vibration et identifier les défauts de roulement avec une précision accrue. Nous explorerons ces méthodes et discuterons de leurs avantages et de leurs limitations dans le contexte de notre étude.

De plus, nous présenterons les données expérimentales collectées à partir de la pompe centrifuge 06-P-531-B, en mettant l'accent sur les signaux de vibration enregistrés à différents stades de l'usure du roulement NU313 ECM. Ces données serviront de base pour entraîner et évaluer les modèles d'intelligence artificielle utilisés dans la détection des défauts de roulement.

4.1 L'Apprentissage Automatique (Machine Learning)

L'apprentissage automatique, ou **Machine Learning (ML)** est une branche de l'intelligence artificielle (IA), qui se fonde sur des approches mathématiques et statistiques (Algorithmes) pour donner aux ordinateurs la capacité d'apprendre à partir des données ; ces derniers cherchent les paramètres de modèle qui minimisent l'erreur [15]. Ces algorithmes de Machine Learning ne savent rien faire dans la première phase ; puis, au fur et à mesure qu'ils s'entraînent sur des données, ils sont capables de répondre de plus en plus efficacement à la tâche qu'on leur demande de faire [15]. Il présente plusieurs types d'apprentissage, les plus utilisés sont :

a . L'apprentissage Supervisée : Consiste en l'introduction de plusieurs données (Labels) déjà définies et étudiés par le Data Scientiste ; Pour la première phase, le réseau apprend ces échantillons en minimisant l'erreur entre la sortie désirée et celle obtenue, vient ensuite la deuxième phase où le réseau prédit la sortie selon ce qu'il a appris auparavant. Les applications de l'Apprentissage Supervisé sont très nombreuses, les plus utilisées sont : régressions et classifications [42].

b. L'apprentissage Non – Supervisée (Clustering) Dans cet apprentissage, l'algorithme ne possède pas d'étiquettes (Unlabeled), qui ne sont pas entraînés par le Data scientiste, il va essayer de les supposer et procéder par regroupement en cherchant les données similaires. Il est utilisé lorsqu'on ne sait pas ce que qu'on cherche, où la réponse à la tâche est inconnue pour les données [42].

4.1.1 Les Algorithmes d'apprentissage de ML

Les Algorithmes d'apprentissage de ML Les techniques d'apprentissage ont joué un rôle crucial dans des applications des algorithmes d'apprentissage automatique à divers domaines, notamment le traitement du langage naturel et de la parole, la reconnaissance de l'écriture manuscrite, la vision robotisée, la fouille de données, les moteurs de recherche sur Internet, le diagnostic médical, la bio-informatique, etc. Le choix d'un algorithme dépend fortement de la tâche à résoudre (classification, estimation de valeurs...), du volume et de la nature des données [52].

4.1.1.1 Support Vector Machine (SVM)

Il est très efficace dans les problèmes de classification, une machine à vecteurs de support ou séparateurs à vaste marge consiste à construire un hyperplan qui sépare les données linéairement séparables en deux classes. Une bonne séparation est obtenue par l'hyperplan qui est le plus éloigné des points les plus proches de chacune des deux classes [16].

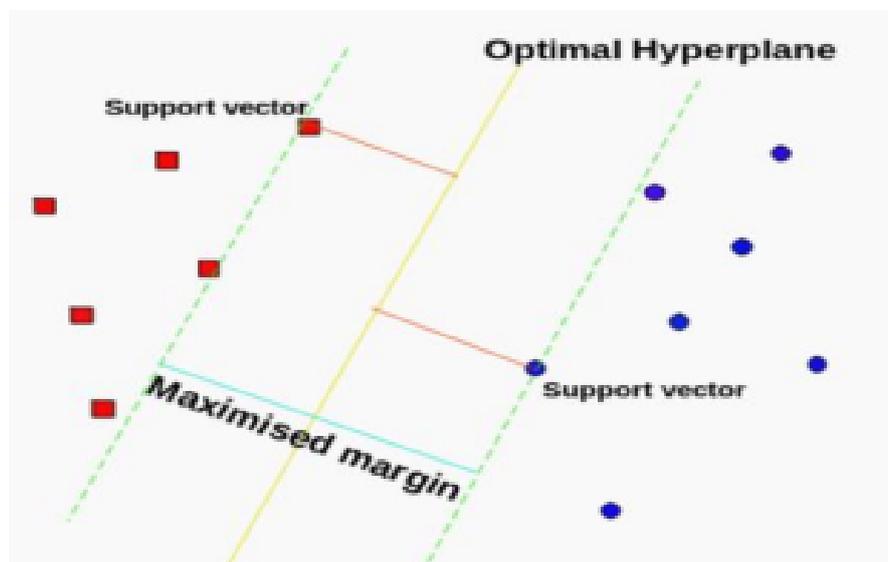


FIGURE 4.1 – Optimale Hyperplan Support Vector Machine

Dans le cas des données d'entraînement qui ne sont pas linéairement séparables, il est proposé de transformer l'espace initial de représentation des données d'entrée en un espace de plus grande dimension (appelé espace de redescription), ce qui favorise la séparabilité linéaire dans ce nouvel espace, comme l'illustre la Figure IV.2. Cette transformation d'espace est appelée astuce du noyau [16].

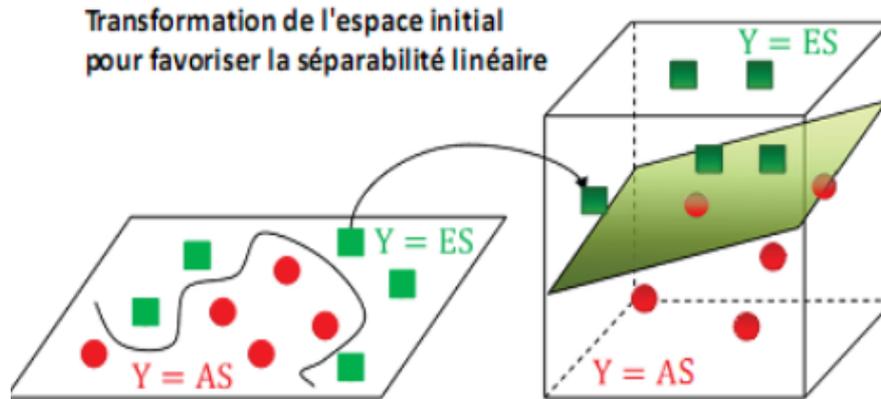


FIGURE 4.2 – SVM : Illustration de la transformation de l'espace initia

Comme pour les réseaux de neurones, les SVM fournissent un modèle de type boîte noire qui ne permet aucune description facilement interprétable de la manière dont les variables d'entrée affectent la variable de sortie. Selon les données, la performance des machines à vecteurs de support est de même ordre, ou même supérieure à celle du ANN [16].

4.1.1.2 Arbre de décision (Decision Tree)

L'objectif est de créer un modèle qui prédit la valeur d'une variable cible en apprenant des règles de décision simples déduites des caractéristiques des données. Un arbre peut être considéré comme une approximation constante par morceaux [17]. Ces arbres n'ont que deux composantes :

- – Les nœuds de branchement, qui représentent une seule variable d'entrée et offrent un seul point de partage sur la variable.
- – Les nœuds feuillent, qui représentent les deux variables de sortie [18].

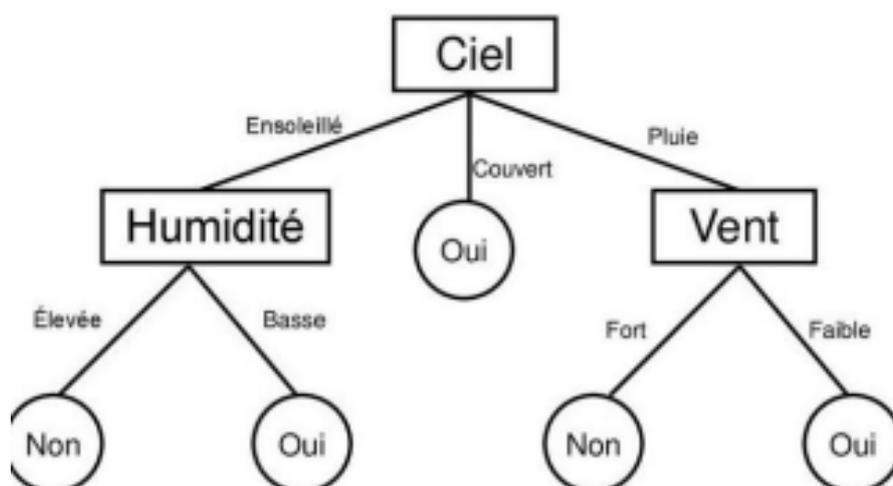


FIGURE 4.3 – Exemple d'arbre de classification

Les Arbres de décision sont faciles à apprendre et à utiliser, et précis pour toute une gamme de problèmes. Celles-ci sont particulièrement rapides à mettre en œuvre car les

données ne nécessitent aucune préparation particulière [18]. Le Random Forest (forêt aléatoire) est un algorithme de ML utilisée pour résoudre les problèmes de régression et de classification, qui se compose de plusieurs arbres de décision. L'algorithme de RF établit le résultat sur la base des prédictions des arbres de décision. Il prédit en prenant la moyenne ou les moyennes des résultats de plusieurs arbres. L'augmentation du nombre d'arbres accroît la précision du résultat. Le RF élimine les limites d'un algorithme d'arbre de décision. Il réduit l'Overfitting des ensembles de données et augmente la précision [15].

4.1.1.3 XG Boost Classificateur

L'algorithme XGBoost ou Extreme Gradient Boosting est un algorithme d'apprentissage automatique (ML) basé sur un arbre de décision qui utilise un processus appelé boosting pour améliorer les performances. Depuis son introduction, il est devenu l'un des algorithmes d'apprentissage automatique les plus efficaces et produit régulièrement des résultats qui surpassent la plupart des autres algorithmes, tels que la régression logistique, le modèle de forêt aléatoire (Random Forst) et les arbres de décision ordinaires. Il peut être utilisé pour résoudre les problèmes de classification et de régression, et convient donc à la grande majorité des problèmes de science des données .

4.1.1.4 Nearest Neighbors (KNN)

L'algorithme KNN qui signifie K-voisins les plus proches, il utilise l'intégralité du data set en tant qu'entraînement.

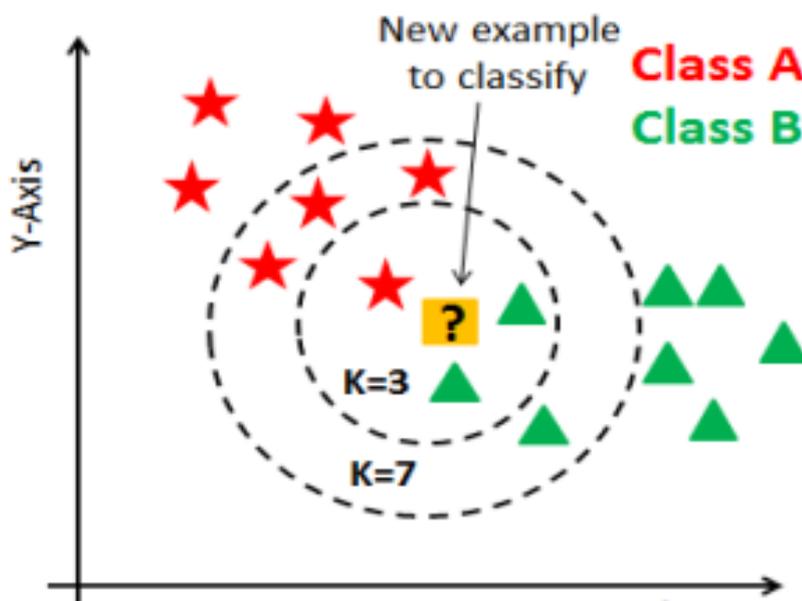


FIGURE 4.4 – Algorithme de KNN

Quand un résultat est requis pour une nouvelle instance de données, l'algorithme KNN parcourt l'intégralité du data set pour rechercher les k-instances les plus proches de la nouvelle instance ou le nombre k d'instances les plus similaires au nouvel enregistrement, puis renvoie la moyenne des résultats ou le classe à laquelle appartient cette instance si c'est un problème de classification. L'utilisateur spécifie lui-même la valeur de k [18].

4.1.1.5 La régression

Le concept général de la régression est d'étudier un ensemble de variables prédictives qui permet de prédire une variable de résultat, et citer les variables les plus significatives qui ont le plus d'impact sur la variation de résultat. La régression linéaire est l'un des algorithmes d'apprentissage supervisé les plus populaires, il est un type d'analyse prédictive de base [18]. Les prévisions de régression logistique sont des valeurs discrètes, contrairement aux prédictions de régression linéaire, qui sont des valeurs continues. C'est-à-dire un ensemble fini de valeurs. La régression convient mieux à la classification binaire. Au contraire de la régression linéaire, la régression logistique, propose le résultat sous forme de probabilités de la classe par défaut. Le résultat appartient donc à l'intervalle $[0 : 1]$. La valeur y de sortie est générée par la transformation de la valeur x , à l'aide de la fonction logistique (Sigmoid) [18].

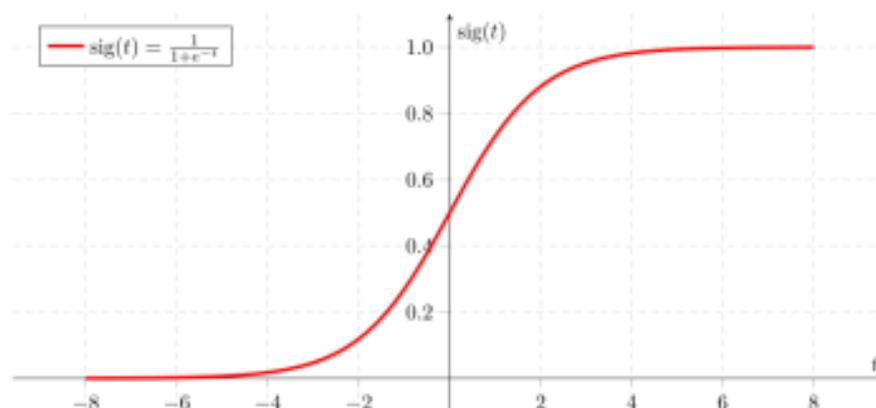


FIGURE 4.5 – La Fonction logistique sigmoïde

4.2 Le Sur-apprentissage (Overfitting)

Le Sur-apprentissage parfois appelé "sur-entraînement" ou "sur-ajustement" est le fait de construire un modèle de prévision trop spécifique, qui correspond trop étroitement ou exactement à un ensemble particulier de données, et qui n'est pas en mesure de s'adapter facilement à des nouvelles données d'entrée ou de prédire des observations futures de manière fiable. Il y a sur-ajustement lorsqu'un modèle commence à "mémoriser" les données d'apprentissage plutôt qu'à "apprendre" à généraliser une tendance observée dans les données d'apprentissage [52]. Le risque de sur-ajustement dépend non seulement du grand nombre d'échantillons à apprendre, ou bien au grand nombre de couches cachés, mais aussi de la conformité de la structure du modèle avec celle des données et de l'ampleur de l'erreur du modèle par rapport au niveau de bruit ou d'erreur contenu dans les données [15]

4.3 La structure et le fonctionnement du ANN

Un réseau de neurones artificiel est une combine des plusieurs neurones formels fonctionnant en parallèle et inspirés par des systèmes nerveux biologiques. Il se compose

d'une couche d'entrée, d'une ou de plusieurs des couches cachées, et d'une couche de sortie. Dans chaque couche, il y a plusieurs nœuds ou neurones, chaque couche utilisant la sortie de la couche précédente comme entrée, alors les neurones interconnectent les différentes couches. Chaque neurone a généralement des poids qui sont ajustés pendant le processus d'apprentissage, et comme le poids diminue ou augmente, il change la force du signal de ce neurone. Chaque neurone d'une couche a des poids ajustables pour ses entrées et un biais ajustable. Un réseau de neurones fonctionne (est entraîné) en ajustant tous ces poids et biais et en minimisant l'erreur tout au long de la phase d'entraînement pour obtenir des résultats plus précis.

4.3.1 Les principales composantes du réseau de neurones

a. Les neurones : Les neurones d'entrée reçoivent des données d'entrée, les traitent et les transmettent aux neurones dans la couche suivante. Les neurones cachés prennent les données de sortie des précédents neurones en entrée, calculent de nouvelles données de sortie et les transmettent à des couches successives. Les neurones de la dernière couche cachée (hidden layer) transmettent les données de sortie en entrée des neurones de la couche de sortie (output layer). A partir de cela les neurones de la couche de sortie produisent les données de sortie finales [40].

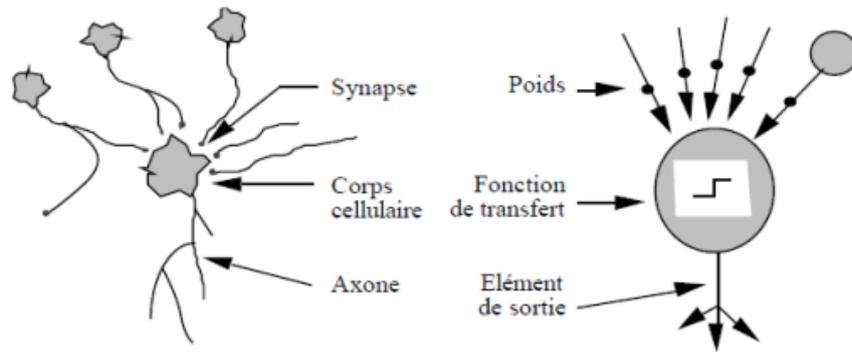


FIGURE 4.6 – Mise en correspondance neurone biologique / neurone artificiel

Le neurone formel est une formulation mathématique simplifiée de neurone biologique.

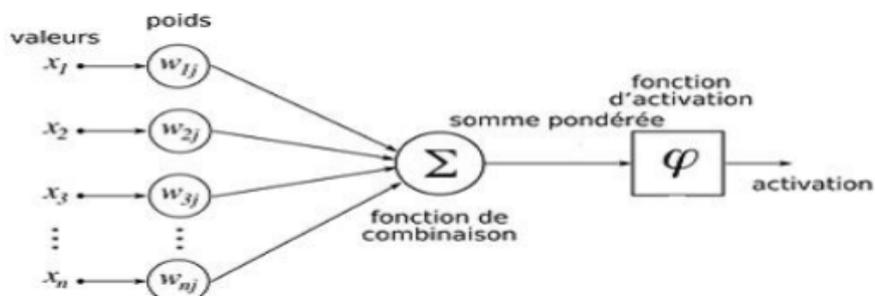


FIGURE 4.7 – structure d'un neurone artificiel

Un neurone j calcule un potentiel P_j , égal à la somme de ses entrées (inputs) (x_1, x_2, \dots, x_n) pondérées, par les coefficients synaptiques (poids) respectifs (w_1, w_2, \dots, w_n), à

laquelle on ajoute un terme constant : le biais b_j . La valeur du potentiel P_j est donnée par l'équation suivante :

$$P_j = \sum_{i=1}^n w_{ij}x_i + b_j \quad (4.1)$$

A ce potentiel, le neurone applique une fonction d'activation ϕ , de manière à ce que la sortie y_j , calculée par le neurone, soit égale à $\phi(P_j)$, tel que :

$$y_j = \Phi(P_j) = \phi \left(\sum_{i=1}^n w_{ij}x_i + b_j \right) \quad (4.2)$$

L'utilisation du biais est de nature à appliquer une transformation affine au potentiel. En fait, le biais est un paramètre externe du neurone j , il peut être intégré dans l'équation du potentiel, comme étant le signal x_0 qui prend la valeur 1, pondéré par le poids w_{0j} , dont la valeur est égale au biais b_j . La valeur de sortie y_j (output) est émise par le neurone vers d'autres neurones ou vers l'extérieur. Ainsi, un neurone est caractérisé par trois concepts : son état interne c'est-à-dire son potentiel, ses connexions avec d'autres neurones et sa fonction de transfert [18].

b. Couches (Layers) :

Les couches (ou layers) contiennent des neurones et aident à faire circuler l'information. Il existe au moins deux couches dans un réseau de neurones : la couche d'entrée (input layer) et la couche de sortie (output layer), et aussi la ou les couche cachées (ou hidden layers).

c. Poids et Biais (Weights and Bias) :

Les poids sont des variables du modèle qui sont mises à jour pour améliorer la précision du réseau. Un poids est appliqué à l'entrée de chacun des neurones pour calculer une donnée de sortie. Les réseaux de neurones mettent à jour ces poids de manière continue. Il existe donc une boucle de rétroaction mise en œuvre dans la plupart des réseaux de neurones. Les biais sont également des valeurs numériques qui sont ajoutées une fois que les poids sont appliqués aux valeurs d'entrée. Les poids et les biais sont donc en quelque sorte des valeurs d'auto-apprentissage de nos réseaux de neurones [18]

4.3.2 Types et architectures des réseaux de neurones artificiels

:

Les ANNs se manifestent sous forme de plusieurs architectures :

4.3.2.1 Perceptron monocouche (un seul neurone)

Le perceptron (Rosenblatt 1958) est la forme la plus simple d'un réseau de neurones. Il se compose d'une couche d'entrée et une couche de sortie. Ce réseau est capable de résoudre des problèmes linéairement séparables (ex : fonction logique 'OU' ou 'AND') ; à noter que tous les neurones de la couche d'entrée sont liés à tous les neurones de sortie.

4.3.2.2 Multi Layer Perceptron (MLP)

Le Perceptron Multicouche ou bien le réseau entièrement connecté (Fully Connected) est le réseau plus populaire dû à sa capacité de résoudre pas mal des problèmes. Il contient des couches cachées entre la couche d'entrée et celle de sortie, ce réseau résout des problèmes non-linéairement séparables, et là aussi, chaque neurone des couches cachées est connecté à tous les neurones de la couche qui la précède et celle qui la suit. Le vecteur d'entrée se propage dans le réseau de couche en couche jusqu'à la sortie, l'entraînement de celui-ci se fait avec l'algorithme par la rétro-propagation de l'erreur. Même avec les avantages des couches cachées et la performance de l'algorithme d'apprentissage, il reste plusieurs problèmes non réglés comme le choix du nombre de couches, le nombre de neurones par couche et le problème des minimums locaux où le réseau peut converger[15]

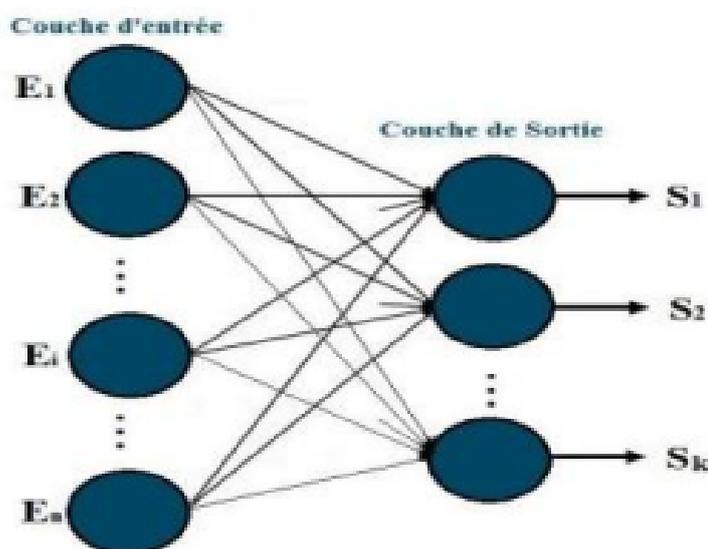


FIGURE 4.8 – Le Perceptron : structure et comportement

4.3.2.3 Réseau de neurones récurrent (Recurrent Neural Network)

Les réseaux de neurones récurrents (RNN) sont des réseaux de nœuds de type neurone organisés en couches successives, avec une architecture similaire à celle des réseaux de neurones standard. La différence est que dans ce cas, chaque neurone est affecté à un pas de temps fixe. Les neurones de la couche cachée sont également transmis dans une direction dépendante du temps, ce qui signifie que chacun d'entre eux est entièrement connecté uniquement aux neurones de la couche cachée avec le même pas de temps attribué et connecté avec une connexion à chaque neurone affecté au pas de temps suivant. Les neurones d'entrée et de sortie sont connectés uniquement aux couches cachées avec le même pas de temps assigné. L'activation des neurones est calculée dans l'ordre temporel : à un pas de temps donné, seuls les neurones affectés à ce pas de temps calculent leur activation. L'RNN conviennent aux applications où les informations historiques sont importantes. Ces réseaux nous aident à prévoir les séries chronologiques (Time Series Forecasting) dans les applications commerciales et à prévoir les mots dans les applications de type chatbot [15].

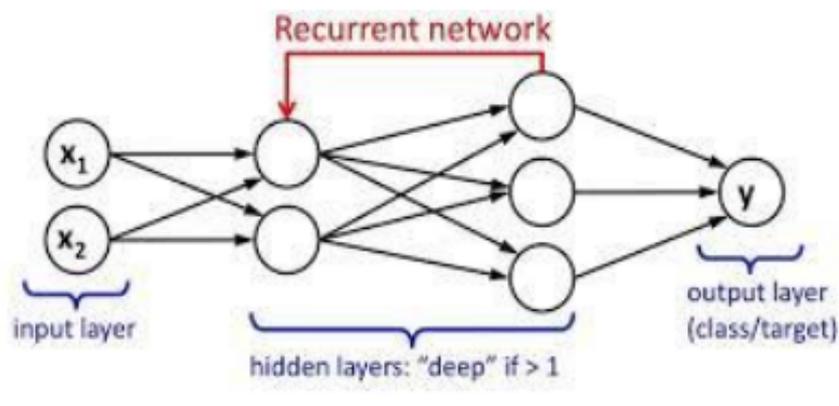


FIGURE 4.9 – Architecture simplifiée d'un réseau RNN

Ils peuvent fonctionner avec différentes longueurs d'entrée et de sortie et nécessitent une grande quantité de données.

4.3.2.4 . Réseau de neurones de convolution (Convolution Neural Network)

Ces réseaux reposent sur des filtres de convolution (matrices numériques). Les filtres sont appliqués aux entrées avant que celles-ci ne soient transmises aux neurones. Les CNN sont particulièrement utiles pour trouver des motifs dans les images afin de reconnaître des objets, des visages et des scènes. Ils peuvent également être très efficaces pour classer les données non-image telles que les données audio, les séries temporelles et les signaux.

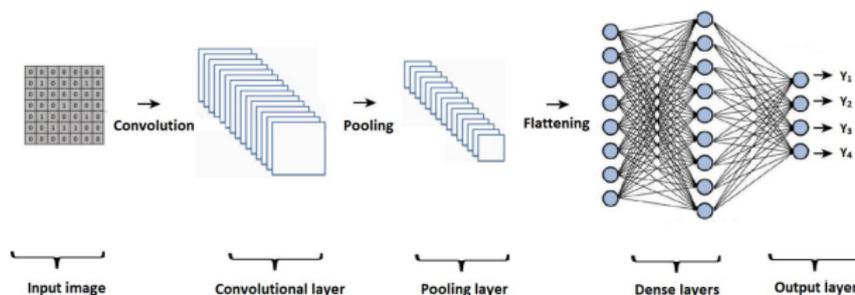


FIGURE 4.10 – Architecture de CNN avec des couches convolution et pooling

Les applications qui font appel à la reconnaissance d'objets et à la vision par ordinateur, telles que les véhicules autonomes et les applications de reconnaissance faciale, reposent fortement sur les CNN [18].

4.3.3 La Classification par le réseau des neurones

Les problèmes de classification impliquent de prédire une sortie de classe discrète. Cela implique de diviser l'ensemble de données en classes différentes et uniques en fonction de différents paramètres afin qu'un nouvel enregistrement invisible puisse être placé dans l'une des classes [54]. Le but de la classification des modèles (pattern classification) est d'attribuer les modèles d'entrée à l'un d'un nombre fini M des classes .

4.4 La détection des défauts du roulement NU313 ECM à l'aide de L intelligence artificielle

L'application du de IA : Machine Learning ou Deep Learning pour le diagnostic automatique du matériel, se fait avec un model codée dans une plateforme de Google Colabory, ou Anaconda Jupyter. Le procès de la construction du model passe par plusieurs étapes :

4.4.1 Diagnostic FFT pour les points de mesure

Dans le domaine des pompes domestiques d'eau, la surveillance et la détection précoce des défauts des roulements jouent un rôle crucial pour assurer un fonctionnement optimal et éviter les pannes coûteuses. L'utilisation de techniques d'analyse de vibrations, telles que l'analyse spectrale FFT (Fast Fourier Transform), offre une méthode efficace pour diagnostiquer les défauts des roulements.

Dans cette étude, nous nous concentrerons sur la pompe domestique d'eau spécifique, dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Capacité : 30 m³/hr
- Numéros de série : 03.21034.00
- Roulement DE (Drive End) : NU313EC
- Vitesse de rotation : 2970 tr/min
- Roulement NDE (Non-Drive End) : NU313EC
- Roulement sz moteur co (Drive End) :6316 SINGLE ROW DEEP GROOVE
- Roulement de moteur coa (Non-Drive End) : 6316 SINGLE ROW DEEP GROOVE
- Puissance : 40.7 kW
- Roulement de butée : 7312BECB
- Nombre d'étages : 1
- Montage : Horizontal

Pour évaluer l'état de ces roulements et détecter d'éventuels défauts, nous avons sélectionné des points de mesure spécifiques sur le boîtier de la pompe. Ces points de mesure nous fournissent des informations précieuses sur les vibrations du système et nous permettent d'effectuer une analyse FFT comme une première étape pour identifier les signatures caractéristiques des défauts de roulement[14].

4.4.2 description des points de mesure de la pompe

:

voici les points de mesure que nous avons utilisés pour obtenir le spectre FFT :

- **01VV MOTEUR COA VER VIT** : Niveau de vibration dans la direction verticale du boîtier du moteur, mesuré en millimètres par seconde (mm/s).

- **02AV MOTEUR CA AXI VIT** : Niveau de vibration dans la direction axiale du boîtier du moteur, mesuré en millimètres par seconde (mm/s).
- **02VV MOTEUR CA VER VIT** : Niveau de vibration dans la direction verticale du boîtier du moteur, mesuré en millimètres par seconde (mm/s)
- **03HV POMPE CA HOR VIT** : Niveau de vibration dans la direction horizontale du boîtier de la pompe, mesuré en millimètres par seconde (mm/s).
- **03AVMOTEUR CA HOR VIT** : Niveau de vibration dans la direction axiale du boîtier du pompe, mesuré en millimètres par seconde (mm/s).



FIGURE 4.11 – les points de mesure des vibrations de la pompe

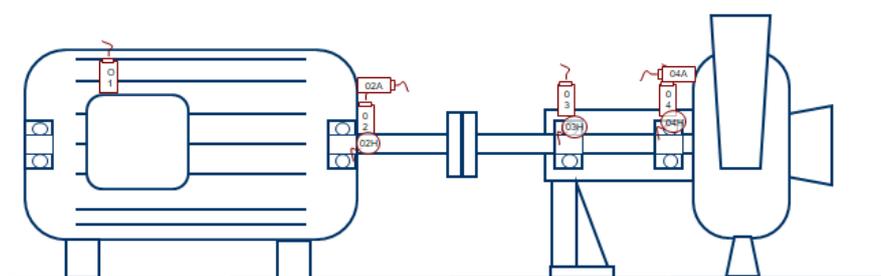


FIGURE 4.12 – schéma des points de mesure de la pompe

4.4.2.1 Prétraitement des données (preprocessing of datas)

1- **Importation et préparation des données** D'abord, on charge les bibliothèques nécessaires : Numpy, Pandas, matplotlib, seaborn, sklearn, ... etc, afin que nous puissions appliquer les opérations mathématiques et algébriques, lire et analyser les Data Frames, visualiser les données et l'esthétique et aussi pour inter-opérer avec les bibliothèques numériques et scientifiques de NumPy et SciPy.

```
import pandas as pd
import seaborn as sns
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import seaborn as sns

#import your Excel file fft data
pump_data=pd.read_excel("/content/waterpump.xlsx")
pump_data
```

	frequency	Ø1V MOTEUR COA VER VIT	Ø2AV MOTEUR CA AXI VIT	Ø2VV MOTEUR CA VER VIT	Ø3HV POMPE CA HOR VIT	Ø2HV MOTEUR CA HOR VIT
0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000000
1	2.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000000
2	5.0	0.062	0.170	0.150	0.120	0.120000
3	7.5	0.046	0.087	0.043	0.073	0.059000
4	10.0	0.027	0.072	0.037	0.064	0.040000
...

FIGURE 4.13 – importation des données

2- Description des données :

On affiche la description des données pour chaque échantillon (Sample), pour faire connaître les caractéristiques des données.

```
[ ] display(
    print('Data'),
    print('\n'),
    pump_data.info(),
    pump_data.head())
```

Data

```
<class 'pandas.core.frame.DataFrame'>
RangeIndex: 796 entries, 0 to 795
Data columns (total 6 columns):
#   Column                                Non-Null Count  Dtype
---  -
0   frequency                             796 non-null    float64
1   Ø1V MOTEUR COA VER VIT                796 non-null    float64
2   Ø2AV MOTEUR CA AXI VIT                 796 non-null    float64
3   Ø2VV MOTEUR CA VER VIT                 796 non-null    float64
4   Ø3HV POMPE CA HOR VIT                 796 non-null    float64
5   Ø2HV MOTEUR CA HOR VIT                 796 non-null    float64
dtypes: float64(6)
memory usage: 37.4 KB
```

FIGURE 4.14 – description des données

3-. Représentations des données (fft spectre) la bibliothèque `matplotlib.pyplot` pour visualiser les signaux FFT de chaque mesure. La transformation de Fourier rapide (FFT) est une technique utilisée pour analyser les signaux dans le domaine fréquentiel.

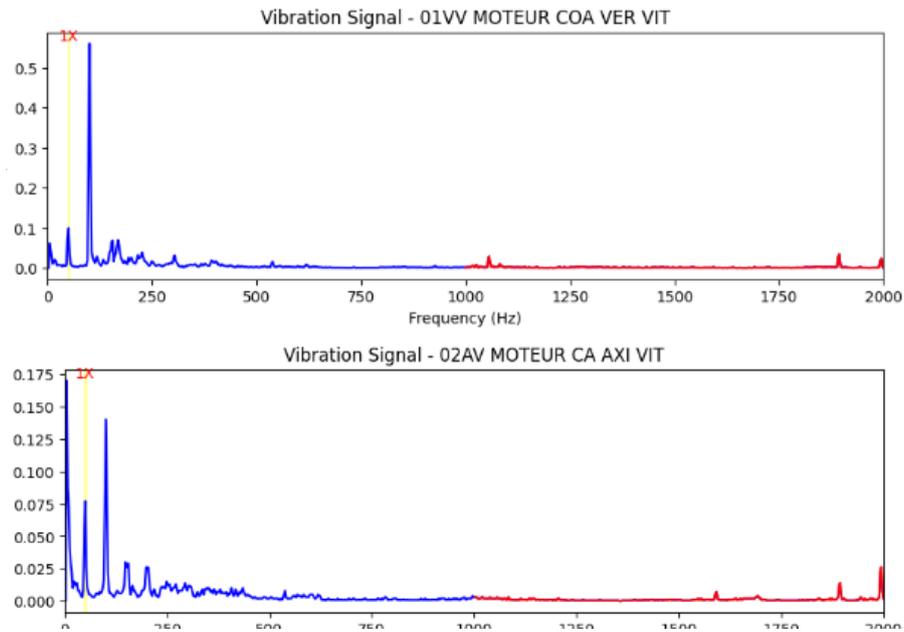


FIGURE 4.15 – FFT signale de 01VV MOTEUR COA VER VITet 02AV MOTEUR CA AXI VIT

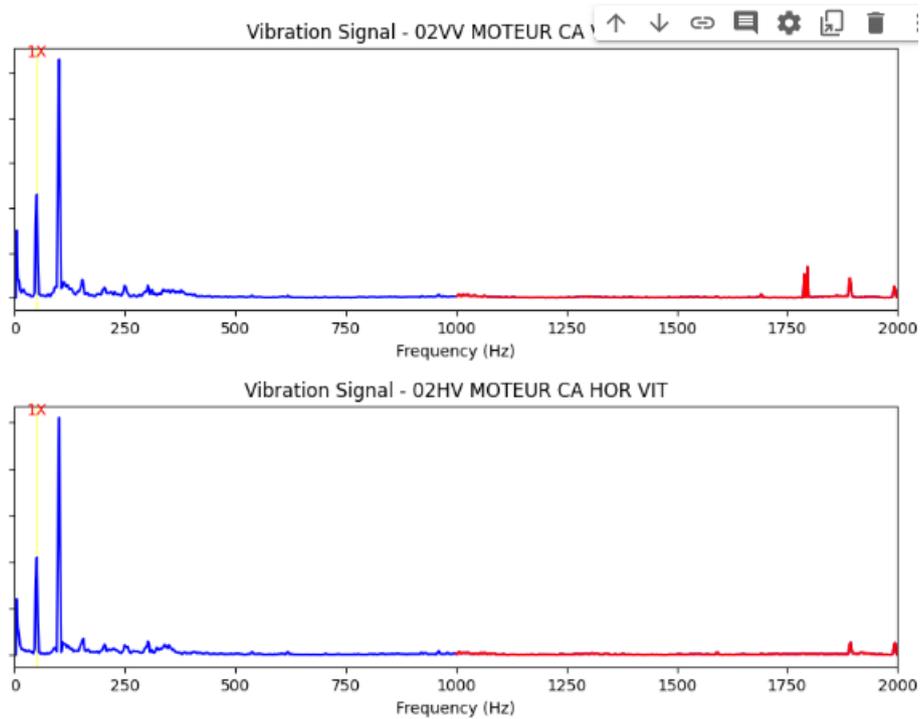


FIGURE 4.16 – FFT signale de 02VV MOTEUR CA VER VIT et 02HV MOTEUR CA HOR VIT

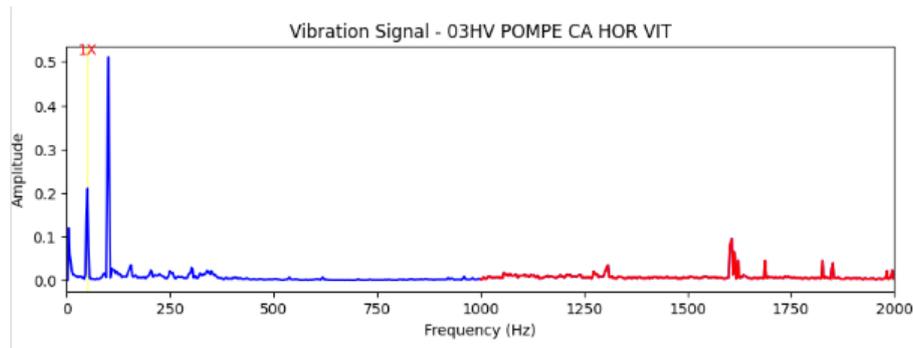


FIGURE 4.17 – FFT signale de 03HV POMPE CA HOR VIT

Après avoir tracé les signaux FFT de chaque mesure, j'ai remarqué que le signal de 03HV POMPE CA HOR VIT présente des caractéristiques distinctes des autres signaux. Ces caractéristiques suggèrent la présence de défauts dans le roulement associé à ce point de mesure(des pics de vibrations a haute fréquence sont générées environs 1.6 k.

En conséquence, j'ai décidé de me concentrer spécifiquement sur ce roulement NU313 ECM et d'analyser les signaux d'enveloppe correspondants. Les signaux d'enveloppe fournissent des informations plus détaillées sur les variations d'amplitude et de fréquence, ce qui facilite la détection des défauts potentiels.

4.4.2.2 Roulement à rouleaux cylindriques à une rangée, type NU

Roulement à rouleaux cylindriques à une rangée, type NU Les roulements à rouleaux cylindriques à une rangée sont conçus pour supporter des charges radiales élevées, à des vitesses élevées. Équipés de deux épaulements sur la bague extérieure et sans aucun épaulement sur la bague intérieure, les roulements de type NU peuvent supporter un déplacement axial dans les deux sens. L'une des principales caractéristiques de ces roulements est

- -la conception séparable, qui facilite le montage et permet d'échanger les composants du roulement.
- -Capacité de charge radiale élevée
- -Faible frottement
- -Longue durée de service
- -Supportent un déplacement axial dans les deux sens
- -Conception séparable



4.4.2.3 Roulement à rouleaux cylindriques UN

TABLE 4.1 – Spécifications techniques du roulement NU313 ECM

Dimensions	
Diamètre d'alésage	65 mm
Diamètre extérieur	140 mm
Largeur	33 mm
Performance	
Charge dynamique de base	212 kN
Charge statique de base	196 kN
Dimensions d'appui - NU 313 ECM	
Diamètre de l'entretoise (da min.)	77 mm
Diamètre de l'entretoise (da max.)	80 mm
Diamètre d'appui de l'arbre (db min.)	85 mm
Diamètre d'appui du palier (Da max.)	127.8 mm
Rayon du congé (ra max.)	2 mm
Rayon du congé (rb max.)	2 mm
Données de calcul	
Charge dynamique de base (C)	212 kN
Charge statique de base (C0)	196 kN
Limite de fatigue (Pu)	25.5 kN
Vitesse de référence	5,300 r/min
Vitesse limite	6,000 r/min
Coefficient de charge minimale (kr)	0.15
Valeur limite (e)	0.2
Coefficient de calcul (Y)	0.6

4.4.3 calcule les fréquences de défaillance de roulement NU313ECM

Dans cette étape, nous allons calculer les fréquences de défaillance des roulements et la fréquence de rotation du roulement NU313 ECM en utilisant des formules mathématiques

appropriées et les spécifications techniques (dimension, d_m ...). Pour effectuer ces calculs, nous allons utiliser le module "math" en Python

```
import math

def calculate_fault_frequency_cage(f_0, d, D_m, alpha):
    f_c = 0.5 * (1 + (d / D_m) * math.cos(alpha))
    return f_c * f_0

def calculate_fault_frequency_inner_ring(f_0, d, D_m, alpha, Z):
    f_c = 0.5 * (1 + (d / D_m) * math.cos(alpha))
    return f_c * f_0 * Z

def calculate_fault_frequency_outer_ring(f_0, d, D_m, alpha, Z):
    f_o = 0.5 * (1 - (d / D_m) * math.cos(alpha))
    return f_o * f_0 * Z

def calculate_fault_frequency_rolling_element(f_0, d, D_m, alpha, Z):
    term = 1 - ((d / D_m) * math.cos(alpha))**2
    return (D_m / d) * term * f_0 * Z

# Example usage
f_0 = # Natural frequency of rotation of the bearing
d = 1 # Diameter of the rolling element
D_m = 1 # Mean diameter of the bearing
alpha = math.radians() # Angle of contact in radians
Z = 8 # Number of rolling elements
```

FIGURE 4.18 – Calcul des fréquences de défaillance des roulements avec le module math en Python

Fréquence de rotation				Fréquences synonymes de défauts		
Bague intérieure	Bague extérieure	Ensemble éléments roulants et cage	Élément roulant sur son axe de rotation	Sur la bague intérieure	Sur la bague extérieure	Élément roulant
f_i (Hz)	f_e (Hz)	f_c (Hz)	f_r (Hz)	f_{ip} (Hz)	f_{ep} (Hz)	f_{rp} (Hz)
49.583	0	19.761	117.157	387.684	256.899	234.315

FIGURE 4.19 – les fréquences des défauts

Le calcul des fréquences de défaillance est essentiel dans l'analyse des signaux d'enveloppe pour détecter les défauts des roulements. En incorporant ces fréquences dans les signaux d'enveloppe, on peut extraire des caractéristiques spécifiques liées aux défauts et les utiliser pour la détection de défaillance.

4.4.4 Classification des défauts du roulement NU313 ECM en utilisant les signaux d'enveloppe

Les étapes pour la classification des défauts du roulement NU313 ECM en utilisant les signaux d'enveloppe sont les suivantes :

Importation des données : (preprocessing of datas)

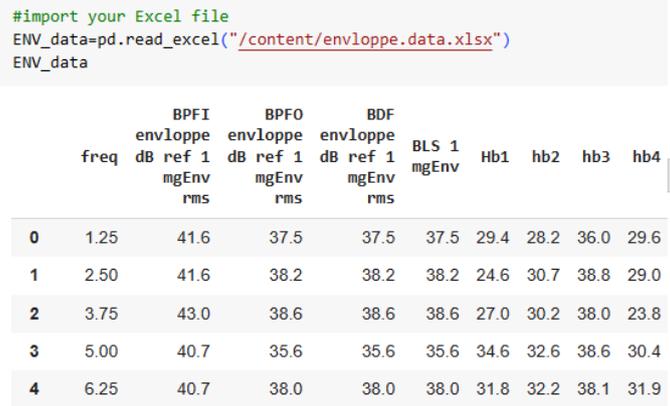


FIGURE 4.20 – importation des données

Importez les données pertinentes qui contiennent les signaux d’enveloppe pour les différents types de défauts (BPFI, BPFO, BDF) ainsi que les signaux de roulements sains. Utilisez les bibliothèques **pandas** et **numpy** pour gérer et manipuler les données.

2- Description des données : la description des données pour chaque échantillon en utilisant la fonction `info()` de pandas :

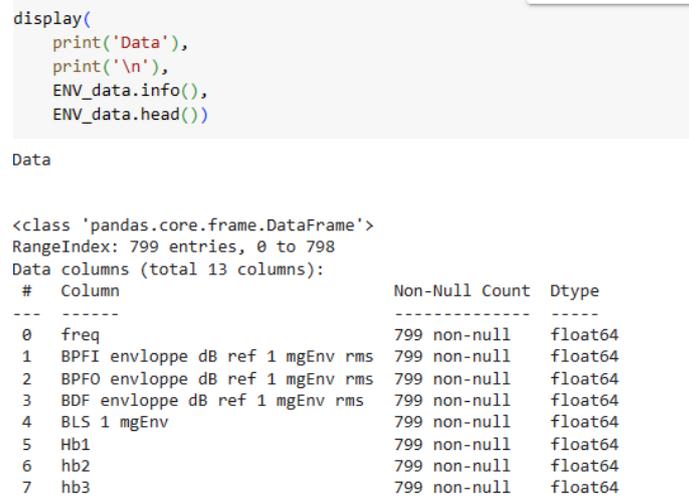


FIGURE 4.21 – informations sur les données en utilisant la fonction `info()`

b. **Représentations des données** (défauts de roulement NU313 ECM dans les signaux d’enveloppe) :

Dans cette étape, nous utilisons la bibliothèque `matplotlib` en Python pour visualiser les signaux d’enveloppe correspondant aux différents types de défauts du roulement NU313 ECM.

```

# Specify the column to plot
column = 'BPFI enveloppe dB ref 1 mgEnv rms'

# Retrieve the data for the specified column
signal = ENV_data[column].values

# Set the x-axis values as frequencies
frequencies = np.linspace(0, frequency_range, len(signal))

# Create a new figure for the plot
fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 3))

# Plot the vibration signal
ax.plot(frequencies, signal, color='blue')

# Define the fault frequencies
BPFI = 387.684

# Add red lines for 1x BPFI and 2x BPFI
ax.axvline(x=BPFI, color='red', linestyle='--', label='1x BPFI')
ax.axvline(x=2 * BPFI, color='red', linestyle='--', label='2x BPFI')

# Add text labels for fault frequencies
ax.text(BPFI, max(signal), '1x BPFI', color='red', va='bottom', ha='center')
ax.text(2 * BPFI, max(signal), '2x BPFI', color='red', va='bottom', ha='center')
    
```

FIGURE 4.22 – code pour visualiser les les signaux des défauts de NU313 ECM

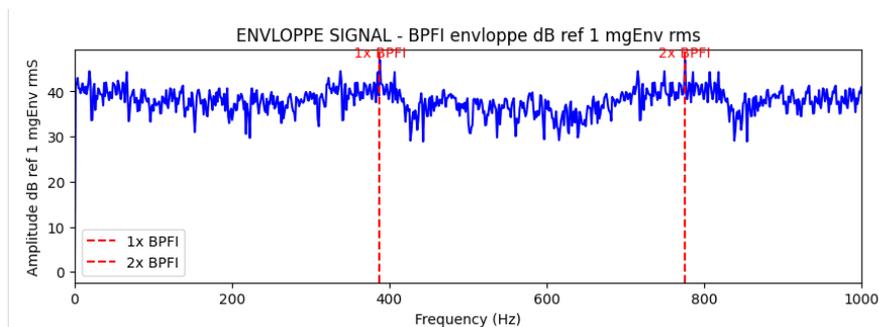


FIGURE 4.23 – enveloppe signal de défaut BPFI

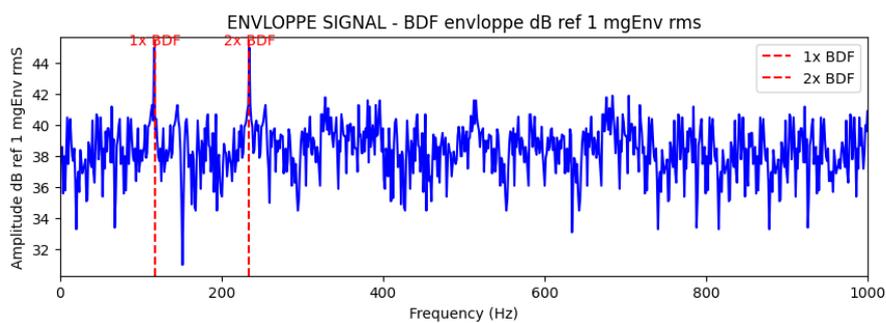


FIGURE 4.24 – enveloppe signal de défaut BDF

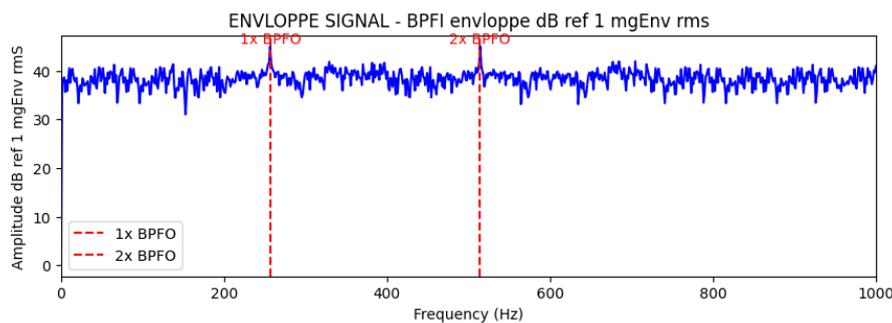


FIGURE 4.25 – enveloppe signal de défaut BPFO

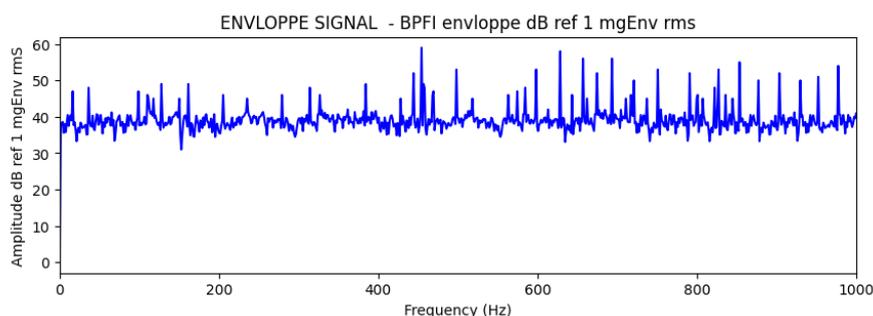


FIGURE 4.26 – Dernier stade de défaillance des roulements (BLS) Enveloppe du signal

- Cette représentation graphique nous permet de mieux comprendre la structure des signaux et d'identifier les caractéristiques distinctes associées à chaque type de défaut. En examinant ces visualisations, nous pourrions observer les variations de fréquence, d'amplitude et de forme des signaux, ce qui facilitera l'analyse et la détection des défauts du roulement NU313 ECM.

4.4.5 La Construction des modèles d'intelligence artificielle AI

Il y a des dizaines des algorithmes de ML : Machine Learning, et plusieurs architectures des réseaux des neurones artificiels ANN, chaque est modèle caractérisé par ses paramètres, et donne une précision (Accuracy) qui nous s'intéresse. La performance d'un modèle est évaluée par la valeur d'Accuracy (précision), La performance d'un modèle est évaluée par la valeur d'Accuracy (précision), qu'il s'agit simplement d'un rapport entre les prédictions correctes et le nombre total des prédictions. Ainsi que l'évolution de la fonction de coût (Loss Function) des modèles.

4.4.5.1 Les algorithmes de Machine Learning

Pour avoir une précision mieux qui de MLP, on construit des modèles de ML avec ces données de simulation standardisées. Ces modèles possèdent des différentes configurations La précision des algorithmes (modèles) de ML pour la détection des défauts de roulements NU313 est résumée au graphe suivant :

On remarque qu'il y a six (06) algorithmes qui possèdent des précisions satisfaites (plus de 90%), on choisisse deux (02) algorithmes pour l'applique à notre problème.

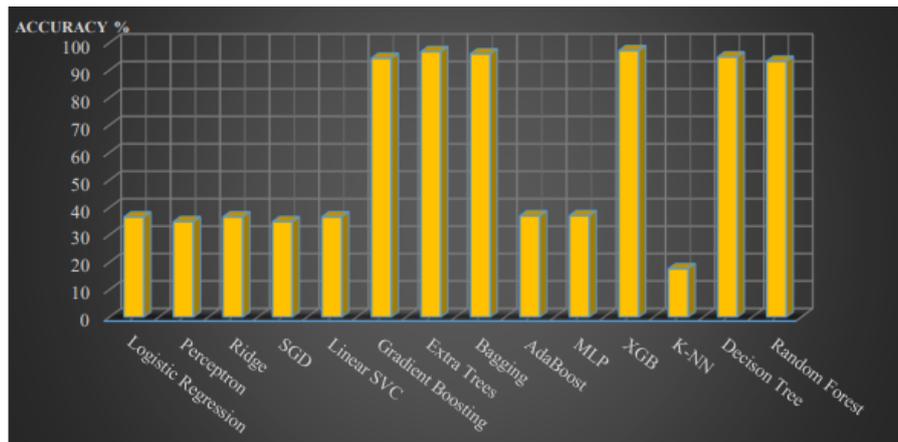


FIGURE 4.27 – - La précision de diagnostic des algorithmes de ML

a. Random Forest Classificateur (RF) Le RF est un algorithme de ML pour les problèmes de classification. Après la préparation des données d'entrées, et entraînée ce modèle. Après l'entraînement du modèle RF, on a obtenu une bonne précession de 93.09%. la figure : la précision, recall, F1-Score et support qui sont des indicateurs supplémentaires de la performance de ce modèle, ils sont des valeurs proches à 1 qui indique la bonne performance de RF à la classification,et donc au bon diagnostic de l'état état de roulement NU313 ECM

	precision	recall	f1-score	support
1	0,83	1,00	0,91	4967
2	1,00	0,89	0,94	4513
3	1,00	0,90	0,95	5069

FIGURE 4.28 – Indicateurs supplémentaires sur la performance du modèle RF de modèle RF

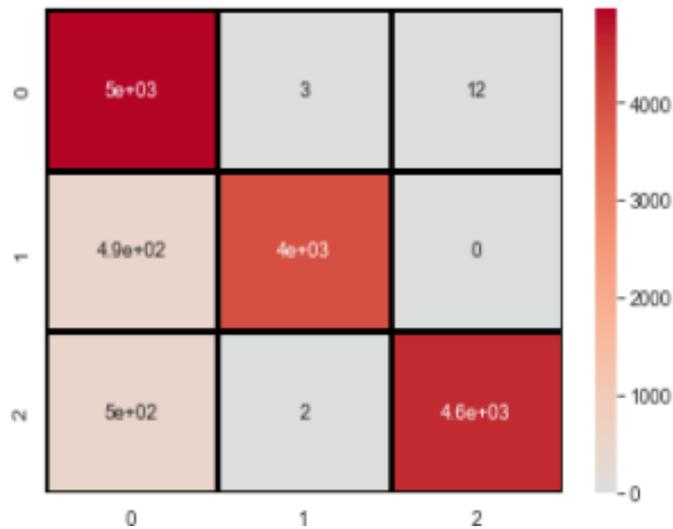


FIGURE 4.29 – La matrice de confusion de modèle RF

La matrice de confusion Figure 4.31 montre les résultantes des prédictions du modèle sur l'ensemble de test dont l'axe y montre les classes réelles, et l'axe x montre les prédictions. On remarque qu'il y a une petite confusion à la matrice de confusion (Confusion matrix), lorsque la prédiction du première classe (la classe numéro 0) par rapport au premier et la deuxième classe (la classe numéro 1 et 2), cela dû à la similarité des quelques parties des vibrations, et aussi dû à la réduction du volume des données. Les deux classes restées sont bien prédites par le modèle RF, et donc prennent des petites valeurs (3, 12, 0 et 2). La diagonale représente les valeurs prédites correctement par rapport aux valeurs réelles sur les données de test, qui sont des grandes valeurs et donc une bonne précision du modèle.

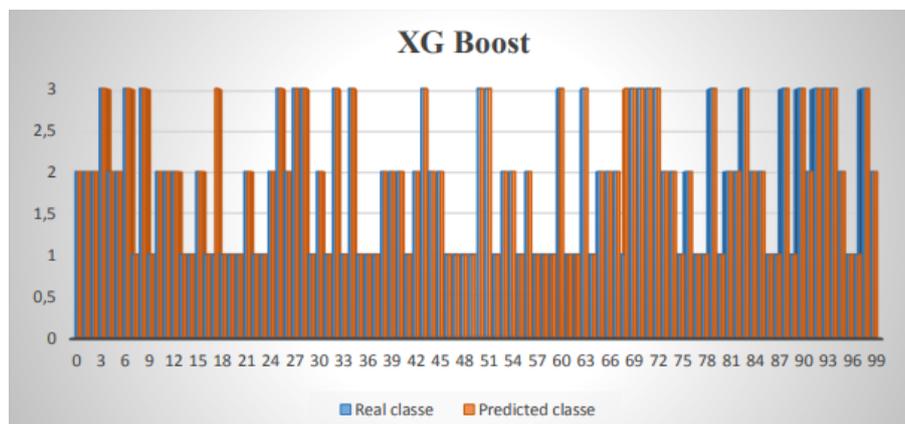


FIGURE 4.30 – Comparaison entre les valeurs réelles et prédites par le RF

b. XGBoost Classificateur (XGB) : Le XGB est un algorithme de ML pour les problèmes de classification. Il est basé sur un arbre de décision qui utilise un procesus appelé boosting pour améliorer les performances. Après la préparation des données d'entrées, et entraînée ce modèle, On a obtenu une précision optimale de 97.17%. La figure : precision, recall, F1-Score et support qui sont des indicateurs supplémentaires de la performance de ce modèle, ils sont des valeurs proches à 1 qui indique la bonne performance de XGB à la classification, donc le détection de défauts de roulement

	precision	recall	f1-score	support
1	0,83	1,00	0,91	4967
2	1,00	0,89	0,94	4513
3	1,00	0,90	0,95	5069

FIGURE 4.31 – Indicateurs supplémentaires sur la performance du modèle XGB

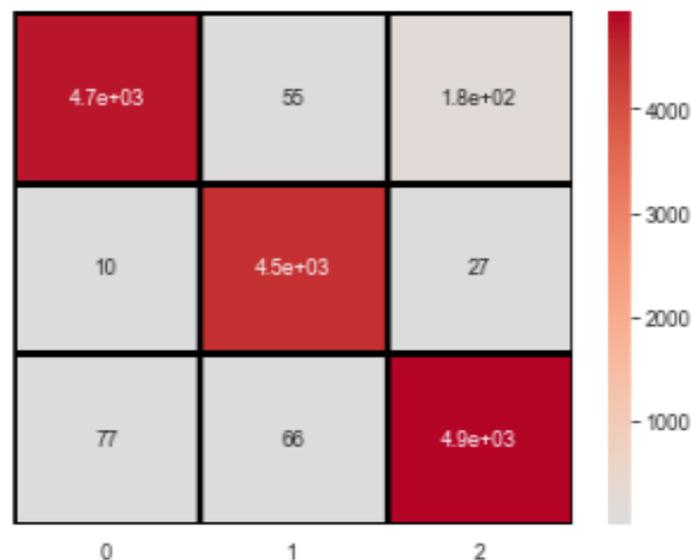


FIGURE 4.32 – F La matrice de confusion de modèle XGB

La matrice de confusion de XGB (Figure IV.24) a des quelques amélioration par rapport à celle de RF, tandis qu'il y a une petite confusion à la prédiction d'un seule classe : le premier classe (la classe numéro 0) par rapport la troisième classe (la classe numéro 2), cela dû à la similarité des quelques parties des vibrations, et aussi dû à la réduction du volume des données. La diagonale représente les valeurs prédites correctement par rapport les valeurs réelles sur les données de test, qui sont des grandes valeurs et donc une bonne précision (la précision optimale).

4.5 Implémentation du modèle d'IA dans le système de surveillance de la pompe 06-P-531-B.

En plus de détecter les défauts de roulements NU313 ECM, l'implémentation d'un modèle d'IA dans le système de surveillance de la pompe 06-P-531-B offre l'avantage

de réduire le temps de diagnostic des défauts. Grâce à l'automatisation et à l'analyse en temps réel des données de surveillance, le modèle d'IA peut rapidement identifier les signaux caractéristiques des défauts de roulements, ce qui permet d'accélérer le processus de diagnostic. Cela permet aux équipes de maintenance d'intervenir plus rapidement, de réduire les temps d'arrêt de la pompe et d'améliorer l'efficacité globale des opérations dans le CPF (Centre de Traitement de Gaz).

4.6 conclusion

Il semble que les modèles d'intelligence artificielle soient des outils puissants et donnent de bons résultats dans la prédiction de l'état des roulements NU313 ECM. Malgré la mauvaise précision du réseau de neurones (MLP), les modèles de machine learning atteignent des résultats très optimisés. Par exemple, le Random Forest affiche une précision de 93,09% et le XGBoost atteint une certitude de 97,17%. Cette performance encourageante nous motive à adopter ces modèles pour répondre à la problématique de surveillance de la pompe 06-P-531-B.

En implémentant ces modèles d'IA dans un système de surveillance automatique, il est possible de détecter efficacement les défauts de roulements NU313 ECM et de protéger les parties sensibles et coûteuses de la pompe. Cette approche permet de réduire les temps de diagnostic, d'améliorer la réactivité des équipes de maintenance et de minimiser les temps d'arrêt de la pompe, ce qui contribue à une optimisation globale des opérations dans le Centre de Traitement de Gaz (CPF).

Conclusion Generale

L'industrie pétrolière est un domaine critique et compétitif où les coûts d'arrêt dus à des décisions de maintenance inadéquates peuvent être élevés, impactant la maintenabilité, la sécurité et l'environnement. La maintenance joue un rôle essentiel non seulement pour limiter les pannes, mais surtout pour prévenir les défaillances potentielles, ce qui permet de gagner du temps, d'améliorer la productivité et la rentabilité des opérations de forage. Afin d'optimiser la stratégie de maintenance, une approche de surveillance assistée par l'intelligence artificielle a été proposée dans ce mémoire.

Dans cette étude, j'ai utilisé des données de vibration et l'analyse FFT pour effectuer un premier diagnostic, ainsi que des signaux enveloppe pour la détection des défauts de roulements NU313 ECM dans la pompe 06-P-531-B. En utilisant les données réelles de software polymanger BP equinor, j'ai appliqué des algorithmes d'intelligence artificielle pour la détection des défauts de roulement de la pompe 06-P-531-B. Les résultats obtenus ont été satisfaisants, assurant un contrôle automatique de l'état de santé des roulements NU313 avec une précision de 97%, éliminant ainsi les erreurs liées au contrôle humain.

Il est proposé d'adopter ce système de surveillance dans les plateformes pétrolières, où les données de surveillance sont facilement disponibles à partir des capteurs et de l'historique, prêtes à être exploitées et utilisées. Cela permettra d'améliorer la maintenance préventive, de réduire les temps d'arrêt coûteux et d'optimiser les opérations globales. En intégrant l'intelligence artificielle dans le processus de surveillance, il est possible de prendre des décisions éclairées et de mettre en place des actions de maintenance préventive efficaces, contribuant ainsi à la performance et à la rentabilité des activités pétrolières.

Bibliographie

- [1] Moussa Zarour, Omar Encadreur Tekkouk, et al. *Etude d'une station de compression de gaz naturel par le système numérique de commande et de contrôle (DCS)*. PhD thesis, Université de Jijel, 2017.
- [2] Hasnaa HAMIDI, Nihad BOUCHHER, MOUNIR ALLICHE, and Walid BENAI-CHOUBA. Etude de conception d'une pompe volumétrique fonctionnant avec le principe des pressions différentielles. 2022.
- [3] Igor J Karassik. *Centrifugal Pump Clinic, Revised and Expanded*, volume 68. CRC Press, 2017.
- [4] Jean-François Combes and Antoine Archer. Etude de la cavitation dans la pompe shf. *La Houille Blanche*, (5) :93–98, 2001.
- [5] Islam BOUBREK and Noureddine TENNAH. *ETUDE DES DIFFERENTES METHODES, DE MAINTENANCE D'UNE POMPE CENTRIFUGE*. PhD thesis, Université Ibn Khaldoun-Tiaret-, 2017.
- [6] Nirmal Ganatra, RC Patel, et al. Witness testing of api 610 centrifugal pumps and api 611 steam turbines. In *Proceedings of the 29th International Pump Users Symposium*. Turbomachinery Laboratories, Texas A&M Engineering Experiment Station, 2013.
- [7] Anders Brandt. *Noise and vibration analysis : signal analysis and experimental procedures*. John Wiley & Sons, 2023.
- [8] Mihaela Albu and Gerald T Heydt. On the use of rms values in power quality assessment. *IEEE transactions on power delivery*, 18(4) :1586–1587, 2003.
- [9] Mohamed MIR. *Etude expérimentale pour la détermination des sources de vibrations mécaniques lors de l'application du procédé de fraisage*. PhD thesis, Université Blida1-Saad Dahlab.
- [10] Patrick Fayet. Comment capter les vibrations? *Acoustique & techniques*, (57) :4–9, 2009.
- [11] Asmaa CHEKKOURI and Yousra ABOULHASSAN. Rapport de projet de fin d'année.
- [12] Alain Verry. Bruit et vibrations des pompes. *La Houille Blanche*, (8) :521–526, 1993.
- [13] Farid Dechicha, Mohamed Rafik Gherabli, and Sidahmed Lachenani. Etude et simulation d'un système pour la détection des défauts dans les roulements. 2019.

- [14] Ahmed Oussama BEKOUICHE Soufiane MAOUCHE. Diagnostic des défauts des roulements par l'analyse d'enveloppe.
- [15] Gana Massine. *Implémentation d'un réseau de neurones dans un microcontrôleur*. PhD thesis, Université Mouloud Mammeri, 2016.
- [16] Coline Talon, Emilie Dautrême, Emmanuel Remy, Yannick Dirat, and Christelle Dinse Le Strat. Analyse de différents algorithmes de classification par apprentissage automatique sur un cas d'usage du domaine nucléaire. In *Congrès Lambda Mu 21 «Maîtrise des risques et transformation numérique : opportunités et menaces»*, 2018.
- [17] Onesmus Mbaabu. Introduction to random forest in machine learning. *Berreskuratua-(e) tik <https://www.section.io/engineering-education/introduction-to-random-forest-in-machine-learning>*, 2020.
- [18] Hamza Bouarroudj, Cherif Aissou, and Karima Sid. Le deep learning et le criblage virtuel pour découvrir de nouveaux médicaments. 2022.