

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI – TIZI OUZOU

Faculté du Génie de la Construction

Département Électromécanique



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de master en maintenance industrielle.

Domaine : Science Et Technologie

Filière : Électromécanique

Thème

**Diagnostic Des Pannes Des Pompes
Centrifuge Par Estimation Paramétrique**

Réaliser par :

M. BOURAS Sid Ali

M. CHIBANI Karim

Mémoire soutenu le 01/10/ 2023 devant le jury composé de :

M. CHERABI Bilal	MCB	UMMTO	Promoteur
M. YAMANI Nouredine	MCB	UMMTO	Président
M. OUELMOKHTAR Hand	MCB	UMMTO	Examineur

Promotion 2022/2023

Remerciements

Nous remercions Dieu pour la force et la persévérance qu'Il nous a accordées tout au long de ce parcours académique.

Nous souhaitons adresser nos vifs remerciements à notre encadrant, le Dr CHERABI BILEL, pour sa direction éclairée, ses conseils avisés, et son soutien constant tout au long de notre travail. Sa patience et son expertise ont été d'une valeur inestimable pour l'achèvement de ce travail. Nous sommes reconnaissants pour son engagement envers notre réussite académique.

Nous tenons également à exprimer notre gratitude envers les membres du jury, M. Ouelmokhtar Hand et M. Yamani Nouredine, pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour nous avoir honorés de leur présence lors de cette évaluation.

Nos familles et nos amis méritent un immense merci pour leur amour, leur encouragement et leur soutien indéfectible tout au long de cette aventure académique.

Ce mémoire est le résultat d'un effort collectif, et je suis reconnaissant envers chacun d'entre vous pour votre rôle essentiel dans cette réussite.

Dédicace

C'est avec grand plaisir que je dédie ce modeste travail à :

Ma très chère famille

Pour leur encouragement, leur aide et sacrifice durant toutes mes années
d'études

Mes proches, amies et connaissances

Pour leur amour et affection et qui m'ont toujours chaleureusement soutenu

Mon binôme

Avec qui j'ai passé des moments d'émotions et de partage extraordinaire

Lors de la réalisation de ce travail

Et enfin à tous ce qui ont été pour moi une grâce et une source de motivation.

Karim.

Dédicace

Avec une immense gratitude, je dédie ce modeste travail à :

Ma précieuse famille,

Pour votre inlassable encouragement, votre soutien indéfectible et les sacrifices consentis tout au long de mon parcours académique.

Mes chers amis et proches,

Pour votre amour sincère, votre affection constante, et vos encouragements chaleureux qui ont été ma source d'inspiration.

À mon binôme,

Avec qui j'ai partagé des moments d'émotion et de collaboration extraordinaires tout au long de cette réalisation.

Enfin, à tous ceux qui ont été une grâce et une inépuisable motivation dans cette aventure.

Sid Ali.

Résumé

Ce mémoire se concentre sur la surveillance et la détection des défauts dans les pompes centrifuges, des équipements fondamentaux dans diverses industries. L'étude débute par une exploration approfondie du fonctionnement des pompes centrifuges, de leurs composants essentiels et des défauts couramment rencontrés. L'importance cruciale de la maintenance préventive et de la détection précoce des pannes est soulignée pour garantir un fonctionnement optimal. L'une des principales méthodes examinées est l'estimation paramétrique, qui repose sur des techniques mathématiques pour surveiller en permanence les performances des pompes en estimant les paramètres du modèle à partir de données de fonctionnement nominal. Cette approche permet la détection proactive des écarts par rapport aux valeurs nominales. L'étude introduit également l'intégration de l'apprentissage automatique (machine learning) dans le processus de détection de pannes des pompes centrifuges. L'apprentissage automatique offre la capacité de détecter des modèles et des anomalies dans les données, améliorant ainsi la précision de la détection et permettant une maintenance proactive et efficace. En combinant l'estimation paramétrique et l'apprentissage automatique, cette recherche propose une approche complète pour la surveillance et la détection des pannes des pompes centrifuges. Cette approche offre un potentiel significatif pour améliorer la fiabilité, l'efficacité et la durabilité de ces équipements industriels essentiels.

Mots clés : pompes, pompe centrifuge, diagnostic, détection, pannes, maintenance, estimation paramétrique.

Abstract

This dissertation focuses on monitoring and fault detection in centrifugal pumps, fundamental equipment in various industries. The study begins with an in-depth exploration of the operation of centrifugal pumps, their essential components and commonly encountered faults. The crucial importance of preventive maintenance and early detection of faults is emphasized to ensure optimal operation. One of the main methods examined is parametric estimation, which relies on mathematical techniques to continuously monitor pump performance by estimating model parameters from nominal operating data. This approach allows proactive detection of deviations from nominal values. The study also introduces the integration of machine learning into the process of fault detection of centrifugal pumps. Machine learning provides the ability to detect patterns and anomalies in data, thereby improving detection accuracy and enabling proactive and efficient maintenance. By combining parametric estimation and machine learning, this research provides a comprehensive approach for monitoring and fault detection of centrifugal pumps. This approach offers significant potential to improve the reliability, efficiency and sustainability of this essential industrial equipment.

Key words: pump, centrifugal pumps, fault diagnosis, industrial maintenance, parameter estimation.

ملخص :

تركز هذه الأطروحة على المراقبة والكشف عن الأخطاء في مضخات الطرد المركزي، والمعدات الأساسية في مختلف الصناعات. تبدأ الدراسة باستكشاف متعمق لتشغيل مضخات الطرد المركزي ومكوناتها الأساسية والأخطاء الشائعة. يتم التأكيد على الأهمية الحاسمة للصيانة الوقائية والكشف المبكر عن الأخطاء لضمان التشغيل الأمثل. إحدى الطرق الرئيسية التي تم فحصها هي التقدير البارامترى، الذي يعتمد على التقنيات الرياضية لمراقبة أداء المضخة بشكل مستمر من خلال تقدير معلمات النموذج من بيانات التشغيل الاسمية. يسمح هذا النهج بالكشف الاستباقي عن الانحرافات عن القيم الاسمية. تقدم الدراسة أيضاً دمج التعلم الآلي في عملية اكتشاف أخطاء مضخات الطرد المركزي. يوفر التعلم الآلي القدرة على اكتشاف الأنماط والشذوذات في البيانات، وبالتالي تحسين دقة الكشف وتمكين الصيانة الاستباقية والفعالة. من خلال الجمع بين التقدير البارامترى والتعلم الآلي، يوفر هذا البحث نهجاً شاملاً لرصد واكتشاف الأخطاء في مضخات الطرد المركزي. يوفر هذا النهج إمكانات كبيرة لتحسين موثوقية وكفاءة واستدامة هذه المعدات الصناعية الأساسية.

كلمات مفتاحية: المضخات، مضخات الطرد المركزي، الصيانة الصناعية، المراقبة، التقدير البارامترى.

Liste des symboles

HMT : Hauteur manométrique total (m)

H : La hauteur manométrique se mesure en mètres (m)

g : Vitesse de pesanteur ou gravité (m/s^2)

ρ : Masse volumique (kg/m^3)

ΔP : La différence de pression

P : Pression (Pa)

N.P.S.H : (Net Positive Suction Head) ou hauteur de charge nette absolue

NPSHa : (available) disponible (la hauteur d'aspiration disponible dans l'installation)

NPSHr : Hauteur d'aspiration positive nette (requis)

K₀, K₁, K₂ : Caractéristique de couple pompe

h_{nv}, h_{vv}, h_{nn} : Caractéristique de hauteur de refoulement

Q_v, Q : Débit volumique, Débit de refoulement (m^3/h)

Mp : Couple pompe (N*m)

ω : vitesse de rotation (tr/min)

Liste des figures

Figure I-1 : Transformation de l'énergie mécanique en énergie hydraulique.....	4
Figure I-2 : Détail accouplement.	5
Figure I-3: Les différents types de pompes.	8
Figure I-4 : Domaine d'utilisation des deux grandes catégories de pompes.....	9
Figure I-5 : Cycle de la pompe à engrenages externes.	11
Figure I-6 : Pompe à engrenages internes.	11
Figure I-7 : Diagramme de la pompe à lobes	12
Figure I-8: Diagramme de la pompe à palettes	12
Figure I-9: Éclaté de pompes à vis.....	13
Figure I-10 : Pompe à vis excentrées (Type Moineau).....	14
Figure I-11: Diagramme de la pompe péristaltique.	15
Figure I-12: Détail pompe à piston.	16
Figure I-13: Principe pompe à membrane.....	17
Figure I-14: éclaté de pompe doseuse.....	18
Figure I-15: Pompes à piston plongeur.....	19
Figure II-1:Exemple de pompe centrifuge.....	23
Figure II-2 : Principe de fonctionnement pompe centrifuge	24
Figure II-3 : constitution d'une pompe centrifuge.....	25
Figure II-4 : Type de roues.....	26
Figure II-5 : Classification de pompe centrifuges.....	28
Figure II-6 : l'écoulement de fluide à travers la pompe.	29
Figure II-7 : Pompe monocellulaire.....	30
Figure II-8 : Pompe multicellulaire.	31
Figure II-9 : Les différentes position d'installation de la pompe	32
Figure II-10 : Pompe en charge.....	33
Figure II-11 : Pompe en aspiration.	34
Figure II-12: Différents types de montage des pompes.....	34
Figure II-13: Roue à simple aspiration.	35
Figure II-14: Roue à double aspiration.....	35
Figure II-15 : Rotor	36
Figure II-16: Roulement à billes / roulement à rouleaux.....	37
Figure II-17 : Les composants essentiels d'un roulement.	38
Figure II-18: Paliers lisses (coussinets).	38
Figure II-19: Roulement à 2 rangées de billes à contact	39
Figure II-20 : bague d'usure	41
Figure II-21 : Joint à lèvres / Garniture mécanique.....	42
Figure II-22 : Constitution d'une garniture mécanique	43
Figure II-23 : Pompes en série.	44
Figure II-24 : Couplage en parallèle.	45
Figure III-1: schématisation des objectifs de la maintenance.	50
Figure III-2:Déférents types de maintenance industrielle.	51
Figure III-3: Salle de contrôle.	55

Figure III-4: Images thermographiques.....	59
Figure III-5: Les différents types de méthodes basées sur la redondance analytique.....	64
Figure III-6 : Roue à aubes soumise à la cavitation	67
Figure III-7: Déport angulaire /Déport parallèle	71
Figure IV-1 : Les caractéristiques de la hauteur de refoulement de la pompe(saine).	76
Figure IV-2 : Les caractéristiques de couple de la pompe (saine).....	76
Figure IV-3 : Les caractéristiques de la hauteur de refoulement des pompes avec différents écarts de jeu.....	78
Figure IV-4: Les caractéristiques de couple des pompes avec différents écarts de jeu.....	78
Figure IV-5 : Les caractéristiques de la hauteur de refoulement de la pompe pour 5 tests.....	82
Figure IV-6 : Les caractéristiques de couple de pompe pour 5 tests.	83
Figure IV-7 : Ellipsoïdes de confiance à 2 écarts types pour les paramètres de la hauteur de refoulement.....	85
Figure IV-8: Ellipsoïdes de confiance à 2 écarts types pour les paramètres de couple	86
Figure IV-9 : Ellipsoïdes de confiance à 2 écarts types pour les paramètres de la hauteur de refoulement en intégrant la distance de Mahalanobis.....	89
Figure IV-10 : Ellipsoïdes de confiance à 2 écarts types pour les paramètres de couple en intégrant la distance de Mahalanobis.....	91
Figure IV-11 : SVM détection d'anomalie pour les paramètres de la hauteur de refoulement.	93
Figure IV-12 : SVM détection d'anomalie pour les paramètres du couple.....	94
Figure IV-13 : histogrammes de mode défauts : Paramètres de hauteur du refoulement.	96
Figure IV-14 : histogrammes de mode défauts : Paramètres de couple.	97
Figure IV-15 : Matrice de confusion pour les paramètres de de la hauteur de refoulement de pompe.....	99
Figure IV-16 : Matrice de confusion pour les paramètres du couple.	99
Figure IV-17 : Évolution de la Probabilité de Mauvaise Classification en Fonction du Nombre d'Arbres dans le Modèle TreeBagger.....	101
Figure IV-18 : Graphique des Erreurs de Classification.	102

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Les avantages et les inconvénients des pompes volumétriques rotatives.	20
Tableau I-2 : Les avantages et les inconvénients des pompes volumétriques alternatives.	21
Tableau III-1 : Différentes techniques d'analyse de l'état d'une machine tournante.	62
Tableau III-2 : les types de défauts les plus courants et les composants affectés ainsi que leurs conséquences.....	74
Tableau IV-1 : Ensemble de mesure d'une pompe d'essai.	84
Tableau IV-2 : Les caractéristiques de couple pour différentes pompes.	85
Tableau IV-3 : Ensemble de mesure d'une pompe d'essai.	85
Tableau IV-4 : Résultats de l'analyse de détection d'anomalies (hauteur de refoulement).	89
Tableau IV-5 :Résultats de l'analyse de détection d'anomalies (couple).	91

Table des matières

Introduction Générale.....	1	
Chapitre I	Généralité sur les pompes.....	3
I. 1 Introduction		3
I. 2 Historique de la pompe		3
I. 3 Définition d'une pompe		3
I. 4 Principe de fonctionnement.....		4
I. 5 Les moyens d'entraînement.....		4
I. 6 Accouplements		5
I. 7 Caractéristique des pompes		7
I. 8 Les différents types de pompes.....		9
I. 8. 1 Les pompes volumétriques		10
I. 8. 2 Les avantages et les inconvénients des pompes volumétriques.....		20
I. 9 Conclusion.....		22
Chapitre II	Les pompes centrifuges	23
II. 1 Introduction.....		23
II. 2 Présentation.....		23
II. 3 Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge :		24
II. 4 Constitution d'une pompe centrifuge		26
II. 4. 1 Distributeur		26
II. 4. 2 L'impulser (la roue).....		26
II. 4. 3 Le récupérateur (l'enveloppe).....		28
II. 4. 4 Arbre		28
II. 4. 5 Bague d'étanchéité		28
II. 4. 6 Roulements		28
II. 5 Classification des pompes centrifuges		29
II. 5. 1 La trajectoire du fluide (trajectoire de l'écoulement)		29
II. 5. 2 Le nombre de cellules		30
II. 5. 3 La position de l'arbre de la pompe		32
II. 5. 4 Les différents montages.....		33
II. 5. 5 La forme de la roue.....		35
II. 6 Utilisation.....		36
II. 7 Fonction guidage axial et en rotation du rotor		37

II. 7. 1 Fonction guidage en rotation	37
II. 7. 2 Fonction guidage axial	40
II. 8 Fonction d'étanchéité dans les pompes centrifuge	40
II. 8. 1 Etanchéité statique	41
II. 8. 2 Etanchéité dynamique	41
II. 9 Fonction lubrification	44
II. 10 Couplages des pompes.....	45
II. 10. 1 Couplage en série	45
II. 10. 2 Couplage en parallèle.....	46
II. 11 Avantages des pompes centrifuges.....	46
II. 12 Inconvénients des pompes centrifuges.....	47
II. 13 Conclusion	47
Chapitre III Diagnostic des pannes des pompes centrifuges.....	48
III. 1 Maintenance industrielle.....	49
III. 1. 1 Définition de la maintenance industrielle	49
III. 1. 2 De l'entretien à la maintenance	49
III. 1. 3 Objective de la maintenance industrielle	50
III. 1. 4 Les niveaux de maintenance industrielle	51
III. 1. 5 Les types de maintenance industrielle.....	52
III. 2 Diagnostic.....	55
III. 2. 1 Notions de diagnostic	56
III. 2. 2 Les méthodes de diagnostic.....	58
III. 2. 3 Méthodes basées sur la redondance matérielle (physique)	58
III. 2. 3. 5 L'analyse acoustique	61
III. 2. 4 Méthodes basées sur la redondance analytique (mathématique).....	63
III. 3 Estimation paramétrique et Machine Learning	65
III. 3. 1 Diagnostic de défauts par estimation paramétrique.....	66
III. 3. 2 Machine Learning	66
III. 1 Le phénomène de cavitation	68
III. 2 N.P.S.H (Net Positive Suction Head) ou hauteur de charge nette absolue	70
III. 2. 1 NPSH_r	70
III. 2. 2 NPSH_a	70
III. 3 Coup de bélier.....	71
III. 4 Usure	71
III. 4. 1 La corrosion	71

Introduction générale

Les pompes sont des composants de base dans la plupart des processus techniques, comme dans les industries électriques et chimiques, les minéraux et les mines, la fabrication, le chauffage, la climatisation et le refroidissement des moteurs. Ils sont principalement entraînés par des moteurs électriques ou par des moteurs à combustion.

On distingue principalement les pompes centrifuges pour les débits élevés avec des pressions plus faibles et les pompes volumétriques pour les pressions élevées et les petits débits. Ils transportent des liquides purs ou des mélanges de liquides et de solides et augmentent ainsi la pression. Les pompes centrifuges sont des dispositifs largement utilisés dans de nombreuses industries pour le transfert de liquides. Elles sont conçues pour augmenter la pression et le débit d'un fluide en utilisant la force centrifuge générée par la rotation d'un rotor à l'intérieur d'une enveloppe. Ces pompes sont essentielles dans des domaines tels que le traitement des eaux, l'industrie pétrolière et gazière, l'industrie chimique, l'agriculture, et bien d'autres. Elles sont appréciées pour leur simplicité de conception, leur efficacité énergétique et leur capacité à manipuler une large gamme de fluides.

Cependant, comme tout équipement mécanique, les pompes centrifuges sont sujettes à des pannes dans ses composants mécaniques. Ces pannes peuvent entraîner une diminution du rendement de la pompe. La maintenance des pompes centrifuges et le diagnostic des pannes représentent des éléments essentiels pour garantir le fonctionnement optimal, fiable et efficace de ces équipements industriels fondamentaux. Le diagnostic des pannes repose sur une variété de méthodes visant à détecter rapidement tout problème potentiel au sein de la pompe centrifuge. Parmi ces méthodes, on distingue la redondance matérielle et analytique. Cette dernière utilise des approches mathématiques notamment l'estimation paramétrique. Cette technique est basée sur l'estimation des paramètres du modèle et la quantification de leur incertitude de ses mesures du bon fonctionnement (nominal) de la machine. Les mesures du système de test sont ensuite utilisées pour réestimer les valeurs des paramètres et les estimations résultantes sont comparées à leurs valeurs nominales.

L'objectif de ce mémoire est d'acquérir une compréhension approfondie du fonctionnement des pompes centrifuges, de leurs composants essentiels, ainsi que des pannes courantes. L'accent est mis sur la détection de ces pannes en combinant les données du fonctionnement nominal avec des techniques d'apprentissage automatique (machine learning), via la plateforme de calcul numérique et de programmation MATLAB. L'apprentissage

automatique est un sous domaine de l'intelligence artificielle (IA), qui permet à des applications de prédire des résultats de plus en plus précis sans être explicitement programmées en ce sens.

Ce mémoire est structuré de manière à fournir une vue d'ensemble complète du domaine des pompes centrifuges et de la maintenance industrielle. Le Chapitre I pose les bases en présentant des généralités sur les pompes, tandis que le Chapitre II plonge plus profondément dans les pompes centrifuges, explorant leurs caractéristiques et leur fonctionnement. Le Chapitre III se consacre au diagnostic des pannes des pompes centrifuges, examinant les méthodes et les outils pour résoudre ces problèmes. Enfin, le Chapitre IV démontre l'utilisation de MATLAB pour l'étude et la simulation, offrant des perspectives pratiques. La conclusion générale résume les points clés, mettant en évidence leur importance pour le secteur industriel des pompes centrifuges.

Chapitre I Généralité sur les pompes

I. 1 Introduction

Une pompe industrielle est un appareil qui convertit l'énergie mécanique fournie par un moteur, qu'il soit électrique, thermique ou autre, en énergie hydraulique. Cette transformation permet de déplacer un fluide d'une position à une autre, qu'il s'agisse du même niveau ou de niveaux différents.[1]

Ce chapitre est consacré à l'étude des pompes industrielles, incluant leur diversité de types et leur mode de fonctionnement.

I. 2 Historique de la pompe

Une pompe est un dispositif permettant d'aspirer et de refouler un fluide, la plus ancienne pompe connue est la pompe à godets inventée en Chine . Les pompes diesel et électriques, utilisées à nos jours, peuvent avoir des débits de pompage très élevés. Le principe de la pompe est apparu dès que l'homme a pu construire un habitat artificiel pour se protéger des éléments nature.

Le besoin en eau nécessaire à sa survie l'oblige à trouver un système de transport de cette eau, du puits ou de la rivière à son habitat. Il utilisa d'abord simplement l'énergie développée par ses muscles pour transporter l'eau à l'aide de récipients naturels ou artificiels. Plus la contenance et la distance étaient grandes, plus l'énergie dépensée a était importante.

Les principes des pompes à piston, des pompes centrifuges et des pompes à vide sont découverts à cette époque. De manière générale, durant la grande époque de la culture gréco-romaine, de nombreux principes de physique et d'hydraulique sont découverts, mais pas forcément développés.

Les Grecs et les Romains furent les premiers à utiliser des systèmes rotatifs pour véhiculer l'eau. On doit aussi à cette époque l'invention des écluses (afin d'éviter les vitesses d'écoulement trop rapide) et les dispositifs anti-béliers sur les conduites fermées, afin d'éviter l'éclatement des conduites. [2]

I. 3 Définition d'une pompe

On appelle pompe, tout appareil qui aspire un fluide d'un milieu à basse pression pour le refouler vers un milieu à plus grande pression. Ainsi d'après cette définition on peut dire que

le rôle de la pompe consiste à augmenter la pression du fluide liquide. L'augmentation de la pression du fluide véhiculé par la pompe a lieu à la suite de la transformation de l'énergie mécanique fournie par un moteur entraînant cette pompe, en une augmentation de l'énergie hydraulique qui est acquise par le liquide entre l'entrée et la sortie de la pompe. [3]

I. 4 Principe de fonctionnement

Les pompes sont des dispositifs qui génèrent une différence de pression entre les conduites d'entrée et de sortie. Selon les conditions d'utilisation, ces machines confèrent au fluide une énergie potentielle (en augmentant la pression en aval) ou une énergie cinétique en mettant le fluide en mouvement. Elles sont couramment utilisées pour convertir l'énergie mécanique fournie par un moteur en énergie hydraulique, permettant ainsi de déplacer un liquide d'un niveau à un niveau supérieur (dans le cas d'une pompe de transfert) ou d'augmenter la pression d'un fluide.

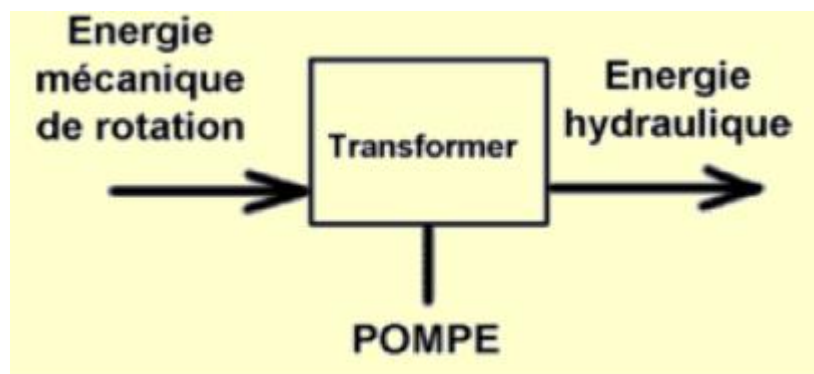


Figure I-1 : Transformation de l'énergie mécanique en énergie hydraulique.[4]

I. 5 Les moyens d'entraînement

Les pompes industrielles, comme de nombreuses autres machines rotatives, sont entraînées par une source d'énergie externe. Cette source d'énergie est généralement une machine d'entraînement qui peut être un moteur électrique, un moteur thermique ou même une turbine, en fonction des besoins spécifiques de l'application.

- **Moteur Électrique :**

Les moteurs électriques sont l'une des sources d'énergie les plus couramment utilisées pour entraîner les pompes centrifuges. Ils offrent de nombreux avantages tels que le contrôle précis de la vitesse, une efficacité élevée et une maintenance relativement simple. Les moteurs électriques sont largement utilisés dans les installations industrielles, commerciales et résidentielles pour alimenter les pompes centrifuges.

- **Moteur Thermique :**

Les moteurs thermiques, en particulier les moteurs à combustion interne, peuvent également servir à entraîner les pompes centrifuges, même si cette pratique est moins répandue. Les moteurs thermiques sont plus couramment employés dans des contextes où l'alimentation électrique n'est pas disponible, ou dans des applications mobiles où la mobilité est essentielle.

- **Turbine :**

Les turbines peuvent également être utilisées pour entraîner les pompes centrifuges, en particulier dans les systèmes de fluides sous haute pression. Les turbines utilisent généralement l'énergie du fluide lui-même pour générer un mouvement rotatif, qui est ensuite transféré à la pompe centrifuge. [5]

I. 6 Accouplements

Organe mécanique permettant de relier un moteur d'entraînement (moteur électrique, moteur diesel, turbine) à un récepteur (pompe compresseur alternateur, génératrice) ; Ils sont prévus pour transmettre la puissance mécanique rotation entre deux arbres sensiblement alignés.

Les accouplements pompe-moteur sont des dispositifs mécaniques utilisés pour connecter l'arbre de la pompe à l'arbre du moteur, permettant ainsi le transfert de puissance de l'entraînement au moteur vers la pompe. Ils assurent une liaison solide et fiable entre les deux composants, permettant un fonctionnement synchronisé et efficace du système.

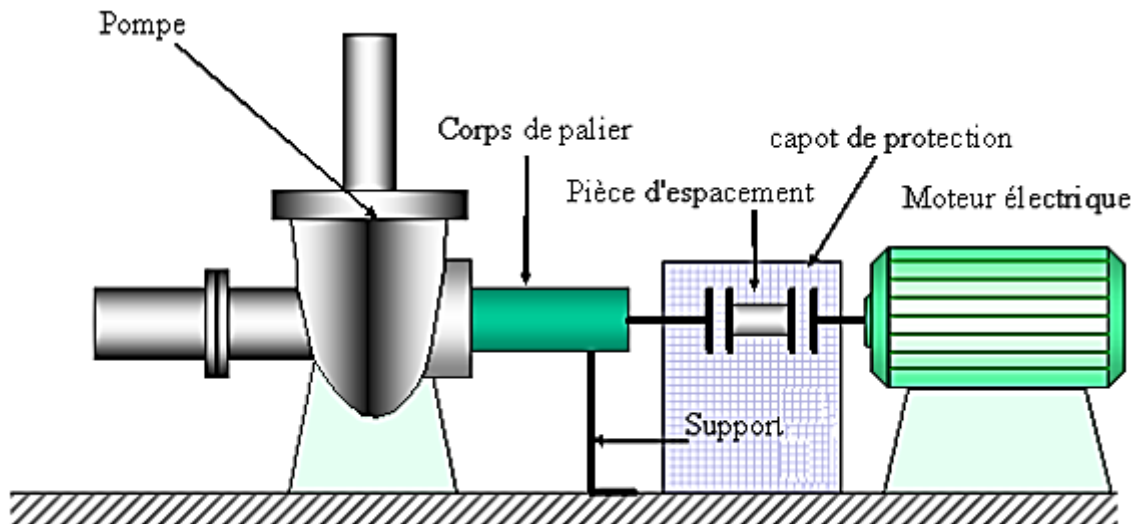


Figure I-2 : Détail accouplement. [5]

Les accouplements pompe-moteur peuvent être de différents types, en fonction des besoins spécifiques de l'application. Voici les types d'accouplements couramment utilisés :

- **Accouplement rigide :**

C'est le type d'accouplement le plus simple, dans lequel l'arbre de la pompe et l'arbre du moteur sont directement alignés et reliés par un accouplement solide. Cela permet un transfert de puissance direct sans aucune flexibilité ou décalage.

- **Accouplement élastique :**

Ce type d'accouplement utilise des éléments élastiques, tels que des accouplements à griffes, à disques ou à soufflet, pour compenser les désalignements entre l'arbre de la pompe et l'arbre du moteur. Ces accouplements élastiques peuvent absorber les vibrations, les chocs et les désalignements mineurs, offrant une protection contre les charges excessives et prolongeant la durée de vie des composants.

- **Accouplement à engrenages :**

Les accouplements à engrenages utilisent des pignons ou des engrenages pour transmettre la puissance entre l'arbre de la pompe et l'arbre du moteur. Ils offrent une connexion robuste et précise, idéale pour les applications nécessitant un alignement précis et une transmission de couple élevée.

- **Accouplement à courroie :**

Dans les systèmes où une certaine flexibilité est nécessaire pour compenser les désalignements, les accouplements à courroie, tels que les accouplements à courroie

trapézoïdale ou à courroie crantée, sont utilisés. Ils utilisent une courroie pour transmettre la puissance entre la poulie de la pompe et la poulie du moteur, permettant une certaine tolérance aux désalignements et aux vibrations.[6]

I. 7 Caractéristique des pompes

- **La cylindrée**

La cylindrée d'une pompe est une mesure du volume de fluide aspiré et expulsé lors d'un mouvement complet. En d'autres termes, c'est la quantité de liquide qu'une pompe peut transférer à chaque cycle ou tour complet, en fonction du type de pompe. Pour les pompes rotatives, la cylindrée est généralement exprimée en centimètres cubes par tour (cm^3/tour) ou en mètres cubes par radian (m^3/rad).

- **Le débit**

Le débit, dans le contexte des pompes, est la quantité de fluide qui est transférée à travers la pompe en une unité de temps. Il est généralement mesuré en unités telles que les litres par seconde (L/s) ou les mètres cubes par heure (m^3/h). Le débit dépend en grande partie de la taille de la pompe, ou plus précisément, de sa cylindrée. Plus la cylindrée est grande, plus la pompe peut transférer de fluide en une unité de temps, ce qui se traduit par un débit plus élevé.

- **La différence de pression**

Elle caractérise la capacité de la pompe à augmenter la pression du fluide qui la traverse. La différence de pression est faible pour une pompe centrifuge, elle peut être importante pour une pompe volumétrique.

- **Le rendement volumétrique**

C'est le rapport entre le débit théorique (calculé avec la cylindrée) et le débit effectivement obtenu. Le rendement volumétrique est toujours inférieur à 1 en raison des fuites.

- **Le rendement mécanique**

C'est le rapport entre le couple (ou la force) théoriquement nécessaire pour produire la différence de pression et le couple effectivement nécessaire.[5]

- **La hauteur manométrique**

Pour transporter un liquide d'un endroit à un autre, la pompe doit fournir une certaine pression appelée hauteur manométrique totale, cela dépend des conditions d'aspiration et de refoulement.

La hauteur manométrique d'une pompe sert à exprimer la hauteur à laquelle une pompe peut refouler un liquide. La hauteur manométrique se mesure en mètres (m) et ne dépend pas de la densité du liquide. La formule suivante montre la relation entre la pression (p) et la hauteur manométrique (H) :

$$H = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad (\text{I. 1})$$

H : La hauteur manométrique (m).

ΔP : La différence de pression (Pa ou Bar).

ρ : Masse volumique (densité) (kg/m³).

g : Vitesse de pesanteur ou gravité (m/s²).

- **N.P.S.H (Net Positive Suction Head) ou hauteur de charge nette absolue**

Une pompe possède une capacité maximum d'aspiration qui est la valeur du vide qu'elle peut produire. Cette caractéristique varie suivant le type et la conception technique de la pompe. [5]

Il est important de noter que les caractéristiques spécifiques d'une pompe hydraulique peuvent varier en fonction du fabricant et du modèle. Le choix de la pompe doit être basé sur les besoins de l'application particulière, en tenant compte de ces caractéristiques pour assurer un fonctionnement efficace et fiable du système hydraulique.

I. 8 Les différents types de pompes

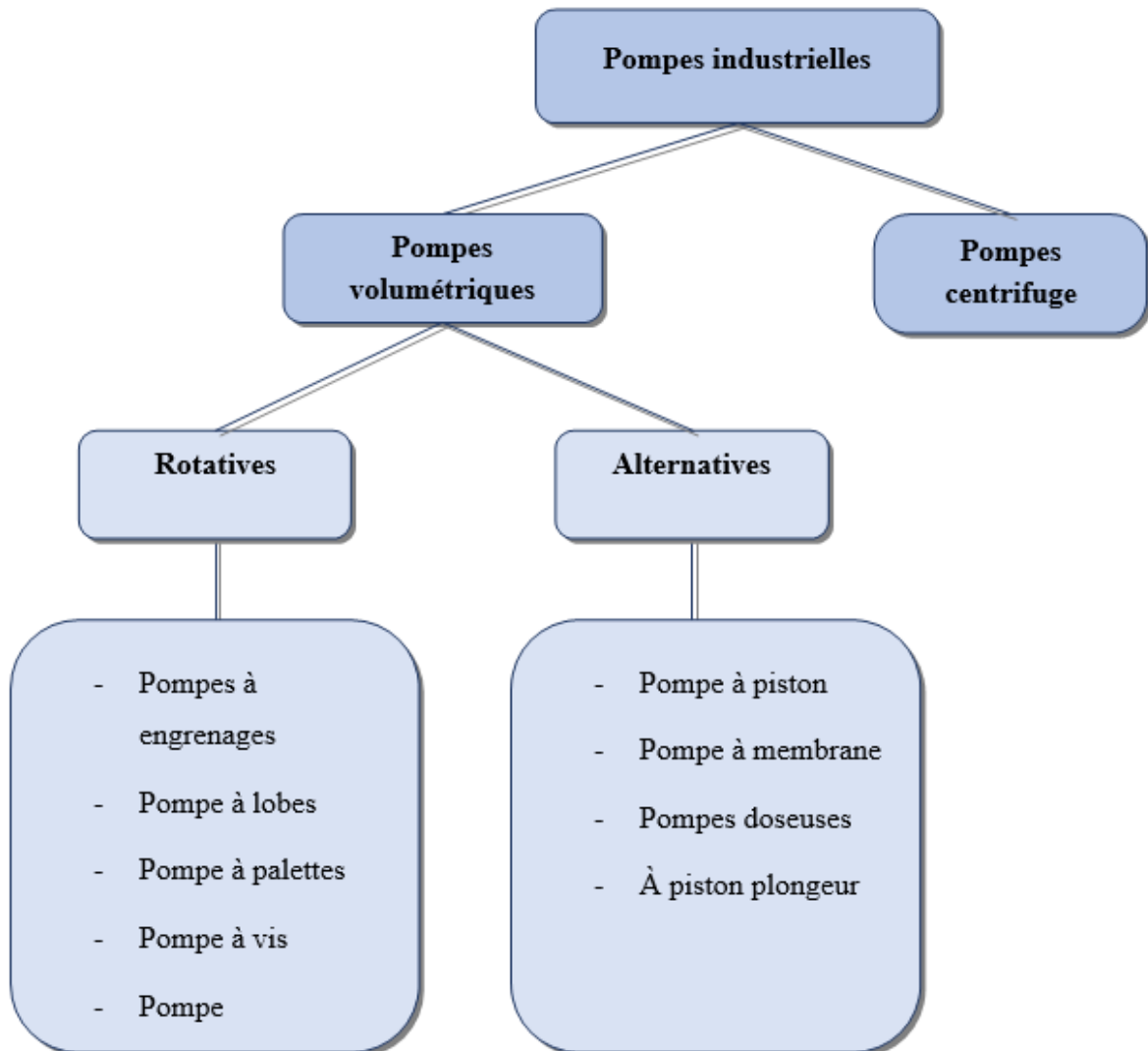


Figure I-3: Les différents types de pompes.

Les pompes transportant des liquides se divisent en deux catégories principales :

- **Les pompes volumétriques :**

L'écoulement du liquide résulte de la variation d'une capacité occupée par le liquide.

- **Les pompes centrifuges :**

Le mouvement du liquide résulte de l'accroissement d'énergie qui lui est communiqué par la force centrifuge.

L'utilisation d'un type de pompes ou d'un autre dépend des conditions d'écoulement du fluide. De manière générale, si on veut augmenter la pression d'un fluide on utilisera plutôt les pompes volumétriques, tandis que si on veut augmenter le débit on utilisera plutôt les pompes centrifuges. [5]

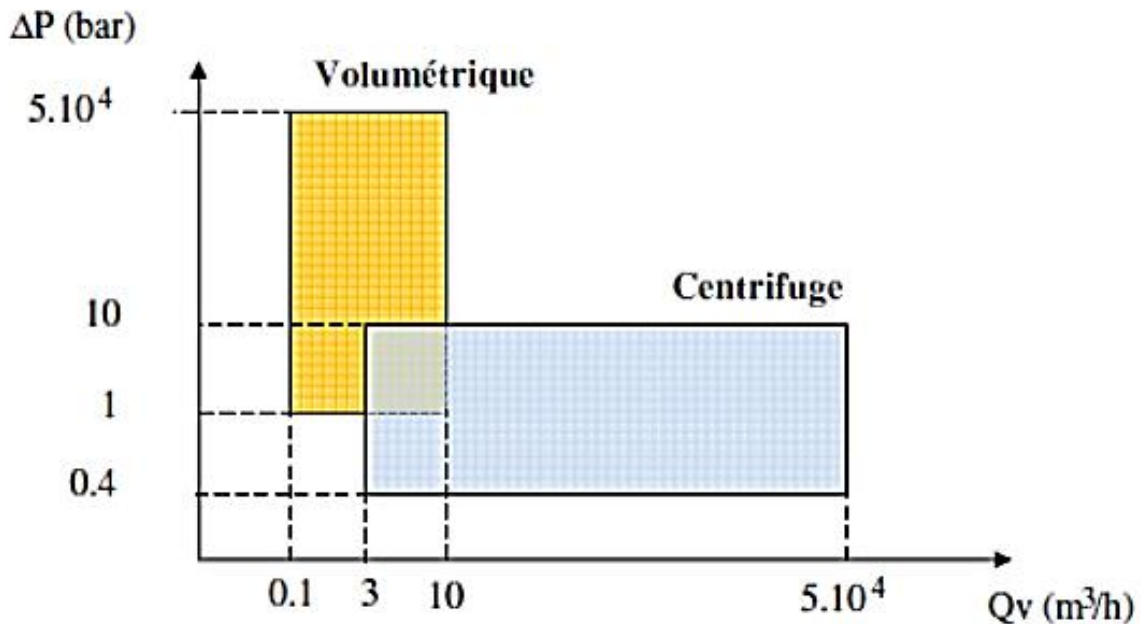


Figure I-4 : Domaine d'utilisation des deux grandes catégories de pompes. [07]

I. 8. 1 Les pompes volumétriques

Les pompes volumétriques utilisent les variations de vitesse du fluide pompé combinées avec l'effet de la force centrifuge pour obtenir un accroissement de la pression.

Le transfert est effectué linéairement dans les pompes volumétriques alternatives et en rotation dans les pompes volumétriques rotatives.

Les caractéristiques sont les suivantes :

- Couple d'entraînement faible au démarrage, bon rendement.
- Adaptées aux débits moyens et élevés pour des hauteurs limitées.[5]

I. 8. 1. 1 Principe de fonctionnement :

Une pompe volumétrique se compose d'un corps de pompe parfaitement clos à l'intérieur duquel se déplace un élément mobile rigoureusement ajusté.

Leur fonctionnement repose sur le principe suivant :

- Exécution d'un mouvement cyclique.
- Pendant un cycle, un volume déterminé de liquide pénètre dans un compartiment avant d'être refoulé à la fin.

Ce mouvement permet le déplacement du liquide entre l'orifice d'aspiration et l'orifice de refoulement.

On distingue deux grands types de pompes volumétriques :

- Les pompes rotatives.
- Les pompes alternatives. [5]

I. 8. 1. 2 Les pompes volumétriques rotatives

Ces pompes sont constituées par une pièce mobile animée d'un mouvement de rotation autour d'un axe, qui tourne dans le corps de pompe et crée le mouvement du liquide pompé par déplacement d'un volume depuis l'aspiration jusqu'au refoulement. [5]

Il existe plusieurs types de pompes volumétriques rotatives. Voici quelques-uns des types courants de pompes volumétriques rotatives :

- Pompes à engrenage
- Pompes à palettes
- Pompes péristaltiques
- Pompes à lobes
- Pompes à vis

a) Pompes à engrenages

Il existe deux sortes de pompes à engrenages :

- **Pompe à engrenage externe**

Les pompes à engrenages externes sont les plus simples et les plus courantes des pompes à engrenages rotatifs. Elles comportent généralement deux engrenages sur des arbres séparés, dont l'un est relié à un moteur. Le désengrenage des engrenages crée un vide à l'entrée de la pompe. Lorsque les engrenages tournent, le fluide est emprisonné entre les dents des engrenages et la paroi de la cavité du carter. Il est ensuite tourné vers la sortie et évacué. Le

fluide ne peut pas refluer vers l'entrée à cause de l'engrènement des engrenages et doit donc être évacué par la sortie. Le fluide pompé lubrifie l'engrenage et les paliers lisses associés.[08]

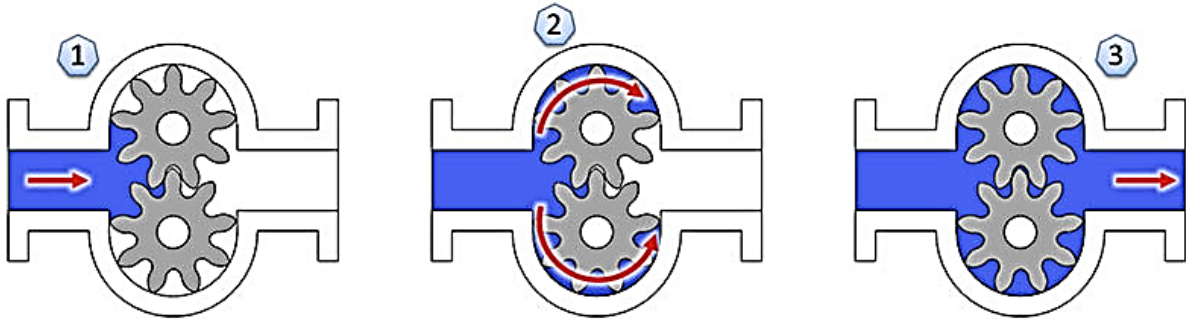


Figure I-5 : Cycle de la pompe à engrenages externes. [08]

- **Pompe à engrenages internes**

Les pompes à engrenages internes utilisent des engrenages de différentes tailles avec un nombre de dents différent, dont l'un a des dents internes. Les engrenages sont excentrés par rapport au corps de la pompe, ce qui permet d'ouvrir un espace dans l'engrènement des engrenages lorsqu'ils tournent. Les volumes sont séparés par un élément en forme de croissant qui fait office de joint d'étanchéité. Après avoir franchi le croissant, l'engrenage commence à se fermer, évacuant le volume vers la sortie. Les exigences de puissance plus élevées, la complexité accrue du croissant et la fabrication plus difficile des engrenages font des pompes à engrenages internes une classe quelque peu spécialisée.[08]

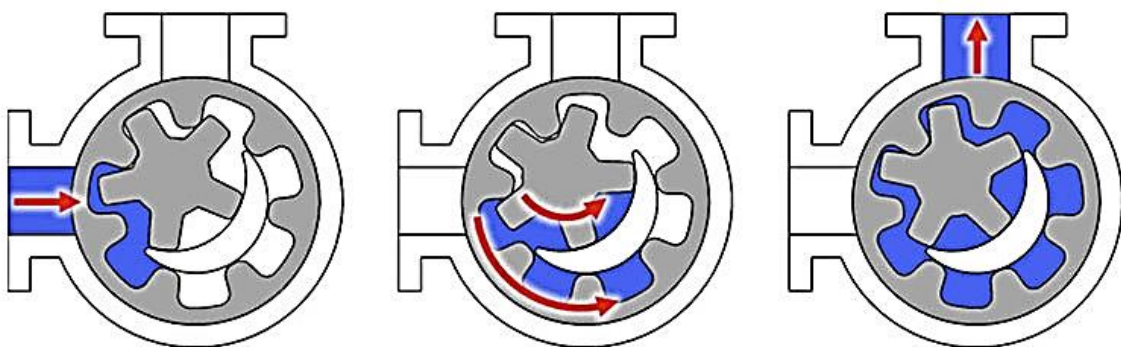


Figure I-6 : Pompe à engrenages internes.[08]

b) Pompe à lobes

Une pompe à lobes est similaire à une pompe à engrenages externes, mais elle comporte des éléments en forme de lobes au lieu d'engrenages. Les éléments en forme de lobes sont chacun entraînés par un moteur avec des engrenages temporisés. Cela élimine le contact entre les deux lobes, ce qui réduit l'usure et minimise le cisaillement du fluide. Les pompes à lobes sont capables de traiter des solides plus gros que les autres pompes volumétriques grâce au petit nombre de dents.[08]

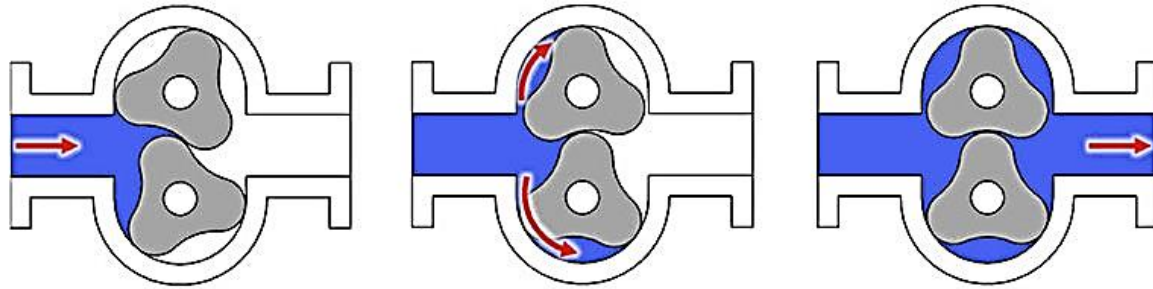


Figure I-7 : Diagramme de la pompe à lobes. [08]

c) Pompe à palettes

Les pompes à palettes n'ont qu'un seul élément rotatif qui est excentré par rapport à la cavité de la pompe. L'élément rotatif contient plusieurs palettes qui peuvent glisser ou se déformer pour s'adapter au profil de la paroi de la cavité. Les palettes forment un joint coulissant étanche contre la paroi de la cavité, emprisonnant le volume de fluide à l'entrée et le refoulant à la sortie. Les pompes à palettes sont très insensibles aux variations de pression car les palettes sont en contact avec la paroi de la cavité. Cependant, le glissement entre les palettes et la paroi crée des problèmes de puissance, de bruit et de durée de vie.[08]

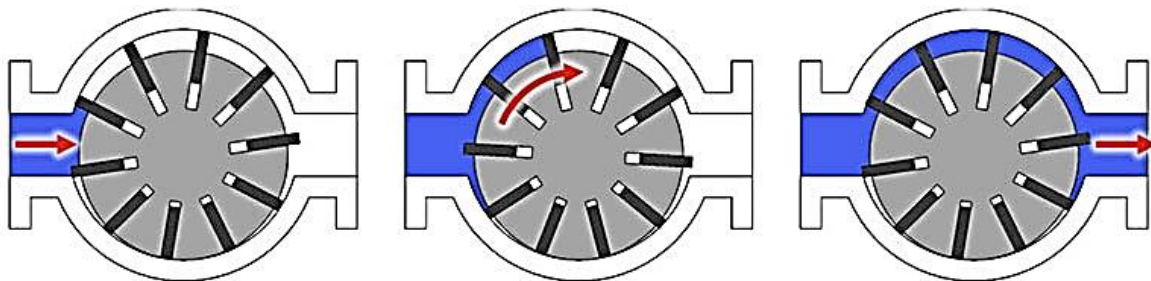


Figure I-8:Diagramme de la pompe à palettes. [08]

d) Pompe à vis

À vis droites

Le fluide emprisonné entre les pas des vis se déplace de façon continue avec la rotation des vis de l'entrée jusqu'au refoulement de la pompe dans les cavités formées entre les vis.

Ce type de pompe nécessite un couple de fonctionnement élevé mais véhicule des fluides visqueux et des fluides chargés.

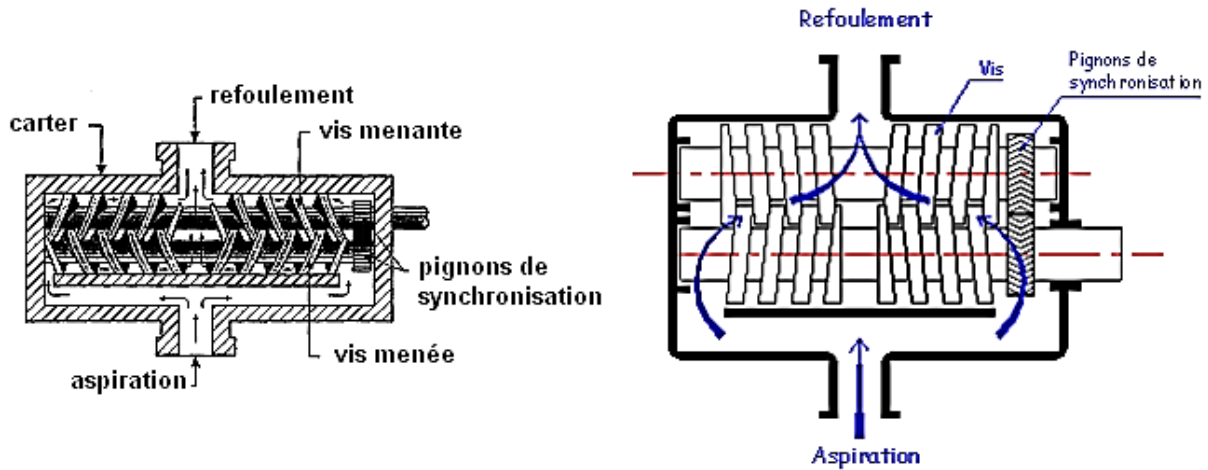


Figure I-9:Éclaté de pompes à vis. [5]

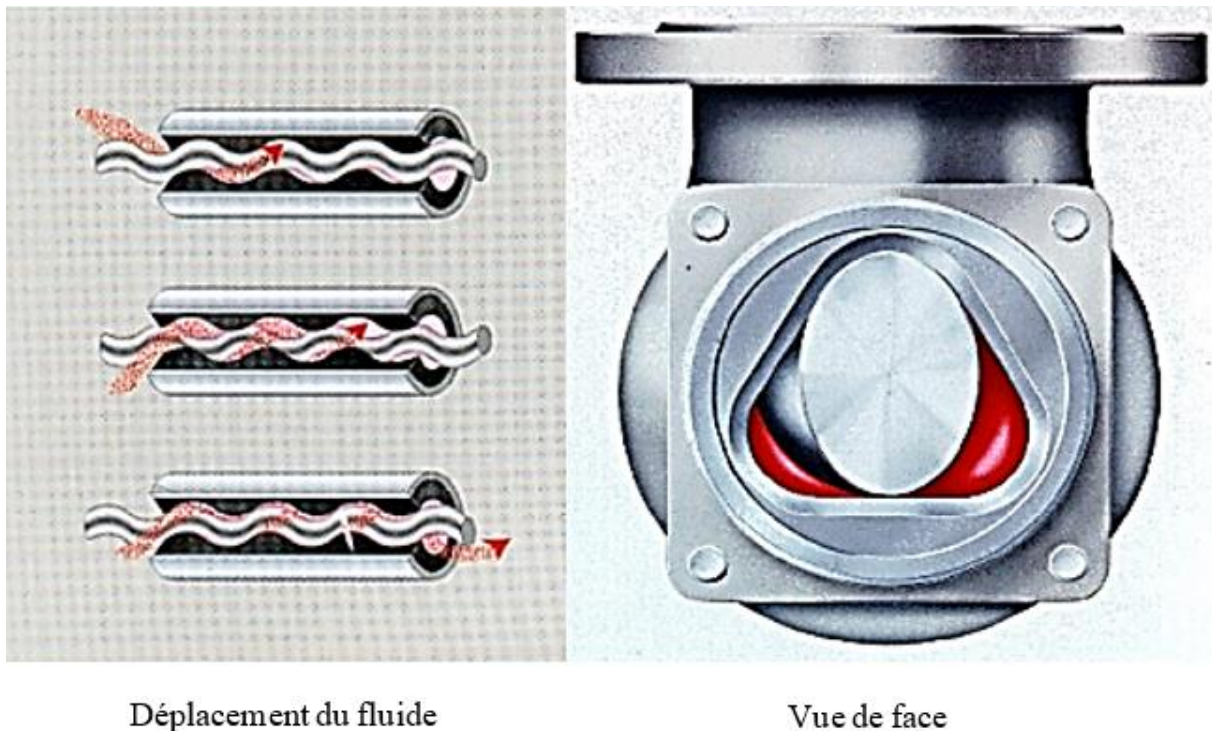
À vis excentrées (Type Moineau)

La pompe est composée :

- D'une vis interne à pas simple
- D'un stator à pas double

Lorsque le rotor tourne à l'intérieur du stator, les alvéoles progressent le long de l'axe de la pompe en décrivant une spirale sans changer de forme ni de volume transférant ainsi le produit depuis l'entrée d'aspiration jusqu'à la sortie de refoulement.

Ce type de pompe est idéal pour le pompage de produit visqueux, abrasif ou fragile. [5]

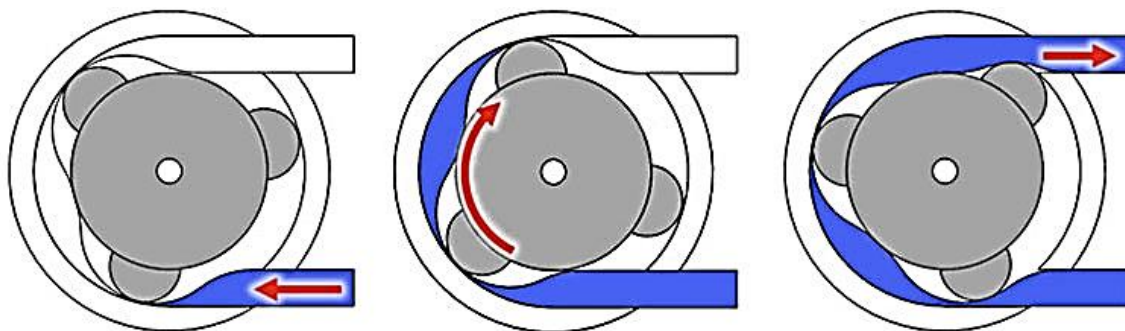


Déplacement du fluide

Vue de face

Figure I-10 : Pompe à vis excentrées (Type Moineau). [5]**e) Pompe péristaltique**

Parfois appelées pompes à rouleaux, les pompes péristaltiques déplacent le fluide en utilisant des rouleaux pour piéger le liquide dans un tube flexible et le faire passer de l'entrée à la sortie. Cette conception a pour conséquence que le fluide n'entre en contact qu'avec l'intérieur du tube. Cette caractéristique, associée à un tube facile à remplacer, fait des pompes péristaltiques des instruments idéaux pour les applications à usage unique, comme le contact avec le sang dans une machine de dialyse. Cependant, la compression fréquente du tube nécessite également son remplacement fréquent, ce qui les rend problématiques pour de nombreuses applications. Les pompes péristaltiques ont un débit pulsé, un peu comme une pompe alternative. [08]

**Figure I-11:**Diagramme de la pompe péristaltique. [08]

I. 8. 1. 3 Les pompes volumétriques alternatives

La pompe alternative est composée d'un piston se déplaçant dans un cylindre et de clapets permettant l'entrée et la sortie du fluide dans la pompe. Le mouvement alternatif du piston est obtenu par un système de came (excentrique) ou un système bielle-manivelle, permettant de transformer un mouvement de rotation (moteur d'entraînement) en un mouvement de translation du piston. [5]

Il existe plusieurs types de pompe volumétrique alternative, voici les principaux types des pompes alternatives :

- Pompe à piston
- Pompe à membrane
- Pompes doseuses
- Pompe à piston plongeur

a) Pompe à piston

Ces machines ont un fonctionnement alternatif et nécessitent un jeu de soupapes ou de clapets pour obtenir tantôt l'aspiration du fluide, tantôt le refoulement.

Son principe est d'utiliser les variations de volumes occasionnés par le déplacement d'un piston dans un cylindre. Ces déplacements alternativement dans un sens ou dans l'autre produisent des phases d'aspiration et de refoulement. Quand le piston se déplace dans un sens le liquide est comprimé : il y a fermeture du clapet d'admission et ouverture du clapet de refoulement. Le fonctionnement est inverse lors de l'aspiration du liquide dans la pompe.

Le principal défaut de cette pompe est de donner un débit pulsé et par suite des à-coups de pression (qui peut facilement être atténué grâce à un pot anti-bélier sur la conduite de refoulement). Pour obtenir une fluidité dans le refoulement, une pompe double effet sera nécessaire. Les pompes à piston sont robustes et ont de bons rendements au-dessus d'une certaine taille. Elles peuvent être utilisées comme pompes doseuses, on les trouve d'ailleurs assez souvent avec des pistons à course réglables. L'étanchéité de ce type de pompes ne leur permet pas de travailler avec des fluides possédant des particules solides. [5]

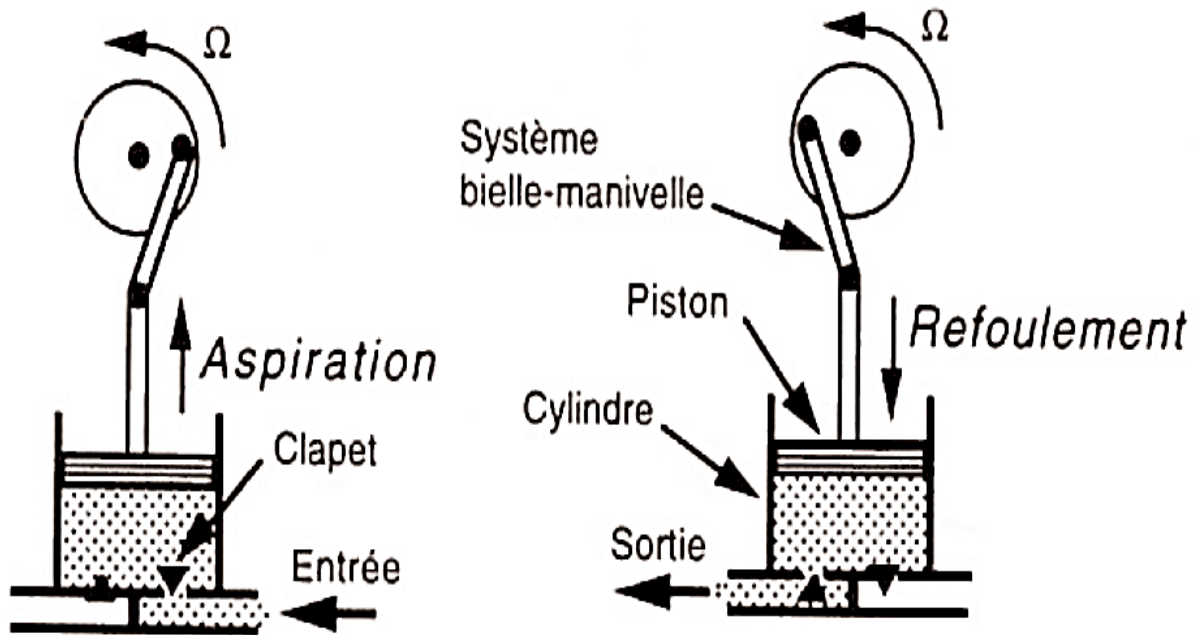


Figure I-12: Détail pompe à piston. [5]

b) Pompe à membrane

Une pompe à membrane utilise une membrane flexible (souvent appelée diaphragme) qui fléchit vers l'intérieur et vers l'extérieur. Le mouvement de la membrane modifie le volume interne de la pompe et, lorsqu'elle est couplée à des valves, permet au fluide de s'écouler dans la pompe et de la quitter. Les pompes à membrane sont idéales pour le vide, l'air et les fluides corrosifs à basse pression.[08]

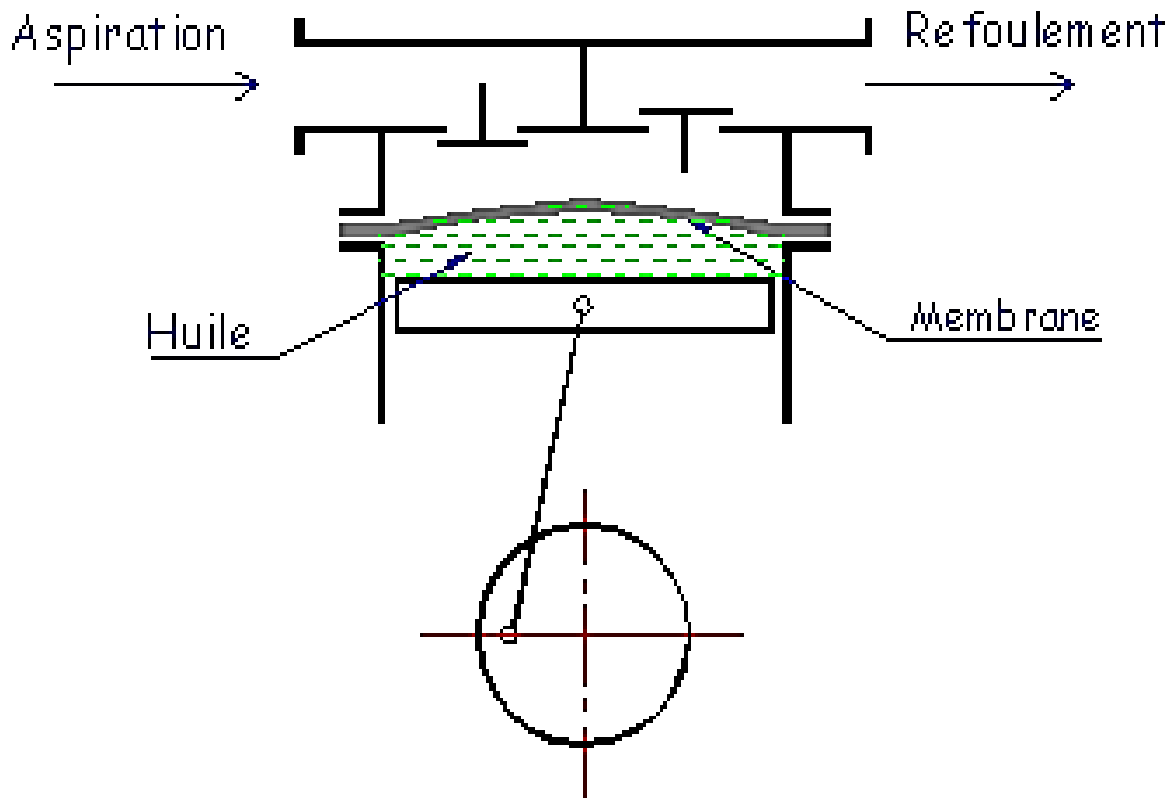


Figure I-13: Principe pompe à membrane.[5]

c) Pompes doseuses

Elles sont essentiellement à piston et (ou) à membrane. L'introduction d'un débit bien déterminé de liquides est rendue possible grâce à un dispositif précis de réglage de la course du piston et de sa fréquence.

Le piston n'est plus en contact avec le liquide pompé, mais avec un liquide tampon comprimé et décomprimé, faisant osciller une membrane en contact avec le liquide pompé. À chaque compression du liquide tampon, la membrane est repoussée, refoulant ainsi le liquide présent dans la pompe. À chaque décompression du liquide tampon, la membrane est attirée, aspirant ainsi le liquide à pomper. La membrane est en caoutchouc, en PTFE ou en acier inoxydable ce qui permet de véhiculer des produits corrosifs.

Elles ont des débits relativement faibles (de quelques L.h-1 à quelques m³.h-1) et peuvent mettre en œuvre des pressions au refoulement allant jusqu'à 300 bars. Elles sont autoamorçantes mais n'acceptent que des viscosités faibles.

Les principales applications sont :

- Le dosage fin de produits chimiques
- L'injection de carburant pour les véhicules automobiles.

Le piston n'est plus en contact avec le liquide pompé, mais avec un liquide tampon comprimé et décomprimé, faisant osciller une membrane en contact avec le liquide pompé.

À chaque compression du liquide tampon, la membrane est repoussée, refoulant ainsi le liquide présent dans la pompe.

À chaque décompression du liquide tampon, la membrane est attirée, aspirant ainsi le liquide à pomper.

La membrane est en caoutchouc, en PTFE ou en acier inoxydable ce qui permet de véhiculer des produits corrosifs. [4]

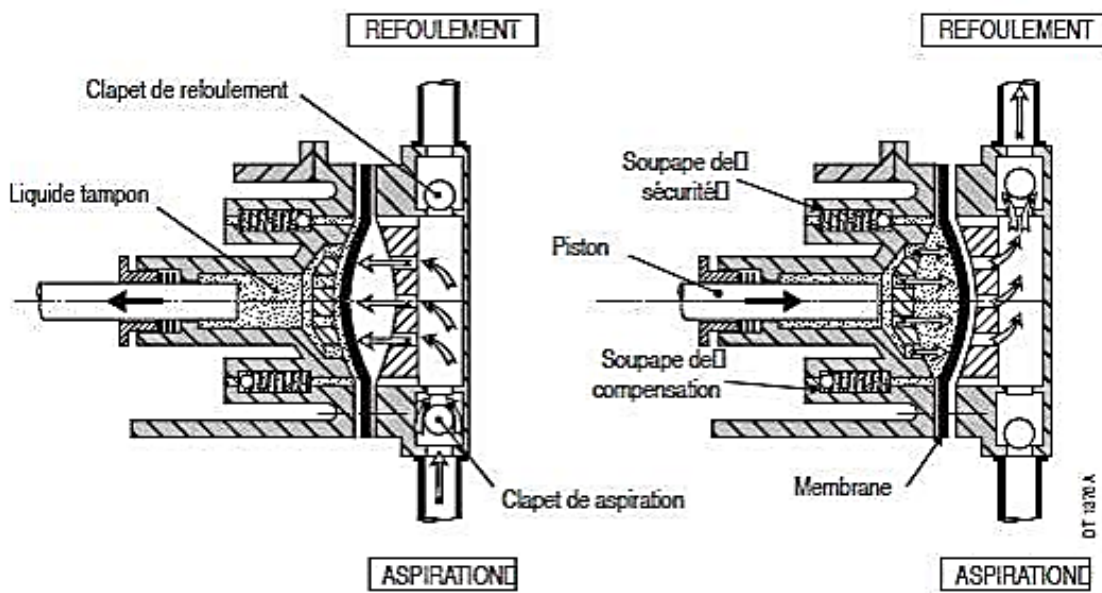


Figure I-14: éclaté de pompe doseuse. [4]

d) Pompes à piston plongeur

Cette machine est un compromis entre la pompe à piston et la pompe à membrane. Le fluide n'est pas isolé du piston, mais les frottements de celui-ci sont faibles car limités au niveau du presse-étoupe qui assure l'étanchéité. Ces pompes sont adaptées à la production de hautes pressions. [07]

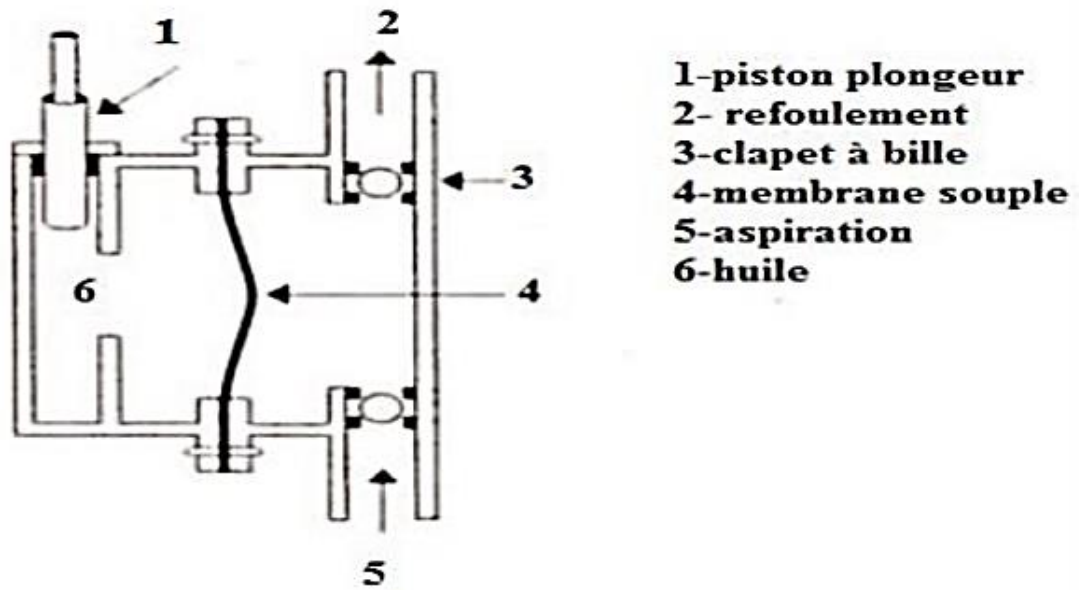


Figure I-15: Pompes à piston plongeur. [07]

I. 8. 2 Les avantages et les inconvénients des pompes volumétriques

I. 8. 2. 1 Les avantages et les inconvénients des pompes volumétriques rotatives

Types des pompes	Les avantages	Les inconvénients
A engrenages A vis A lobes	<ul style="list-style-type: none"> - Débit régulier. - Débit réglable. - Précision du débit. - Rendement élevé. - Encombrement réduit. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensible aux particules. - Sensible aux liquides corrosifs. - Mécanique compliquée.
A palette	<ul style="list-style-type: none"> - Il n'y a ni brassage, ni laminage, ni émulsion du liquide pompé. - Le débit est régulier. - La pompe est réversible. 	<ul style="list-style-type: none"> - Les palettes usent le corps par frottements. - Le pompage des fluides visqueux est difficile.
	<ul style="list-style-type: none"> - Non contaminantes. - Maintenance réduite. 	<ul style="list-style-type: none"> - Débit limité - Sensibilité à la pression.

Péristaltiques	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptées aux applications nécessitant une précision élevée. - Auto-amorçage. 	<ul style="list-style-type: none"> - Usure des tubes.
----------------	---	--

Tableau I-1 : Les avantages et les inconvénients des pompes volumétriques rotatives.

I. 8. 2. 2 Les avantages et les inconvénients des pompes volumétriques alternatives

Types des pompes	Les avantages	Les inconvénients
A piston	<ul style="list-style-type: none"> - Débit précis. - Débit réglable. - Rendement élevé. 	<ul style="list-style-type: none"> - Débit par à-coups. - Prix élevé. - Sensible aux particules. - Résistance chimique limitée.
A membrane	<ul style="list-style-type: none"> - Débit précis. - Débit réglable. - Rendement élevé. - Moins sensible aux particules. - Très bonne résistance chimique. 	<ul style="list-style-type: none"> - Débit par à-coups. - Prix élevé. - Température de service limitée.
Doseuse	<ul style="list-style-type: none"> - Débits précis et constants. - Contrôle du débit. - Polyvalence. - Fiabilité. - Automatisation. 	<ul style="list-style-type: none"> - Plage de débit limitée. - Sensibilité aux particules. - Prix élevé.

A piston plongeur	<ul style="list-style-type: none"> - Contrôle du débit. - Haute pression. - Fiabilité. - Utilisées avec une variété de fluides. 	<ul style="list-style-type: none"> - Bruyantes. - Nécessitent une maintenance régulière pour garantir leur bon fonctionnement. - Prix élevé.
-------------------	---	---

Tableau I-2 : Les avantages et les inconvénients des pompes volumétriques alternatives.[9]

I. 9 Conclusion

Les pompes jouent un rôle essentiel dans un large éventail d'applications industrielles. Elles sont des dispositifs mécaniques conçus pour déplacer les fluides d'un endroit à un autre, ce qui les rend indispensables pour le transport de liquides et de gaz dans divers processus et systèmes.

Dans ce chapitre, nous avons exploré les concepts fondamentaux des pompes, y compris leurs principaux types, leur fonctionnement de base et leurs caractéristiques essentielles.

Nous avons découvert que les pompes centrifuges et les pompes volumétriques sont les deux catégories principales de pompes, chacune ayant ses propres avantages et inconvénients. Les pompes centrifuges, basées sur le principe de la force centrifuge, sont idéales pour augmenter le débit, tandis que les pompes volumétriques, qui déplacent un volume fixe de fluide à chaque cycle, sont idéales pour augmenter la pression d'un fluide.

Enfin, il est important de noter que le choix de la pompe appropriée dépendra toujours des besoins spécifiques de chaque application, y compris les types de fluides, les débits, les pressions et d'autres facteurs. Dans le chapitre suivant, nous explorerons en détail le principe de fonctionnement des pompes centrifuges, leurs caractéristiques spécifiques et leurs constitutions en détail.

Chapitre II Les pompes centrifuges

II. 1 Introduction

Les pompes centrifuges, sont l'une des inventions les plus fondamentales et essentielles de l'ingénierie des fluides. Elles sont couramment utilisées pour transporter des liquides d'un point à un autre en utilisant la force centrifuge générée par la rotation d'une roue ou d'un rotor.

Ces pompes fonctionnent sur le principe de la force centrifuge, qui pousse le liquide vers l'extérieur à partir du centre de rotation, créant ainsi une augmentation de la pression et un débit de fluide. Les pompes centrifuges sont largement utilisées dans une variété d'applications, notamment le pompage d'eau, le traitement des eaux usées, l'approvisionnement en eau potable, l'industrie chimique, pétrolière et gazière, et bien d'autres.

Dans ce chapitre on vous présentera la pompe centrifuge, son principe de fonctionnement, ses éléments principaux, la classification de ces pompes ainsi que ses avantages et ses inconvénients.

II. 2 Présentation

Une pompe centrifuge est un équipement rotatif qui transfère un liquide en le guidant à travers une roue à aubes, également appelée impulseur (à noter que le terme "turbine" est souvent utilisé à tort pour désigner l'impulseur). Il s'agit du type de pompe industriel le plus couramment utilisé. Lorsque l'impulseur tourne, il aspire le fluide pompé axialement dans la pompe, l'accélère radialement, puis le refoule tangentiellement. Ce processus permet d'augmenter la pression du fluide, le propulsant ainsi vers la sortie de la pompe.

En 1689, le physicien Denis Papin a inventé la pompe centrifuge. Aujourd'hui, les pompes centrifuges sont les pompes les plus utilisées dans le monde.

La pompe centrifuge est conçue selon un principe simple : le liquide passe par l'œil de la roue et est poussé vers l'extérieur par une force centrifuge vers la périphérie de la roue. La construction est assez peu coûteuse, robuste et simple, et sa vitesse élevée permet de raccorder la pompe directement à un moteur asynchrone.

La pompe centrifuge fournit un débit régulier de liquide et peut facilement être étranglée sans que la pompe ne soit endommagée.[10]



Figure II-1:Exemple de pompe centrifuge. [11]

II. 3 Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge :

Les pompes centrifuges sont de constitution très simple. En version de base, elles sont essentiellement constituées d'une pièce en rotation, le rotor appelé aussi roue qui tourne dans un carter appelé corps de pompe

Une certaine vitesse est ainsi communiquée au fluide. Le liquide arrive dans l'axe de l'appareil par le distributeur et la force centrifuge le projette vers l'extérieur de la turbine. Il acquiert une grande énergie cinétique qui se transforme en énergie de pression dans le collecteur où la section est croissante.

Une pompe centrifuge est constituée de :

- Une roue à aubes tournant autour de son axe. (Impulseur).
- Un distributeur dans l'axe de la roue.
- Un collecteur de section croissante, en forme de spirale appelée volute.

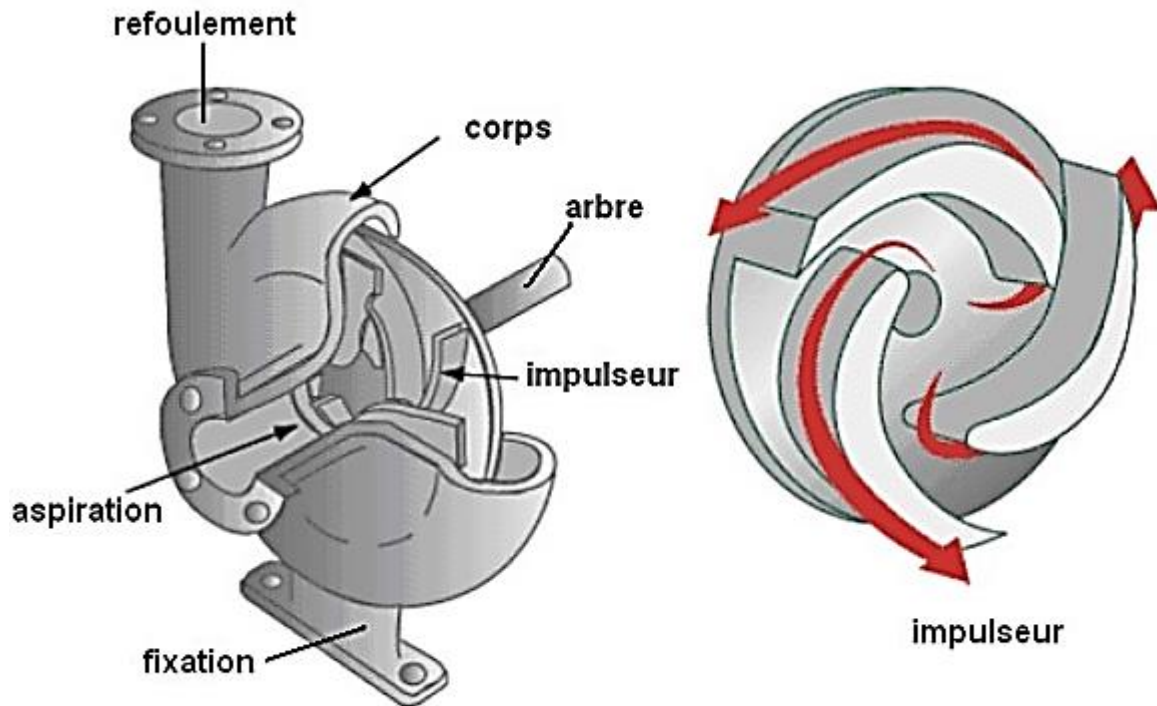


Figure II-2 : Principe de fonctionnement pompe centrifuge [5]

Les pompes centrifuges sont équipées d'impulseurs de différents modèles. On distingue 3 sortes de roue à aubes (Nous nous concentrerons donc sur ces types de roue dans les pages suivantes).

Le rôle de l'Impulseur est de donner au fluide un maximum de vitesse. Celle-ci est graduellement transformée dans la volute du corps de pompe en pression.

Le principe de fonctionnement de la pompe centrifuge est basé sur les étapes suivantes :

- **Aspiration :**

La pompe étant amorcée, c'est-à-dire pleine de liquide, la vitesse du fluide qui entre dans la roue augmente, et par conséquent la pression dans l'œil diminue, engendrant ainsi une aspiration et le maintien de l'amorçage.

- **Accélération :**

La rotation augmente la vitesse du fluide tandis que la force centrifuge qui le comprime sur la périphérie augmente sa pression. Les aubes sont le plus souvent incurvées vers l'arrière par rapport au sens de rotation. Dans un même corps de pompe, des roues différentes peuvent être montées en fonction des caractéristiques du fluide.

- **Refolement :**

Dans l'élargissement en sortie, qui se comporte comme un divergent, le liquide perd de la vitesse au profit de l'accroissement de pression. L'énergie cinétique est convertie en énergie de pression.[5]

II. 4 Constitution d'une pompe centrifuge

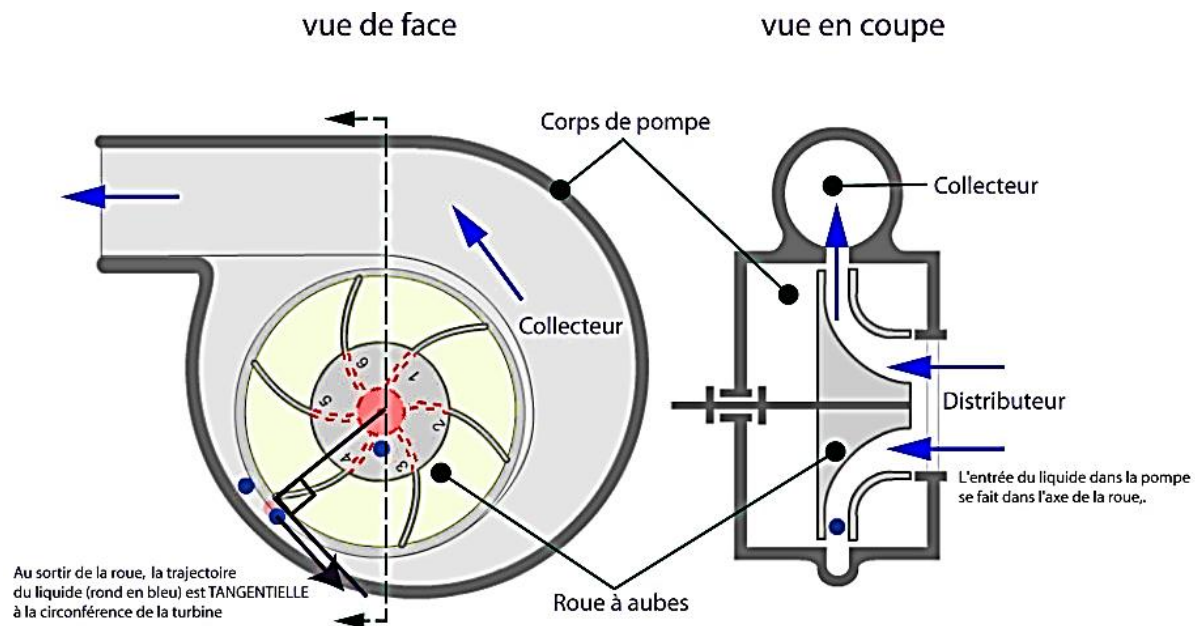


Figure II-3 : constitution d'une pompe centrifuge.

II. 4. 1 Distributeur

C'est un organe fixe ayant pour rôle la conduite du liquide depuis la section d'entrée de la pompe jusqu'à l'entrée de l'impulser, il se réduit à une simple tuyauterie pour les pompes monocellulaire.

II. 4. 2 L'impulser (la roue)

C'est l'âme de la pompe centrifuge, il comporte des aubes ou ailettes, qui grâce à leur interaction avec le liquide véhiculé transforme l'énergie mécanique en énergie de pression dans le récupérateur. L'impulser se compose du moyeu, bagues d'usure, et les flasques.

La conception de la turbine est le facteur le plus important pour déterminer la performance d'une pompe centrifuge. Une roue bien conçue optimise le débit tout en minimisant les turbulences et en maximisant l'efficacité.

La roue d'une pompe centrifuge peut être de trois types de base :

II. 4. 2. 1 Roue fermée

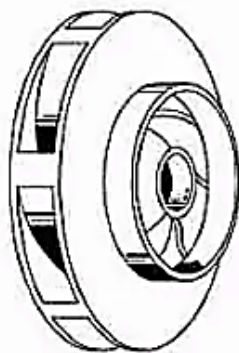
Les aubes sont situées entre les deux disques, le tout en une seule coulée. Ils sont utilisés dans les grandes pompes à haut rendement et nécessitant un minimum de charge nette d'aspiration. Les pompes centrifuges à roue fermée sont les pompes les plus utilisées pour le traitement des liquides clairs. Ils s'appuient sur des bagues d'usure à faible jeu sur la roue et sur le corps de la pompe. La roue fermée est une conception plus compliquée et plus coûteuse, non seulement à cause de la roue mais aussi de bagues d'usure supplémentaires.

II. 4. 2. 2 Roue semi-ouverte :

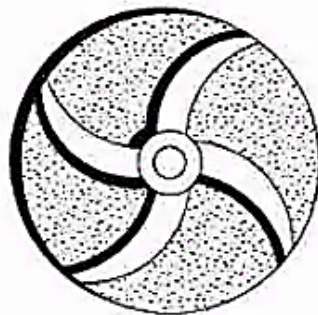
Les ailettes sont libres d'un côté et fermées de l'autre. Le linceul ajoute une résistance mécanique. Ils offrent également des rendements plus élevés que les roues à aubes ouvertes. Ils peuvent être utilisés dans des pompes de diamètre moyen et avec des liquides contenant de petites quantités de solides en suspension. En raison de la minimisation de la recirculation et d'autres pertes, il est très important qu'un faible jeu existe entre les aubes de la roue et le carter.

II. 4. 2. 3 Roue ouverte :

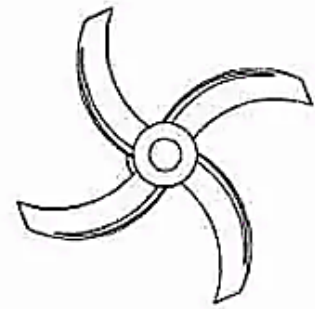
Les roues ouvertes ont les ailettes libres des deux côtés. Les roues ouvertes sont structurellement faibles. Elles sont généralement utilisées dans les pompes peu coûteuses et de petit diamètre et dans les pompes manipulant des solides en suspension.



• Roue fermée



• Roue semi-ouverte



• Roue ouverte

Figure II-4 : Type de roues.[12]

II. 4. 3 Le récupérateur (l'enveloppe)

C'est un organe fixe qui collecte le liquide à la sortie de la roue et la canalisé vers la section de sortie de la pompe avec la vitesse désirée.

Le récupérateur se compose en général de deux parties

II. 4. 3. 1 Le diffuseur :

Le diffuseur a pour rôle de transformer l'énergie cinétique en énergie de pression, et ainsi limiter la vitesse du liquide pour éviter les pertes de charges exagérées.

II. 4. 3. 2 La volute :

La volute c'est le collecteur du liquide venant du diffuseur, elle assure la transformation d'énergie cinétique en pression et canalise le liquide vers la section de sortie de la pompe.[13]

II. 4. 4 Arbre

L'arbre est l'élément qui assure le mouvement de rotation. Il est souvent fait en acier spécial car, il doit résister aux différentes sollicitations exercées par certaines pièces. (Impulseur, paliers, ... etc.).[3]

II. 4. 5 Bague d'étanchéité

Les pompes centrifuges sont fournies avec des bagues d'usure et une garniture mécanique qui aident à empêcher la fuite du liquide pompé.

II. 4. 6 Roulements

Les roulements limitent le mouvement relatif de l'arbre (rotor) et réduisent le frottement entre l'arbre rotatif et le stator.

II. 5 Classification des pompes centrifuges

Les pompes centrifuges sont classées selon différentes façons :

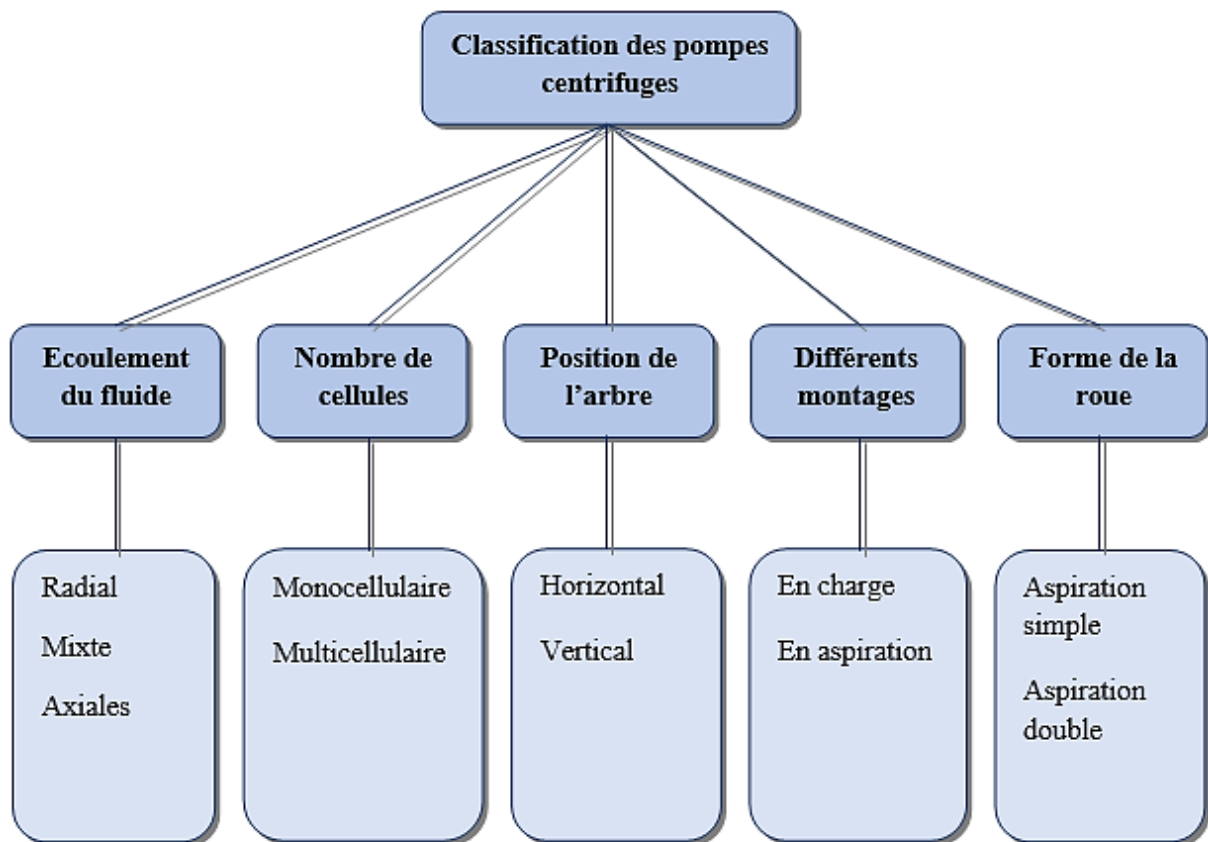


Figure II-5 : Classification de pompe centrifuges.

II. 5. 1 La trajectoire du fluide (trajectoire de l'écoulement)

Les pompes centrifuges peuvent être classées en fonction de la manière dont le fluide s'écoule à travers la pompe. Ce n'est pas une classification basée uniquement sur la roue, mais elle est basée sur la conception du corps de pompe et de la roue. Les trois types de flux à travers une pompe centrifuge sont :

II. 5. 1. 1 À écoulement radial (les pompes centrifuges)

Le liquide s'éloigne de l'axe de la roue à aubes dans un plan perpendiculaire à celui-ci.

II. 5. 1. 2 À écoulement mixte (les pompes hélico-centrifuges)

Le liquide s'éloigne de l'axe de la roue dans un plan parallèle à celui-ci. Cet écoulement est assuré essentiellement par la forme de la roue qui est composée d'une grille tridimensionnelle, dont les arêtes d'entrée et de sortie sont obliques par rapport à l'axe de rotation.

II. 5. 1. 3 À écoulement axiales (les pompes axiales ou à hélices)

Le liquide reste à distance constante de l'axe de la roue à aubes. Cette dernière est constituée d'une grille circulaire tournante, ces pompes sont destinées aux grands débits engendrés en basse pression.[3]

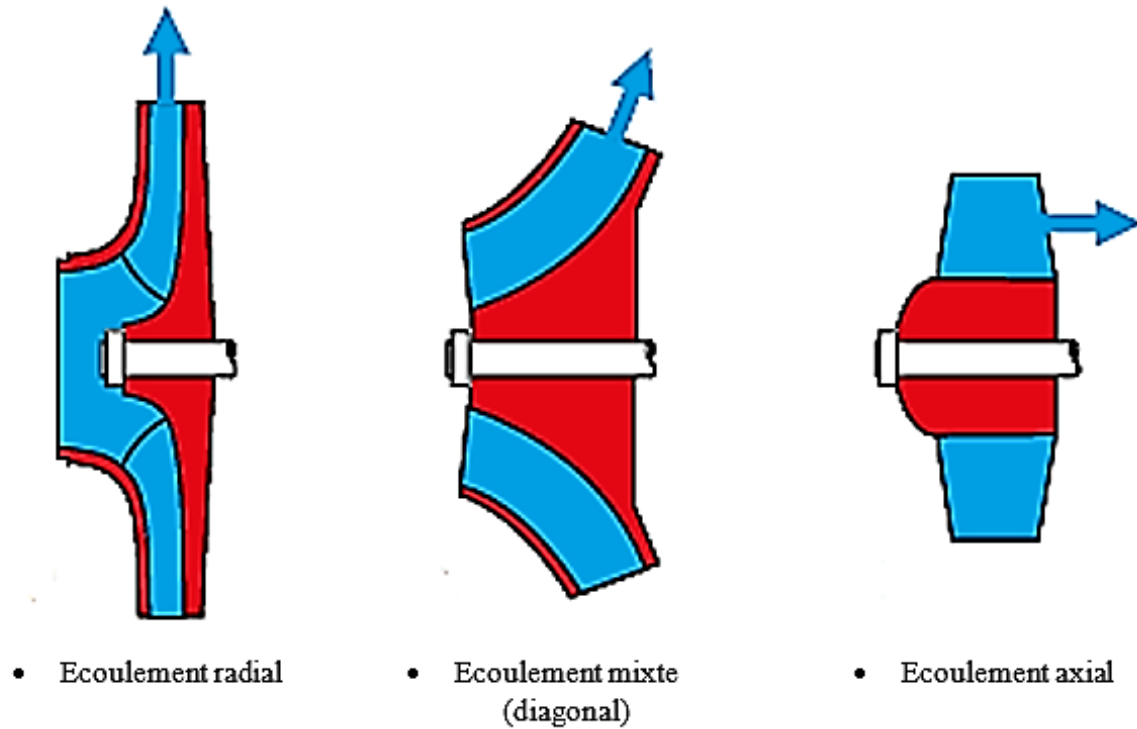


Figure II-6 : l'écoulement de fluide à travers la pompe.[14]

II. 5. 2 Le nombre de cellules

II. 5. 2. 1 Monocellulaire

La pompe mono-cellulaire compte une seule cellule qui permet d'obtenir une moyenne pression (hauteur manométrique).

Cette dernière se compose essentiellement d'une roue d'arbre tournant à l'intérieur d'un corps de pompe, cette roue est clavetée et vissée à un arbre de commande relié lui-même au moteur.

En général, les pompes monocellulaires sont utilisées dans les installations qui ne nécessitent pas une hauteur manométrique totale supérieure à 150 m. Normalement, les pompes monocellulaires fonctionnent dans une plage de 2 à 100 m.

Elles délivrent une faible hauteur manométrique par rapport au débit. La pompe monocellulaire peut être soit verticale, soit horizontale [15].

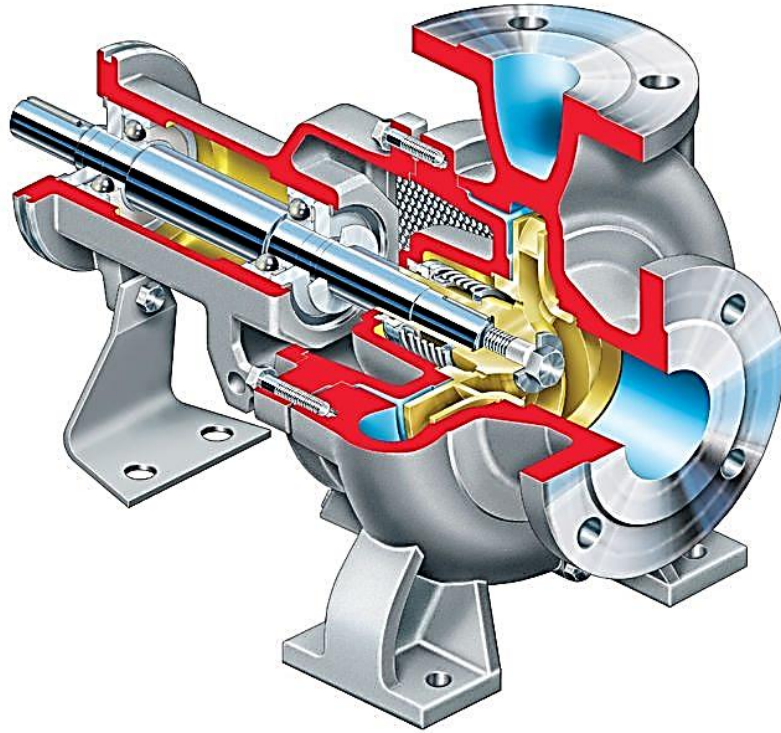


Figure II-7 : Pompe monocellulaire.[16]

II. 5. 2. 2 Multicellulaire

Son utilisation est destinée pour obtenir une forte pression de refoulement ou on peut utiliser une pompe équipée d'une roue de grand diamètre mais il est plus facile est plus rentable d'utiliser une pompe multi-cellulaire, une telle pompe rassemble plusieurs cellules de pompe mono-cellulaire montées en série sur le même arbre de commande.

Les pompes multicellulaires sont utilisées dans les installations nécessitant une hauteur manométrique importante. Plusieurs cellules sont connectées en série et l'écoulement est guidé de la sortie d'une cellule à l'entrée de la suivante. La hauteur manométrique finale qu'une pompe multicellulaire peut fournir est égale à la somme des pressions de chacune des cellules.

L'avantage des pompes multicellulaires est qu'elles délivrent une hauteur manométrique importante par rapport au débit. Tout comme la pompe monocellulaire, la pompe multicellulaire existe en version verticale et en version horizontale.[15]

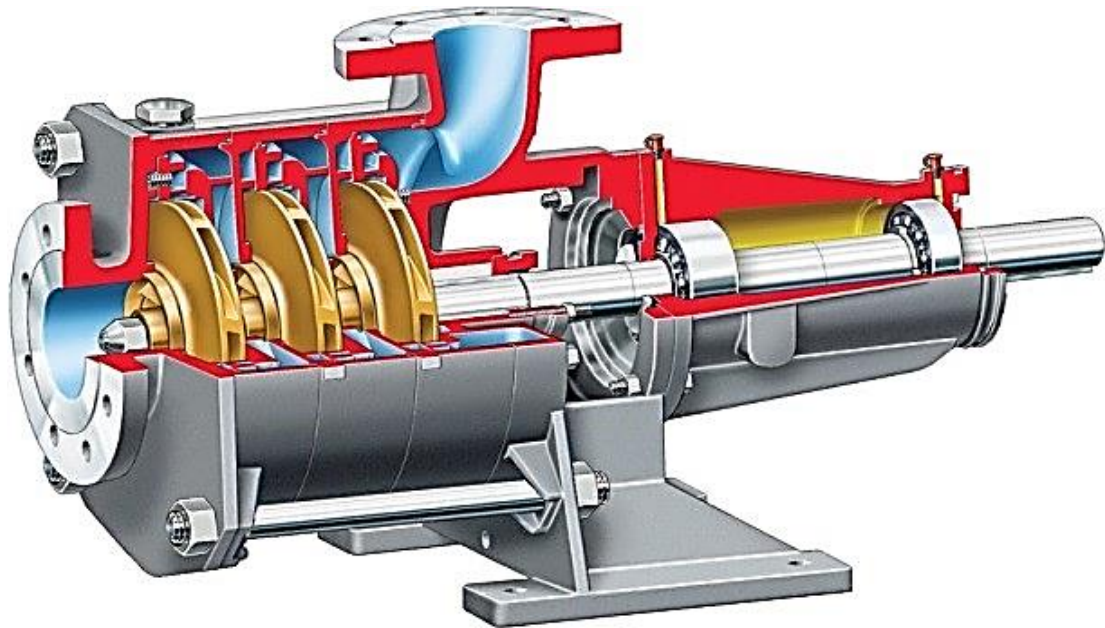


Figure II-8 : Pompe multicellulaire.[17]

II. 5. 3 La position de l'arbre de la pompe

On peut avoir plusieurs dispositions :

II. 5. 3. 1 Pompes à axe horizontal :

Conçues pour être disposées en surface, l'entretien et le démontage de ces pompes sont alors simplifiés.

II. 5. 3. 2 Pompe à axe vertical :

Ce sont des pompes immergées spécialement conçues pour l'équipement des puits profonds. Elles peuvent être commandées par un moteur placé en surface ou par un moteur immergé.[18]



- Pompe à axe horizontal

- Pompe à axe vertical

Figure II-9 : Les différentes position d'installation de la pompe.[5]

II. 5. 4 Les différents montages

II. 5. 4. 1 Pompe centrifuge en charge

Une pompe est montée en charge lorsque le circuit est correctement disposé, elle se remplit toute seule du produit à pomper. (Bac d'aspiration situé au-dessus de la pompe, ou bac sous pression).

Le circuit d'une pompe en charge doit contenir :

- Des vannes d'isolement amont/aval et une vanne de purge.
- Un clapet de non-retour au refoulement pour empêcher un retour de produit en cas d'arrêt.
- Une mesure de pression au refoulement, pour contrôler le bon fonctionnement. [06]

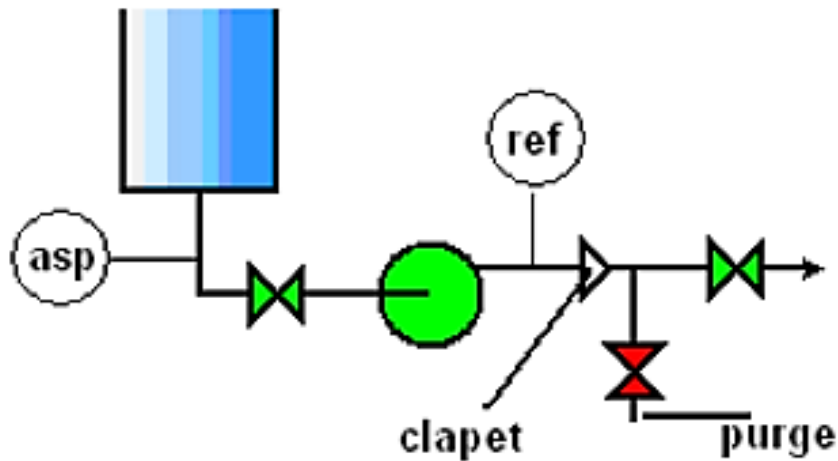


Figure II-10 : Pompe en charge. [5]

II. 5. 4. 2 Pompe centrifuge en aspiration

Une pompe est dite montée en aspiration si son bac d'alimentation est situé en dessous du niveau de la pompe. Si elle est initialement vide de tout produit, elle doit donc se remplir de liquide avant de démarrer effectivement. Dans le cas où elle se remplit toute seule après démarrage, la pompe est dite auto-amorçante. Les pompes centrifuges ne sont généralement pas auto-amorçantes, sauf cas particulier. Elles doivent être remplies manuellement à l'aide d'un dispositif approprié (entonnoir, produit pris au refoulement...).

Le circuit d'une pompe en aspiration doit contenir :

- Une vanne d'isolement amont/aval et une vanne de purge.
- Un clapet non-retour au refoulement.
- Un clapet/crépine à l'aspiration pour éviter son désamorçage lors de l'arrêt de la pompe.
- Une ligne d'amorçage permettant de remplir la ligne d'aspiration avant démarrage.
- Une mesure de pression à l'aspiration et au refoulement. [5]

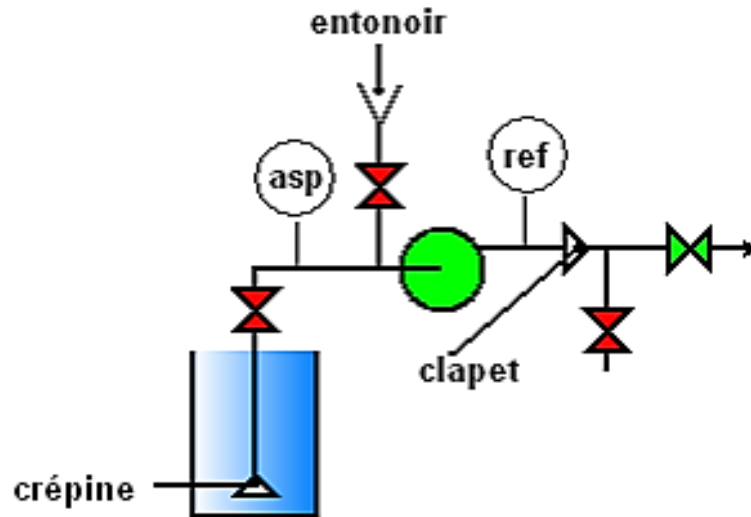


Figure II-11 : Pompe en aspiration. [06]

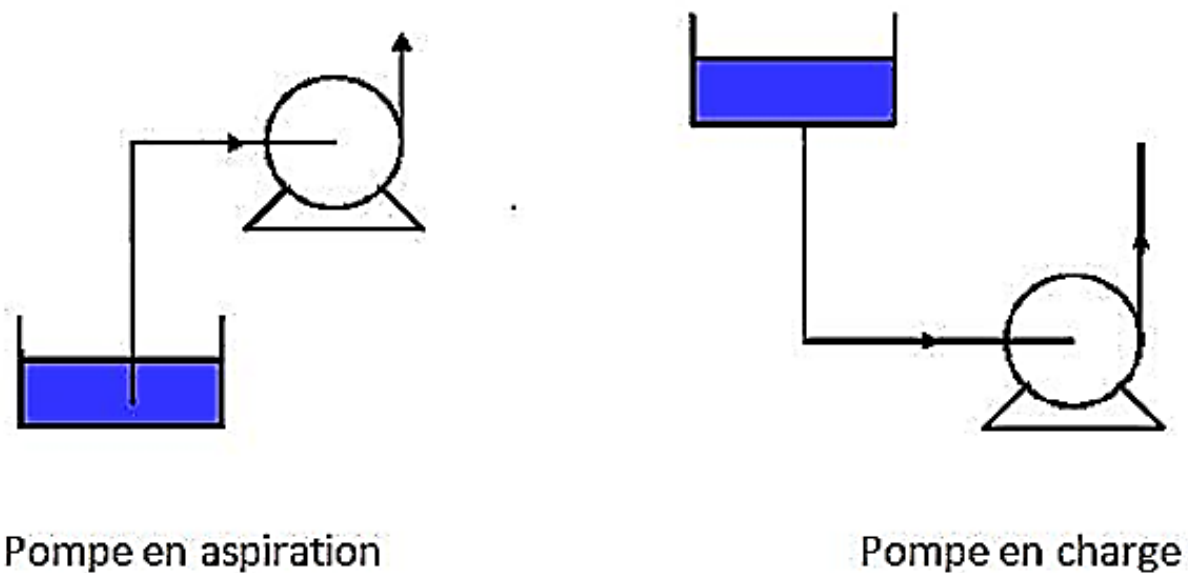


Figure II-12: Différents types de montage des pompes.[18]

II. 5. 5 La forme de la roue

Il existe deux types d'aspiration

II. 5. 5. 1 Aspiration simple

Une turbine à aspiration unique permet au liquide de pénétrer au centre des pales dans une seule direction.

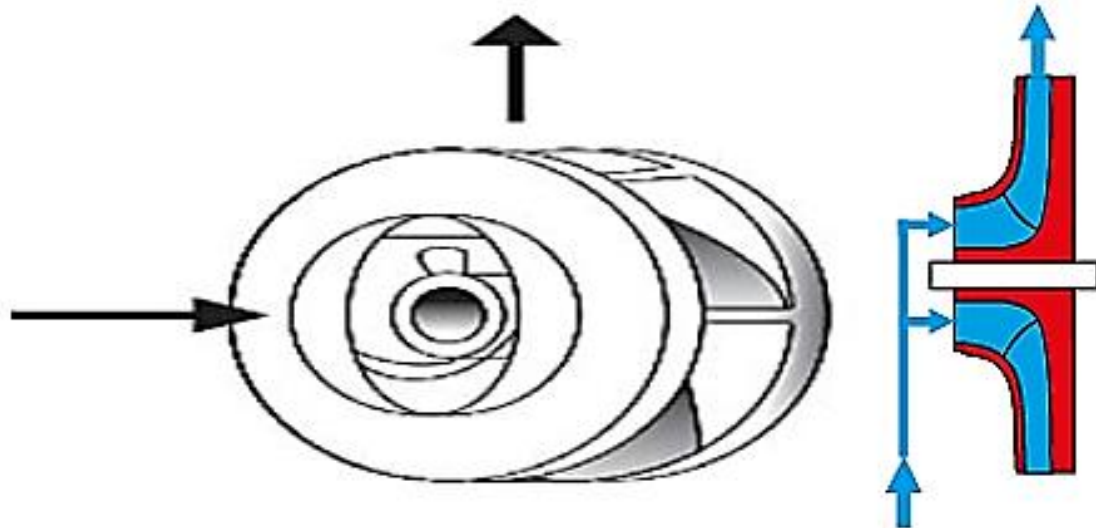


Figure II-13: Roue à simple aspiration.

II. 5. 5. 2 Double aspiration :

Une roue à double aspiration permet au liquide de pénétrer au centre des pales de la roue des deux côtés simultanément. Cela réduit les forces exercées sur l'arbre.[12]

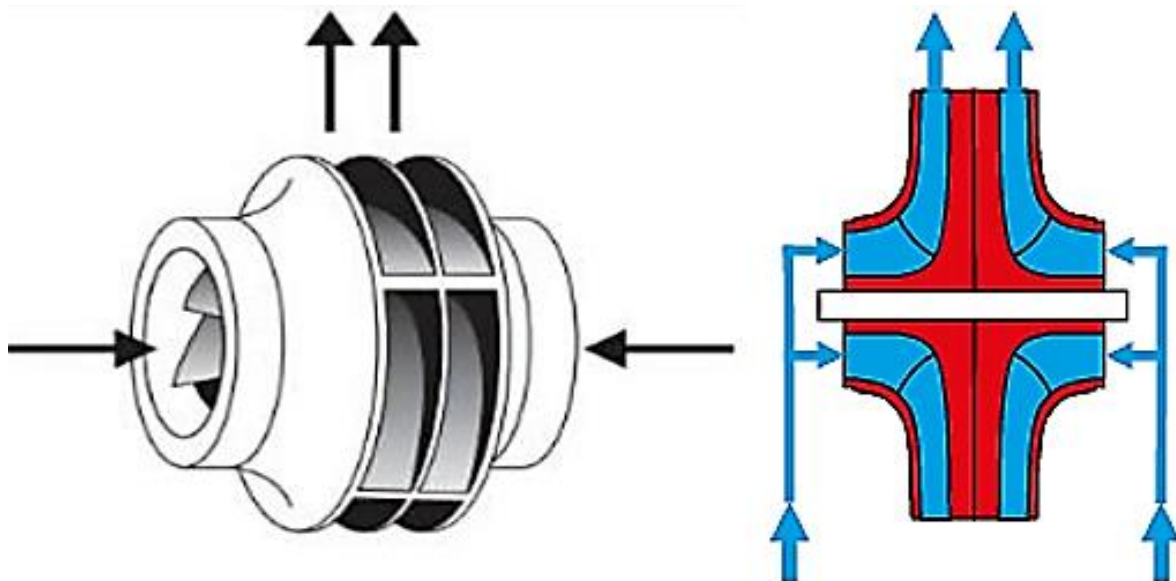


Figure II-14: Roue à double aspiration.[14]

II. 6 Utilisation

Les pompes centrifuges sont les plus utilisées dans le domaine industriel à cause de la large gamme d'utilisation qu'elles peuvent couvrir, de leur simplicité et de leur faible coût. Néanmoins, il existe des applications pour lesquelles elles ne conviennent pas, comme :

- Utilisation de liquides visqueux, la pompe centrifuge nécessaire serait énorme par rapport aux débits possibles.
- Utilisation de liquides "susceptibles" c'est-à-dire ne supportant pas la très forte agitation dans la pompe (liquides alimentaires tel que le lait).
- Utilisation comme pompe doseuse ; la nécessité de réaliser des dosages précis instantanés risque d'entraîner la pompe en dehors de ses caractéristiques optimales.[19]

II. 7 Fonction guidage axial et en rotation du rotor

La roue est solidaire de l'arbre par l'intermédiaire d'une clavette, et bloquée par un écrou. L'ensemble : Roue – Clavette – Écrou – Arbre Parties tournantes des roulements et accouplement, forme le rotor.

En mouvement le rotor est soumis à 2 forces :

- **Une Force Radiale F_R** : due à son poids et à la réaction de la volute.
- **Une force axiale F_A** : dirigée vers l'avant de l'impulseur.

Force résultante, des forces produites par la pression du liquide sur les surfaces de l'impulseur.

L'impulseur doit donc être guidé dans sa rotation et immobilisé axialement.[20]

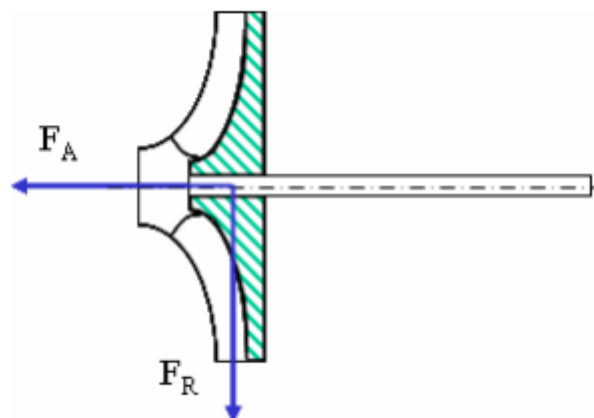


Figure II-15 :Rotor.[20]

II. 7. 1 Fonction guidage en rotation

Un guidage en rotation peut être réalisé soit par un roulement à billes, soit par un roulement à rouleaux ou paliers lisses.

II. 7. 1. 1 Roulement à billes et roulement à rouleaux

Organe interposé entre les paliers et les arbres des systèmes mécaniques en rotation, destiné à substituer un frottement de roulement à un frottement de glissement. [21]

Le roulement a été utilisé depuis longtemps, mais sous une forme simpliste. Le premier à avoir établi un dessin pour le roulement à billes est Léonard DE VINCI (XV^{ème} siècle) qui fut ainsi considéré comme l'inventeur du roulement moderne. Aujourd'hui, les roulements prennent des formes plus développées et plus variées et leur utilisation au sein des machines tournantes devient une nécessité absolue. Ceci explique bien l'intérêt actuel qu'on leur accorde. [22]



Figure II-16: Roulement à billes/ roulement à rouleaux.[23]

De manière générale, les roulements sont constitués de quatre composants essentiels. Une bague extérieure, une bague intérieure, des éléments roulants et une cage. En fonction de l'application envisagée, les éléments roulants peuvent être des billes, des rouleaux cylindriques ou des aiguilles (rouleaux cylindriques très longs devant leur diamètre). Chaque type de roulement possède des caractéristiques spécifiques en termes de charges radiales et axiales supportées, de vitesse limite ou encore de défaut d'alignement admissible. [24]

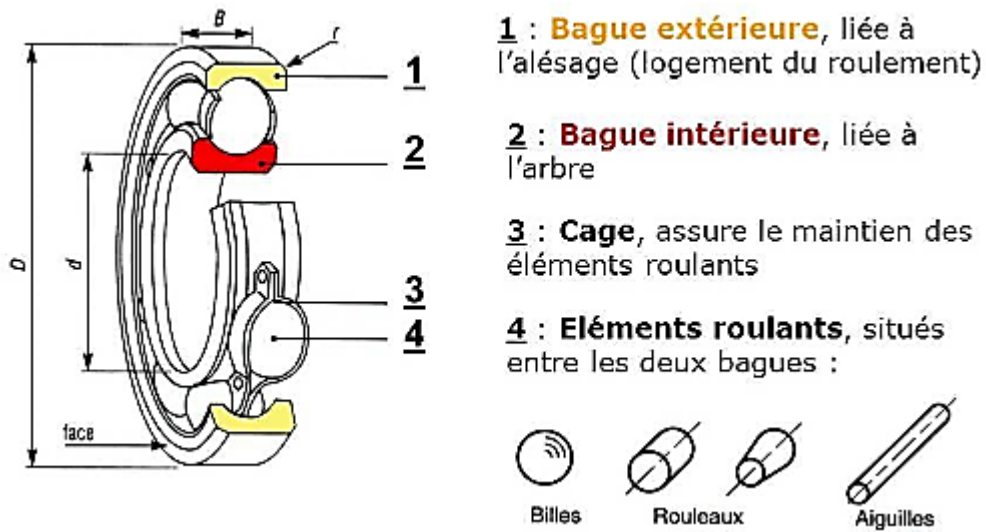


Figure II-17 : Les composants essentiels d'un roulement.[25]

II. 7. 1. 2 Paliers lisses (coussinets)

Les paliers lisses, également connus sous le nom de coussinets, sont des éléments de friction qui permettent le guidage en rotation de l'arbre de la pompe. Ils sont fabriqués à partir de matériaux tels que le bronze, le laiton ou des composites autolubrifiants.

Les paliers lisses nécessitent généralement une lubrification adéquate pour réduire la friction et l'usure. Ils sont souvent utilisés dans les pompes de plus grande taille et de plus grande capacité.

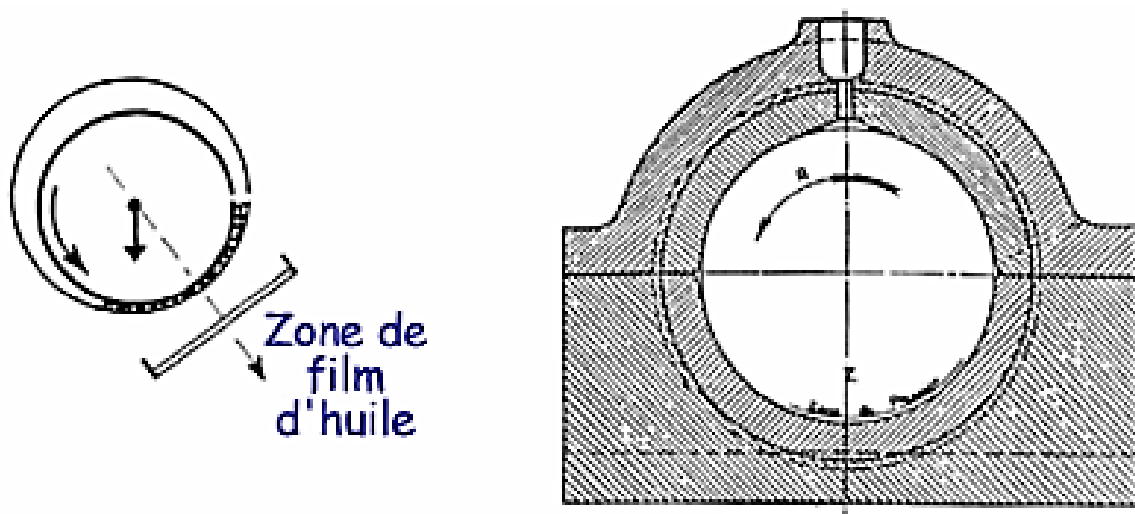


Figure II-18: Paliers lisses (coussinets).[20]

II. 7. 2 Fonction guidage axial

Le rotor est soumis à une force axiale due à la pression du liquide sur la roue. Le positionnement axial du rotor, est dans la grande majorité des cas, assuré par une butée. En fait, lorsqu'on utilise des paliers à roulements, la fonction butée est souvent assurée par un roulement à billes (à gorge profonde ou à 2 rangées de billes à contact oblique montées en opposition) bloqué axialement.[20]

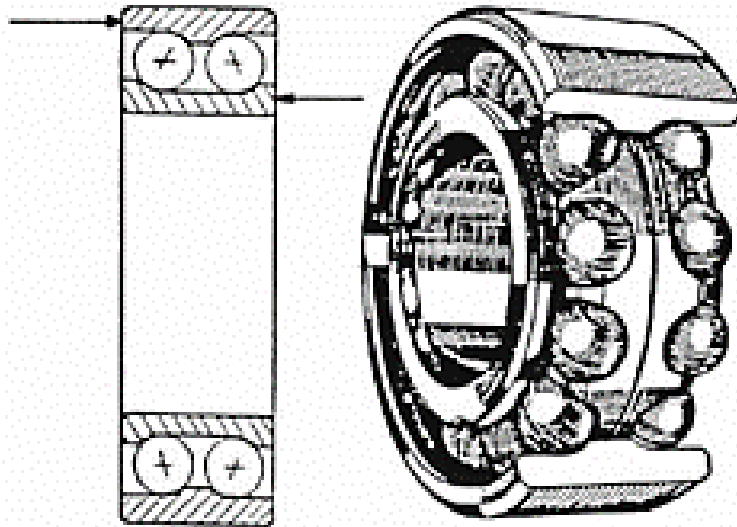


Figure II-19: Roulement à 2 rangées de billes à contact.[20]

II. 8 Fonction d'étanchéité dans les pompes centrifuge

Dans les applications technologiques, la fonction « étanchéité » consiste à séparer deux milieux fluides de nature et/ou d'états physico-chimiques différents. Le but est de minimiser ou d'empêcher une contamination d'un milieu par l'autre, afin d'éviter une pollution, une réaction chimique, une avarie ou surtout une fuite qui conduit à une perte de performances.

L'industrie moderne manipule de nos jours beaucoup de produits dangereux (toxiques, inflammables, polluants, radioactifs) qui nécessitent une connaissance beaucoup plus précise des fuites. Le souci d'éviter la pollution de l'environnement et de protéger les personnes conduit à quantifier ces fuites et à leur fixer des limites. Pour assurer la fonction d'étanchéité, ce qui veut dire empêcher le passage d'un fluide d'une enceinte voisine. On utilise des organes spéciaux appelés 'Joints d'étanchéité'.

On note qu'il existe deux types d'étanchéité : statique et dynamique.

II. 8. 1 Etanchéité statique

Une étanchéité est dite statique lorsque les pièces en contact sont immobiles l'une par rapport à l'autre.

L'étanchéité statique se fait généralement de deux manières :

- **Etanchéité directe** : En pressant fortement deux surfaces métalliques l'une contre l'autre, leurs aspérités s'écrasent et les îlots de contact s'élargissent jusqu'à réaliser une bonne étanchéité même à de fortes pressions.
- **Etanchéité indirecte** : Assurées par des joints fixes interposé entre les deux pièces (carter, brides...) adaptés au produit.

II. 8. 2 Etanchéité dynamique

Une étanchéité est dite dynamique lorsque les surfaces d'étanchéité sont mobiles.

Dans une pompe centrifuge on distingue deux types d'étanchéité dynamique :

II. 8. 2. 1 Étanchéités dynamiques internes :

Elle peut être située dans la volute ainsi que dans la roue en général assurée par des bagues appeler bague d'usure.[20]

- **La bague d'usure** :

Les bagues d'usure sont utilisées pour augmenter l'efficacité de la pompe et réduire le contact métal contre métal.

La bague d'usure a pour but de préserver mécaniquement les pièces importantes de la pompe. Elle peut être située dans la volute ainsi que dans la roue se trouvent couramment dans les pompes centrifuges. Ces pompes sont utilisées dans de nombreuses applications pour transférer de l'énergie par force centrifuge. Lorsque la roue de la pompe centrifuge tourne, le fluide est poussé vers l'extérieur le long de la circonférence et dirige le débit vers la sortie de la pompe, Comme les pompes centrifuges sont nécessaires pour déplacer les liquides en ajoutant de l'énergie cinétique au fluide, la turbine fonctionne à des vitesses élevées. Malheureusement, ces vitesses élevées peuvent entraîner une usure excessive de la roue et du carter en raison de la déflexion de l'arbre.

Des bagues d'étanchéité ou bagues d'usure sont installées pour limiter la fuite inévitable du fluide à la sortie de la roue vers l'aspiration. L'efficacité des bagues dépend de la valeur du jeu. Trop important, ce dernier diminue les performances de la pompe.

Par contre, un jeu trop faible augmente les risques de contact entre les bagues et le danger de détérioration.[26]



Figure II-20 : Bague d'usure [27]

II. 8. 2. 2 Étanchéités dynamiques externes (étanchéité d'arbres tournants) :

Elle peut être assurée par différents dispositifs d'étanchéité on cite les types les plus utilisés dans les pompes centrifuges :

a) Les joints à lèvres :

Sauvent assurent une étanchéité radiale ou axiale. Ils sont généralement en élastomère. Il y a contact entre l'arbre et la surface intérieure du joint, mais sur une aire très réduite.

A l'inverse, cette aire peut être très étendue sur une garniture mécanique.

b) Les tresses avec presse étoupe :

Dans le cas du presse-étoupe, l'étanchéité est réalisée par une tresse. Cette dernière est un élément souple enroulé autour de l'arbre de la pompe et comprimé légèrement par la presse étoupe (pièce métallique) contre le corps de la pompe. Le presse-étoupe est solidaire du couvercle de la pompe et est fixé par des vis de serrage qui permettent d'assurer et d'ajuster, en fonction des conditions d'opération, la compression de la tresse sur l'arbre. L'étanchéité du

presse-étoupe n'est pas absolue et la tresse doit être constamment lubrifiée, soit par le fluide véhiculé sous pression, soit par un fluide apporté extérieurement avec une pression supérieure à celle du fluide véhiculé. Ainsi, il y aura toujours la présence d'un produit de fuite dont le volume est plus ou moins élevé en fonction des conditions d'opération.[28]

c) Les garnitures mécaniques :

Sont employées dans un grand nombre de configurations, particulièrement dans des applications à hautes performances (vitesses élevées, forts gradients de pression, hautes températures). Ces composants peuvent être utilisés pour tous types de fluides suivant les matériaux en présence.

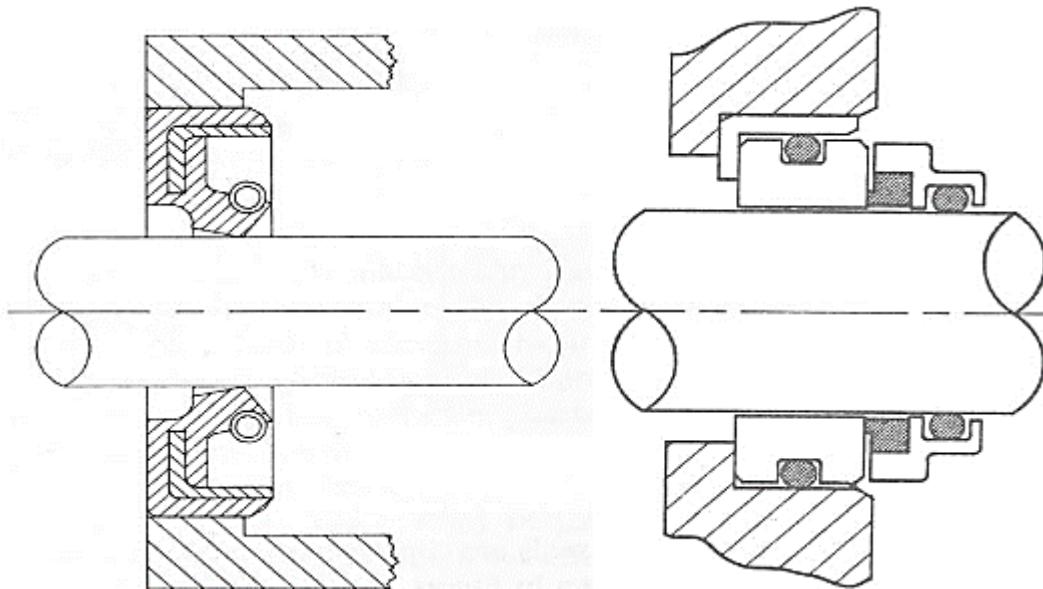


Figure II-21 : Joint à lèvres / Garniture mécanique.

Les garnitures mécaniques d'étanchéité sont un des éléments constitutifs des machines tournantes les plus critiques.

En effet, de leur intégrité dépend le bon fonctionnement des applications où elles sont utilisées. Une garniture mécanique se compose principalement d'un ensemble tournant ou rotor lié à l'arbre et d'un ensemble fixe ou stator lié au carter de la machine. Le rotor est fixé façon rigide à l'arbre. Les étanchéités secondaires, réalisées par des joints toriques, et les ressorts confèrent au stator les degrés de liberté nécessaires à un alignement parfait avec l'élément tournant.

En outre, elles évitent l'introduction de corps étrangers dans les organes de machines et les pertes de lubrifiant des carters.[29]

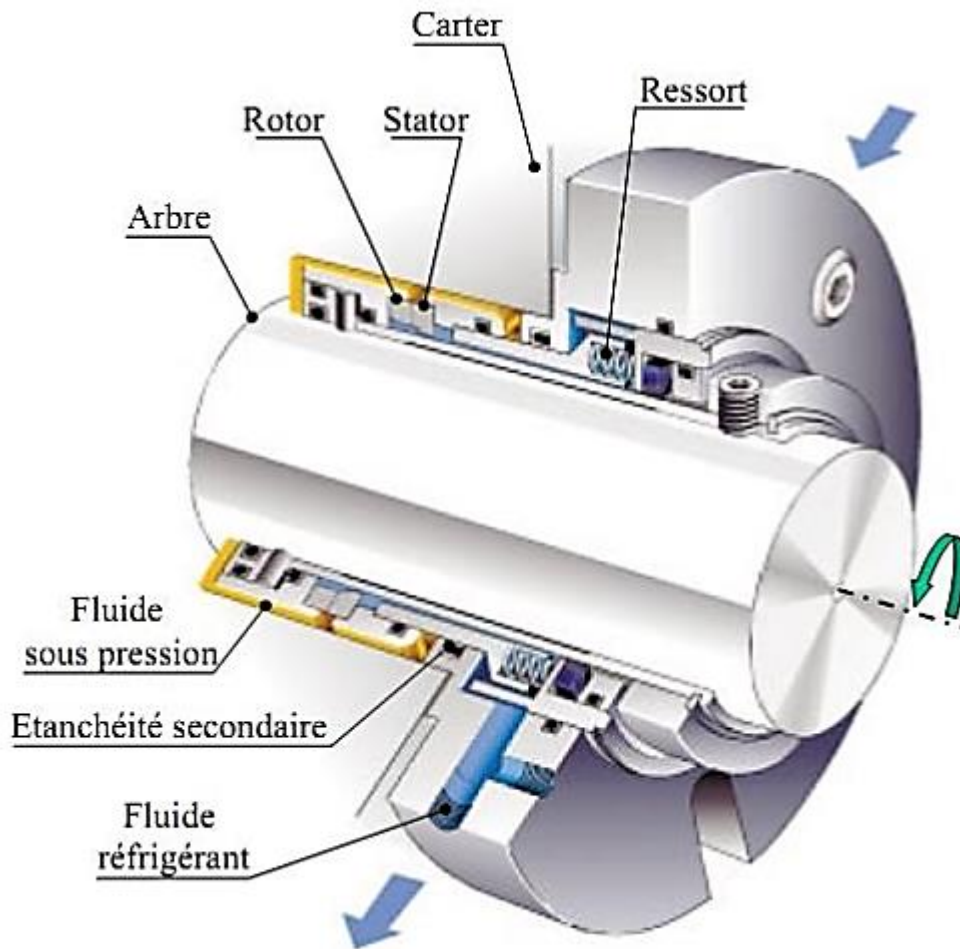


Figure II-22 : Constitution d'une garniture mécanique.[29]

II. 9 Fonction lubrification

La fonction de lubrification dans les pompes consiste à réduire la friction entre les pièces mobiles de la pompe, telles que les paliers, les roulements, les joints d'étanchéité, et d'autres éléments en mouvement. Elle est réalisée en introduisant un lubrifiant, généralement un liquide ou un fluide, entre ces pièces pour créer une couche de séparation, réduisant ainsi le frottement et l'usure.

La lubrification dans les pompes centrifuges a plusieurs objectifs :

- **Réduction de la friction** : Elle diminue la résistance au mouvement entre les pièces, ce qui permet un fonctionnement plus fluide et efficace de la pompe.
- **Refroidissement** : Elle aide à dissiper la chaleur générée par la friction entre les composants, évitant ainsi la surchauffe et les défaillances.

- **Étanchéité** : Elle peut maintenir une étanchéité adéquate entre les pièces pour éviter les fuites de fluide.
- **Réduction du bruit** : Elle réduit les bruits générés par les pièces en mouvement en amortissant les vibrations.
- **Protection contre l'usure** : Elle prolonge la durée de vie des composants en minimisant l'usure due au frottement.
- **Protection contre la corrosion** : Dans certaines applications, elle peut protéger les composants contre la corrosion due à l'interaction avec les fluides pompés.
- **Amélioration de l'efficacité** : Une lubrification appropriée peut contribuer à réduire les pertes d'énergie liées à la friction, ce qui permet un fonctionnement plus économe en énergie. [5]

II. 10 Couplages des pompes

Pour parvenir à obtenir certaines conditions de fonctionnement impossibles à réaliser avec une seule pompe, les utilisateurs associent parfois deux pompes dans des montages en série ou en parallèle.

II. 10. 1 Couplage en série

Les pompes **P1** et **P2** montées en série sont traversées par le même débit de liquide Q_v . A un débit donné, la hauteur manométrique totale de ce couplage $HMT_{série}$ est la somme des hauteurs manométriques totales HMT_1 et HMT_2 des deux pompes fonctionnant séparément à ce même débit :

$$HMT_{série} = HMT_1 + HMT_2 \quad (\text{II. 1})$$

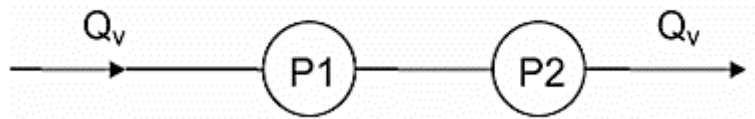


Figure II-23 : Pompes en série. [5]

Graphiquement, on trouve la caractéristique de la hauteur manométrique totale du montage en additionnant les caractéristiques de chaque pompe pour un même débit.

Le couplage en série permet d'augmenter la hauteur manométrique totale, donc la charge du réseau.

Il convient donc bien pour un réseau présentant des pertes de charge importantes.[06]

II. 10. 2 Couplage en parallèle

Les pompes **P1** et **P2** montées en parallèle montrent la même hauteur manométrique totale **HMT** :

$$HMT_{Parallèle} = HMT_1 = HMT_2 \quad (II .2)$$

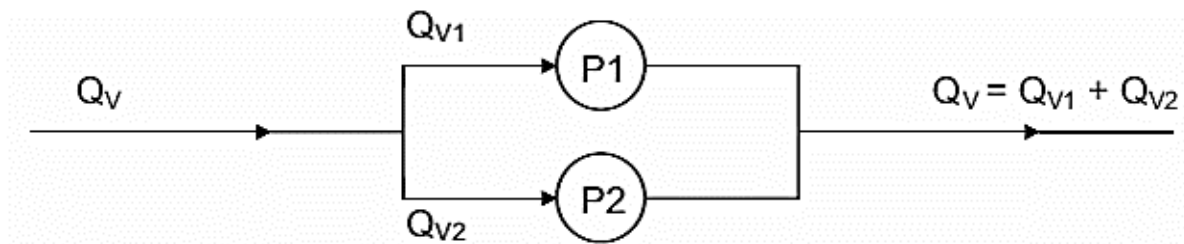


Figure II-24 : Couplage en parallèle. [5]

Graphiquement, on trouve la caractéristique du débit totale du montage en additionnant les débits des deux pompes pour une même hauteur manométrique totale.

Le couplage en parallèle permet d'augmenter le débit dans le réseau. Il convient bien pour un réseau présentant des pertes de charge assez faibles.

Les pompes sont parfois montées en parallèle (by-pass) avec une seule des deux fonctionnant. En cas de panne ou pour une action de maintenance le montage permet alors de continuer à fonctionner en démarrant la deuxième pompe.[5]

II. 11 Avantages des pompes centrifuges

- Construction simple, peu de composants mobiles, longue durée de service.
- Débit de refoulement facile à ajuster par une soupape à la sortie de la pompe ou par la vitesse de rotation.
- Vitesse de rotation élevée, entraînement direct possible par moteur électrique ou turbine.
- Limiteur de pression intégré, pas de soupape de sécurité requise.
- Fonctionnement très silencieux grâce à un bon équilibrage des masses et à l'absence de masses oscillantes.

- Refoulement continu sans pulsations.
- Acheminement possible de matières solides.
- Conviennent à des puissances élevées.
- Concentration élevée de la puissance et petit espace de construction.

II. 12 Inconvénients des pompes centrifuges

- Pas auto-amorçantes (des types spéciaux tels que la pompe à canal latéral peuvent être auto-amorçantes).
- Risque de cavitation avec de l'eau chaude ou des pressions d'aspiration faibles.
- Le débit volumétrique dépend de la pression de refoulement.
- Plusieurs étages requis pour les pressions de refoulement élevées. [30]

II. 13 Conclusion

Ce chapitre nous a guidés à travers l'essentiel des pompes centrifuges, des dispositifs qui sous-tendent de nombreuses opérations industrielles. Nous avons expliqué leur principe fondamental de fonctionnement, exploitant la force centrifuge pour déplacer les liquides. De plus, nous avons exploré les composants clés qui composent ces pompes, tels que l'impulseur, le boîtier et les roulements, et leur rôle vital dans l'ensemble du système.

Chapitre III Diagnostic des pannes des pompes centrifuges

Ce chapitre dédié au diagnostic des pannes de pompe centrifuge, nous plongerons au cœur des mécanismes complexes qui peuvent entraîner des dysfonctionnements dans ces équipements cruciaux pour de nombreuses industries. Les pompes centrifuges, en dépit de leur robustesse, ne sont pas à l'abri des défaillances. Ces pannes peuvent découler de multiples facteurs, allant de l'usure naturelle à des conditions de fonctionnement extrêmes, en passant par la corrosion ou même des erreurs de maintenance.

Nous explorerons les méthodes de diagnostic avancées qui permettent d'identifier, d'analyser et de résoudre ces problèmes potentiels. Ces méthodes s'appuient sur une combinaison de technologies de surveillance et d'analyse de données. Leur objectif est d'anticiper les pannes et d'assurer la continuité des opérations industrielles.

Partie 1 : Généralités sur la maintenance industrielle et le diagnostic

III. 1 Maintenance industrielle

Les installations, les équipements tendent à se détériorer dans le temps sous l'action de causes multiples telles que usures, déformations dues au fonctionnement, et ou action des agents corrosifs (agents chimiques, atmosphères...)

La maintenance industrielle est une discipline essentielle dans le domaine de la gestion et de l'exploitation des installations industrielles. Elle englobe l'ensemble des actions visant à assurer le bon fonctionnement, la fiabilité et la durabilité des équipements industriels tout au long de leur cycle de vie.

L'objectif principal de la maintenance industrielle est de minimiser les arrêts de production imprévus en prévenant les pannes et en effectuant des réparations préventives ou correctives. Elle contribue ainsi à optimiser la disponibilité des équipements, à maximiser leur performance et à réduire les coûts de production.

En résumé, la maintenance industrielle joue un rôle crucial dans la pérennité des installations industrielles. Elle permet d'assurer la disponibilité, la fiabilité et la performance des équipements, contribuant ainsi à la productivité et à la rentabilité des entreprises.[31]

III. 1. 1 Définition de la maintenance industrielle

D'après l'Afnor (NF X 60-010) : « La maintenance est l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé ».

Dans une entreprise, maintenir, c'est donc effectuer des opérations (dépannage, réparation, graissage, contrôle, etc.) qui permettent de conserver le potentiel du matériel pour assurer la production avec efficacité et qualité. [32]

III. 1. 2 De l'entretien à la maintenance

Cette différence de vocabulaire n'est pas une question de mode, mais marque une évolution de concept. Le terme maintenance est apparu dans les années 1950 aux États-Unis. En France, on parlait encore à cette époque d'entretien. Progressivement, une attitude plus

positive vis-à-vis de la défaillance voit le jour. Il faut tirer une leçon de l'apparition d'une panne pour mieux réagir face aux aléas de fonctionnement

Le terme « maintenance » se substitue à celui d'« entretien » qui signifie alors « maintenance corrective ».

Entretenir, c'est dépanner, réparer pour assurer le fonctionnement de l'outil de production : entretenir, c'est subir le matériel.

Maintenir, c'est intervenir dans de meilleures conditions ou appliquer les différentes méthodes afin d'optimiser le coût global de possession : maintenir, c'est maîtriser.

L'esprit de Maintenance se résume en deux mots-clés : Maîtriser au lieu de subir.[32]

III. 1. 3 Objective de la maintenance industrielle

L'objectif des équipes de maintenance est de maintenir les installations de production en parfait état et d'assurer le rendement global maximum tout en optimisant le coût. L'obtention du meilleur rendement passe par la prévention des pannes, le respect des cadences de production et l'amélioration continue de la qualité des produits. Maintenir, ce n'est plus subir les pannes mais maîtriser les défaillances par l'optimisation de la politique de maintenance, par une bonne prévention, par des réparations rapides et efficaces, enfin par l'amélioration du matériel.

En résumé la zéro panne c'est l'objectif principal de la maintenance.[33]

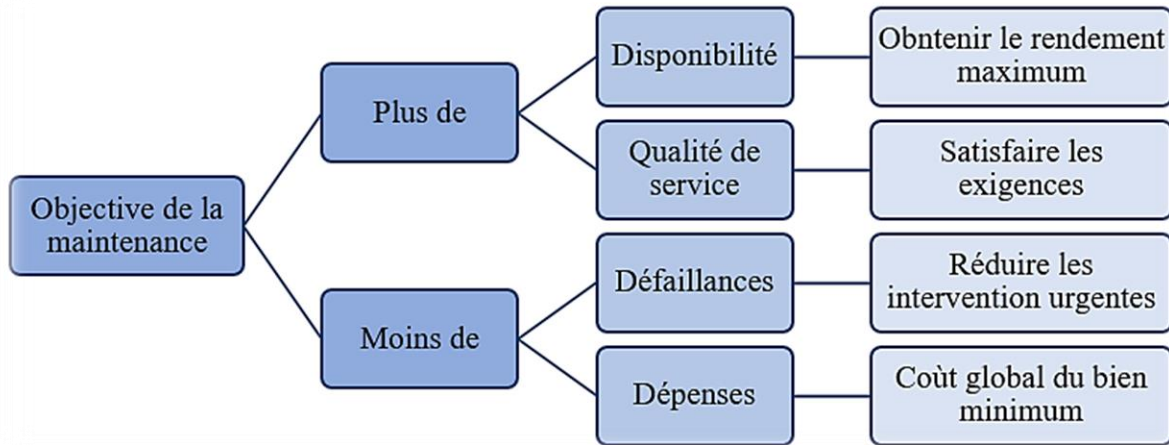


Figure III-1: schématisation des objectifs de la maintenance.[34]

III. 1. 4 Les niveaux de maintenance industrielle

- **1^{er} niveau**

Actions simples nécessaires à l'exploitation et réalisées sur des éléments facilement accessibles en toute sécurité à l'aide d'équipements de soutien intégrés au bien.

- **2^{ème} niveau**

Actions qui nécessitent des procédures simples et/ou des équipements de soutien (intégrés au bien ou extérieurs) d'utilisation ou de mise en œuvre simple. Ce type d'actions de maintenance est effectué par un personnel qualifié avec les procédures détaillées et les équipements de soutien définis dans les instructions de maintenance.

- **3^{ème} niveau**

Opérations qui nécessitent des procédures complexes et/ou des équipements de soutien portatifs, d'utilisation ou de mise en œuvre.

- **4^{ème} niveau**

Opérations dont les procédures impliquent la maîtrise d'une technique ou généralités technologie particulière et/ou la mise en œuvre d'équipements de soutien spécialisés. Ce type d'opération de maintenance est effectué par un technicien ou une équipe spécialisée à l'aide de toutes instructions de maintenance générales ou particulières.

- 5ème niveau

Opérations dont les procédures impliquent un savoir-faire, faisant appel à des techniques ou technologies particulières, des processus et/ou des équipements de soutien industriels. Ce type d'opérations de maintenance (rénovation, reconstruction, etc.) est effectué par le constructeur ou par un service ou société spécialisée avec des équipements de soutien définis par le constructeur et donc proches de la fabrication du bien concerné.[35]

III. 1. 5 Les types de maintenance industrielle

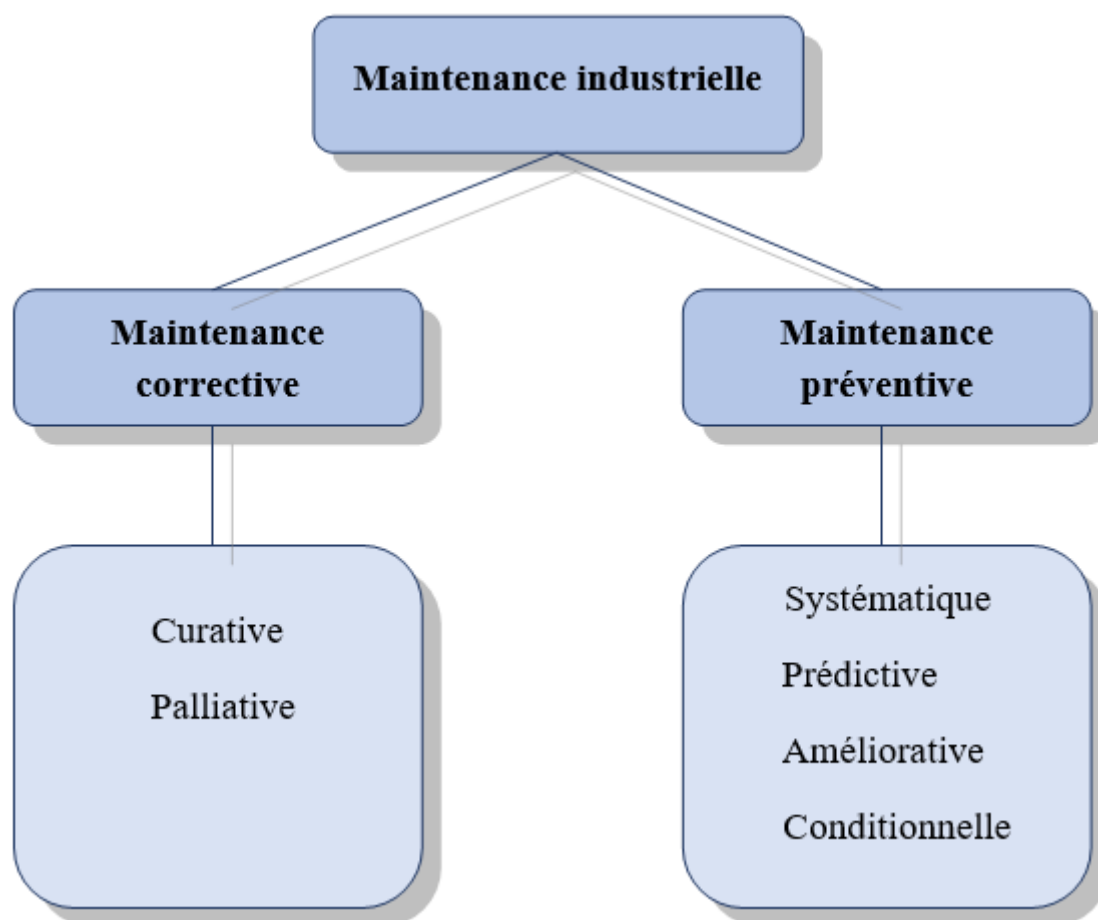


Figure III-2: Différents types de maintenance industrielle.

III. 1. 5. 1 Maintenance corrective

Définition AFNOR de la maintenance corrective : « Maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise »

Pratiquement, c'est fonctionner sans entretien jusqu'à la rupture de la pièce. Il s'agit d'une "maintenance effectuée après défaillance. C'est une politique de maintenance (dépannage ou réparation) qui correspond à une attitude de réaction à des événements plus ou moins aléatoires et qui s'applique après la panne. Ce qui ne veut pas dire obligatoirement que celle-ci n'a pas été « pensée ».[36]

On distingue deux types de maintenance corrective :

a) Maintenance palliative

La maintenance palliative correspond au dépannage. Elle consiste à remettre provisoirement une machine ou un outil en état, dans l'attente de sa réparation. La maintenance palliative permet d'éviter l'arrêt totale de production, on parle alors de reprise de production en mode « dégradé ».

Dépannage : actions physiques exécutées pour permettre à un bien d'accomplir sa fonction requise pendant une durée limitée jusqu'à ce que la réparation soit exécutée

b) Maintenance curative

La maintenance curative répare les causes et conséquences de la panne. Contrairement à la maintenance palliative, il s'agit d'une action en profondeur qui agit sur le long terme, souvent en remplaçant la pièce défectueuse par une neuve. L'équipement reprend alors une production normale.[37]

III. 1. 5. 2 Maintenance préventive

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

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

- La maintenance préventive a pour but de :
- Garantir la disponibilité du bien.
- Augmenter sa durée de vie.
- Diminuer la probabilité des pannes et donc d'actions de maintenance corrective.

- Contrôler les consommations d'énergie ou de pièces détachées en contribuant à la maîtrise des stocks.

On distingue plusieurs types de maintenance préventive :

a) Maintenance systématique

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

La fréquence des interventions est établie à compter de la mise en fonctionnement du bien ou à la suite d'une révision partielle ou complète de celui-ci.[37]

b) La maintenance prédictive :

La maintenance prédictive consiste à prédire la date à laquelle une action de maintenance doit s'effectuer selon un modèle de dégradation théorique des composants mécaniques de la machine.[38]

c) La maintenance améliorative :

La maintenance améliorative est moins connue et souvent considérée comme une « activité connexe ». Elle désigne un ensemble de mesures techniques, administrative et de gestion visant à améliorer la sûreté de fonctionnement d'un bien en modifiant la conception d'origine mais sans changer sa fonction requise.

Les objectifs de la maintenance améliorative peuvent être de réduire la consommation d'énergie, d'augmenter la durée de vie des composants, d'améliorer la maintenabilité, d'augmenter les performances de production, etc.

Les interventions de maintenance améliorative prennent la forme d'actions de rénovation, de reconstruction ou de modernisation.[39]

d) Maintenance conditionnelle

La maintenance préventive conditionnelle est basée sur une surveillance du bien en fonction d'un type d'évènement prédéfini (auto-diagnostique, information de capteurs...). Elle fait intervenir des informations recueillies en temps réel, au moyen de techniques comme la tribologie ou la thermographie par infra-rouge, avec pour objectif d'intervenir au moment où le bien a franchi le seuil d'usure ou de dégradation fixé préalablement. Il s'agit d'effectuer la bonne opération au bon moment, pour une meilleure maîtrise des coûts.

Il existe deux types de maintenance conditionnelle :

- **Maintenance conditionnelle off-line :**

C'est un suivi périodique (off-line) de l'évolution des paramètres (vibratoires par exemple), souvent accompagné, dans le même temps, de la surveillance d'autres paramètres (analyse de lubrifiant, performances, appréciations sensorielles, etc.). Ceci permet de détecter l'apparition des défauts à évolution lentes. La périodicité des relevés est variable (entre 2 semaines et 6 mois suivant l'importance et le coût des machines en cause).

- **Maintenance conditionnelle on-line :**

C'est un suivi continu (on-line), il permet de suivre l'évolution de l'ensemble des paramètres il présente, en plus, l'avantage de détecter des défauts à évolution rapide et d'assurer la sécurité des installations par l'arrêt de la machine à l'approche d'un seuil réputé dangereux. Seules les défaillances de type explosif (perte brutale d'aubages de turbine ou compresseur axial, par exemple), ne sont pas détectable de manière précoce, mais le déclenchement d'une alarme de la machine dès leur apparition peut limiter les dégâts consécutifs à ces défaillances.[37]

III. 2 Diagnostic

Dans l'industrie, le diagnostic est défini par l'ensemble d'actions visant à évaluer un procédé (système) et identifier la cause probable des défaillances à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test de son fonctionnement.

Le diagnostic est en principe défini comme un processus à trois phases :

- Détection du mode de fonctionnement.
- Qualification du mode de fonctionnement.
- Décision à partir de la reconnaissance du mode de fonctionnement.

La mission pour laquelle le système a été conçu, peut être totalement remplie, partiellement remplie ou non remplie, cela dépend du mode de fonctionnement, un système est dit diagnosticable s'il est susceptible d'être soumis à un diagnostic, il doit alors être muni d'organes d'observation (capteurs) et d'un système d'analyse pour étudier les informations fournies. La diagnosticabilité sera l'aptitude d'un système à être diagnostiqué.

Le diagnostic permet de déterminer le type, la taille, l'endroit et l'instant de l'apparition du défaut. L'opération de diagnostic incluse la localisation et l'identification d'un défaut.

Deux tâches essentielles en diagnostic :

- **La localisation** : permet de déterminer les éléments défaillants.
- **L'identification** : estime les caractéristiques statiques et dynamiques de défaut : l'instant d'apparition de la panne, sa durée et son importance.[40]

III. 2. 1 Notions de diagnostic

a) La supervision

La supervision est une technique industrielle dont le but est de surveiller et de suivre la mise en œuvre des opérations et leur chemin, en fonction de l'acquisition de données de ces processus. La surveillance, on dit aussi Diagnostic, regroupe l'ensemble des algorithmes de détection et de localisation des défaillances (Fault Detection and Isolation, FDI).



Figure III-3: Salle de contrôle.[41]

b) Défaillance

Événement engendrant une modification du fonctionnement du procédé. L'état du système ne correspond plus à un fonctionnement normal. Le système n'est plus apte à assurer totalement ses fonctions. Il est clair qu'une défaillance implique l'apparition d'un défaut puisqu'il existe un écart entre la caractéristique mesurée et la caractéristique théorique, Par contre, un défaut n'implique pas nécessairement une défaillance puisque le dispositif peut très bien continuer à assurer sa mission principale.

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

On peut classer les défaillances selon leur degré de sévérité par :

- **Défaillance absorbable** : pouvant être ignorée dans un premier temps.
- **Défaillance significative** : nécessite un processus de traitement.
- **Défaillance critique** : nécessite une intervention d'urgence.

c) Panne

C'est la conséquence d'une défaillance affectant le système, aboutissant à une interruption permanente de sa capacité à remplir une fonction requise et pouvant provoquer son arrêt complet. C'est la cause de l'apparition de symptômes.

Deux types de pannes peuvent être distingués :

- **Les pannes permanentes** : une fois la panne est produite, elle nécessite une action de réparation.
- **Les pannes intermittentes** : le système peut retrouver son fonctionnement normal après l'occurrence de la panne. Une panne intermittente est généralement le résultat d'une dégradation partielle et progressive d'un composant du système, pouvant aboutir à une panne permanente.

d) Défaut

Un défaut est une anomalie de fonctionnement d'un système physique. On appelle défaut tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique théorique. Cet écart est idéalement nul en absence de défauts.

Les défauts peuvent apparaître au niveau des capteurs, des actionneurs ou au niveau du système lui-même.

e) Dégradation

Une dégradation représente une perte de performance d'une des fonctions assurées par un équipement, Si les performances sont au-dessous du seuil défini dans les spécifications fonctionnelles de cet équipement, Il n'y a plus dégradation mais défaillance.

f) La détection

Pour détecter les défaillances d'un système, il faut être capable de classer les situations observables comme étant normales ou anormales. Cette classification n'est pas triviale, étant donné le manque d'information qui caractérise généralement les situations anormales. Une simplification communément adoptée consiste à Considérer comme anormale toute situation qui n'est pas normale.[40]

III. 2. 2 Les méthodes de diagnostic

Grâce aux développements rapides de l'électronique, de l'informatique et de la technologie de l'information, les processus industriels modernes deviennent de plus en plus complexes. Ainsi, les problèmes de sécurité et de la sûreté de fonctionnement révèlent une importance considérable vu que la présence d'une défaillance peut entraîner des conséquences désastreuses. Ainsi, il est indispensable de faire appel à des techniques de surveillances modernes combinant le diagnostic et la correction des défauts afin d'améliorer la sécurité et la sûreté des processus, de minimiser les coûts de maintenance et de protéger l'installation dans les états critiques. De nombreuses techniques ont été proposées dans la littérature pour le diagnostic des défauts. La plupart d'entre elles peuvent être classées en deux principales approches :

- Les méthodes basées sur la redondance matérielle(physique).
- Les méthodes basées redondance analytique.

III. 2. 3 Méthodes basées sur la redondance matérielle (physique)

Les premières méthodes de diagnostic de défaut utilisaient la redondance matérielle (capteurs ou actionneurs multiples réalisant la même fonction) associée à de simples logiques à seuils. Le concept de cette approche consiste à reconstruire un second processus redondant en utilisant les composants matériels utilisés pour le processus principal concerné par le diagnostic. La détection et l'identification des défauts peuvent être obtenues à partir d'une comparaison continue entre les deux sorties du processus à surveiller et de son correspondant redondant. Cette approche permet une meilleure fiabilité et peut ainsi être appliquée dans des applications dont la sécurité est fortement indispensable (l'aérospatial, le nucléaire). Cependant, les coûts économiquement élevés des composants matériels redondants limitent leurs applications.[42]

Il existe différentes techniques appelées techniques de surveillance, basées sur la mesure de paramètres physiques, tels que :

- La mesure de vibrations
- La thermographie infrarouge
- L'analyse des mesures ultrasonores
- L'analyse d'huile
- L'analyse acoustique

III. 2. 3. 1 La mesure de vibrations

Toutes les machines, et particulièrement les machines tournantes, vibrent et l'image vibratoire de leurs vibrations à un profil très particulier lorsqu'elles sont en état de bon fonctionnement. Dès que des phénomènes d'usure, de fatigue, de vieillissement, de désalignement, de balourd, etc. apparaissent, l'allure de cette image change, ce qui permet, de quantifier l'intervention. La plupart des défauts mécaniques peuvent être détectés par cette technique.

L'investissement à prévoir pour ce type de mesure va de 3 000 DT (off-line) à 100 000 DT (online).

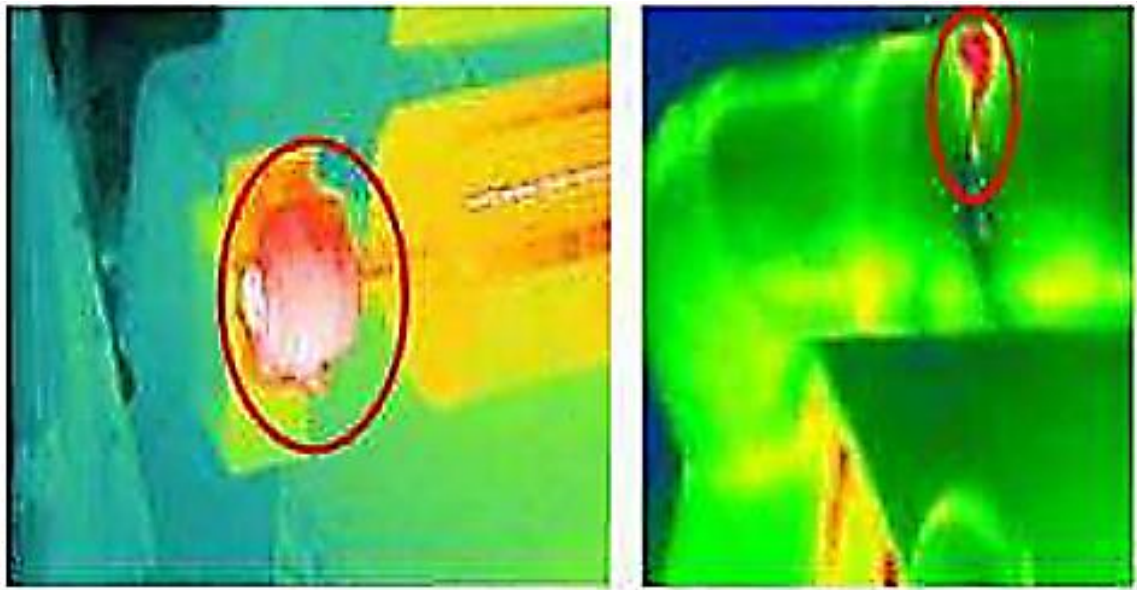
III. 2. 3. 2 La thermographie infrarouge

La thermographie est une des techniques utilisées pour contrôler l'état des structures et des systèmes industriels. Elle mesure l'intensité des émissions de rayons infrarouges (c'est-à-dire de chaleur) par une caméra infrarouge, afin de déterminer les conditions opératoires de l'équipement.

Grâce à la détection des anomalies thermiques certaines zones sont plus chaudes ou plus froides qu'elles ne devraient l'être, un inspecteur expérimenté peut localiser et identifier les incidents dès leur naissance.

Le champ d'application de cette technique est très vaste et on peut citer :

- La détection des points chauds dans les équipements électriques (conducteurs surdimensionnés, cosses mal vissées, etc..) ou mécaniques (dégradation d'un palier)
- La détection des fuites thermiques dans les fours, canalisations etc....



a. Défaut sur un palier

b. Fuite sur une canalisation

Figure III-4:Images thermographiques.

La thermographie infrarouge est relativement coûteuse (8 000 DT à 70 000 DT environ pour l'ensemble caméra + logiciel de traitement d'images associé), mais c'est un outil très polyvalent.

III. 2. 3. 3 L'analyse des mesures ultrasonores

Tout mouvement relatif entre pièces produit des ultrasons de friction. La mesure et l'enregistrement des signaux ultrasonores effectués à cadence régulière, et leur suivi dans le temps permettent de détecter beaucoup de problèmes de façon simple efficace et peu onéreuse.

La technique offre de multiples applications dans le contrôle d'équipements hydrauliques et pneumatiques (détection de fuites, contrôle d'étanchéité) et permet aussi de détecter les ultrasons émis par des défauts d'origine électrique (mauvais contacts, effets corona, effets d'arc, etc.).

L'investissement à prévoir pour ce type de mesure va de 1500 DT, pour un simple contrôleur, à 15 000 DT pour un détecteur enregistreur collecteur de données qui peut également enregistrer des mesures de température, de bruit, de vitesse de rotation et de débit de fuite.

III. 2. 3. 4 L'analyse d'huile

L'analyse d'huiles est d'une importance primordiale dans tout programme de maintenance des machines industrielles. La mise en œuvre de cette analyse est simple et presque tous les mécanismes lubrifiés sont susceptibles d'être sujets à ce diagnostic. L'huile est en contact permanent avec les pièces en mouvement. Elle fournit de nombreuses informations sur l'état de la machine. Lorsque l'équipement est mis à rude épreuve, la qualité du lubrifiant s'en ressent.

L'analyse d'huile permet de suivre dans le temps les caractéristiques physico-chimiques du lubrifiant. Cela permet d'apprécier son état de dégradation et donc son aptitude à remplir sa fonction dans la machine.

Les résultats de l'analyse permettent de déceler des anomalies telles que :

- La contamination par des particules internes de l'équipement
- La pollution par des agents extérieurs
- L'usure par abrasion

L'analyse d'huile fait partie des moyens mis en œuvre pour faire la maintenance préventive.

Avec l'analyse vibratoire et la thermographie, elle permet d'éviter les pannes imprévues et les réparations coûteuses.[43]

III. 2. 3. 5 L'analyse acoustique

Permet de détecter tout bruit anormal à l'aide de microphones placés à distance de l'équipement.

	Principaux avantages	Principales limitations	Champs d'applications privilégié
Analyse vibratoire	<ul style="list-style-type: none"> - Détection de défauts à un stade précoce. - Possibilités de réaliser un diagnostic approfondi. - Autorise une surveillance continue. - Permet de surveiller l'équipement à distance (télémaintenance). 	<ul style="list-style-type: none"> - Spectres parfois difficiles à interpréter. - Dans le cas de la surveillance continue, installations relativement coûteuses. 	<ul style="list-style-type: none"> - Détection des défauts de tous les organes cinématiques de la machine (balourd, défauts d'alignement, jeux, etc..) et de sa structure.
Analyse d'huile	<ul style="list-style-type: none"> - Détection d'une pollution normale du lubrifiant, avant que celle-ci n'entraîne une usure ou un échauffement. - Possibilités de connaître l'origine de l'anomalie par analyse des particules. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ne permet pas de localiser précisément le défaut. - Nécessite de prendre de nombreuses précautions dans le prélèvement de l'échantillon. 	<ul style="list-style-type: none"> - Contrôle des propriétés physico-chimiques du lubrifiant, détection d'un manque de lubrifiant, analyse des éléments d'usure.
Thermographie IR	<ul style="list-style-type: none"> - Permet de réaliser un contrôle rapide de l'installation. - Interprétation souvent immédiate des résultats. 	<ul style="list-style-type: none"> - Détection de défauts à un stade moins précoce que l'analyse vibratoire. - Contrôle limité à ce que « voit » la caméra (échauffements de surface). - Ne permet pas de réaliser un diagnostic approfondi. 	<ul style="list-style-type: none"> - Détection de tous les défauts engendrant un échauffement (manque de lubrification en particulier).

Analyse acoustique	<ul style="list-style-type: none"> - Permet de détecter l'apparition des défauts l'apparition des défauts audibles. - Autorise une surveillance continue. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensibilité au bruit ambiant. - Diagnostic souvent difficile à réaliser. - Problèmes de répétabilité des mesures. 	<ul style="list-style-type: none"> - Détection d'un bruit inhabituel pouvant ensuite être analysé par analyse vibratoire.
---------------------------	---	---	--

Tableau III-1 : Différentes techniques d'analyse de l'état d'une machine tournante. [38]

III. 2. 4 Méthodes basées sur la redondance analytique (mathématique)

Afin de détecter et d'isoler les défauts d'un système, une certaine redondance d'information est nécessaire. Cette redondance est utilisée dans le but d'établir les tests de consistance entre les variables couplées du système. Elle constitue une source de bon et de mauvais fonctionnement. La redondance matérielle fût la première technique de redondance utilisée pour la détection et la localisation des défauts capteurs, essentiellement dans les applications nécessitant un niveau élevé de sécurité. Par ailleurs, cette technique présente de nombreux inconvénients et contraintes majeurs.

La redondance analytique, elle, présente une alternative intéressante à la redondance matérielle. Le problème de génération des relations de redondance analytique a fait l'objet de très nombreux travaux. La redondance d'information dans ce cas est assurée par un modèle du système ou une base de données à la place du matériel additionnel. La redondance analytique, c'est l'exploitation des relations entre les grandeurs mesurées ou estimées. Les méthodes développées à partir de ce concept sont communément appelées à base de modèles, à base de connaissances et de traitement du signal.[42]

Cette méthode est divisée en deux catégories :

- **Les méthodes sans modèles** : qui sont des méthodes soit à base de connaissances, soit des méthodes empiriques et/ou de traitement du signal.
- **Les méthodes à base de modèles** : basées sur des modèles quantitatifs et/ou qualitatifs.

III. 2. 4. 1 Les méthodes sans modèles :

Dans certaines applications industrielles, il est difficile, voire impossible, d'obtenir le modèle du système. Cette difficulté est justifiée par la complexité accrue ou à de nombreuses reconfigurations intervenantes durant le processus de production. En effet, seules les

méthodes de surveillance sans modèles sont opérationnelles pour ce type d'applications industrielles. Ces méthodes de diagnostic se basent sur des informations issues d'une expérience préalable, sur des règles heuristiques ou encore sur des exemples de résolution.[43]

III. 2. 4. 2 Les méthodes à base de modèles :

Le diagnostic à base de modèles génère des indicateurs de défauts, résidus, contenant des informations sur les anomalies ou les dysfonctionnements du procédé à diagnostiquer. Un écart entre l'état réel du système et celui estimé par le modèle, représentant le fonctionnement nominal, est mesuré. Les résidus doivent alors être assez sensibles aux défauts pour leur détection, localisation et identification.

Parmi les méthodes à base de modèles, on peut distinguer les méthodes basées sur des modèles qualitatifs et les méthodes basées sur des modèles quantitatifs.

a) Les méthodes à base de modèles qualitatifs

Permettent de représenter le comportement du procédé à travers des modèles non plus mathématiques mais des modèles de type symbolique. Les modèles qualitatifs doivent représenter de manière qualitative des systèmes continus, discrets et/ou hybrides pour que le diagnostic soit capable de détecter les déviations à fonctionnement normal, localiser la défaillance et en déterminer la ou les causes. Pour les systèmes continus, les modèles qualitatifs sont fréquemment basés sur des graphes causaux et ou des graphes causaux temporels. Pour les systèmes à un événement discret, de nombreuses approches sont proposées utilisant des outils tels que les automates, les équations logiques ou les RdP (réseaux de Pétri) avec observation partielle ou totale du fonctionnement du procédé.

b) Les modèles quantitatifs

Sont utilisés pour l'estimation de paramètres, d'état ou d'espace de parité à travers des modèles mathématiques et/ou structurels pour représenter l'information disponible du fonctionnement d'un procédé. Un défaut provoque alors des changements dans certains paramètres physiques du procédé. Les modèles mathématiques comparent les différentes valeurs des variables avec des seuils de détection afin de générer un résidu qui sera fourni au diagnostic. A partir de toutes les signatures de défauts connues par apprentissage, il est possible d'isoler et d'identifier la panne avant de prendre une décision.

Voici un organigramme récapitulatif de différents types de méthodes basées sur la redondance analytique.

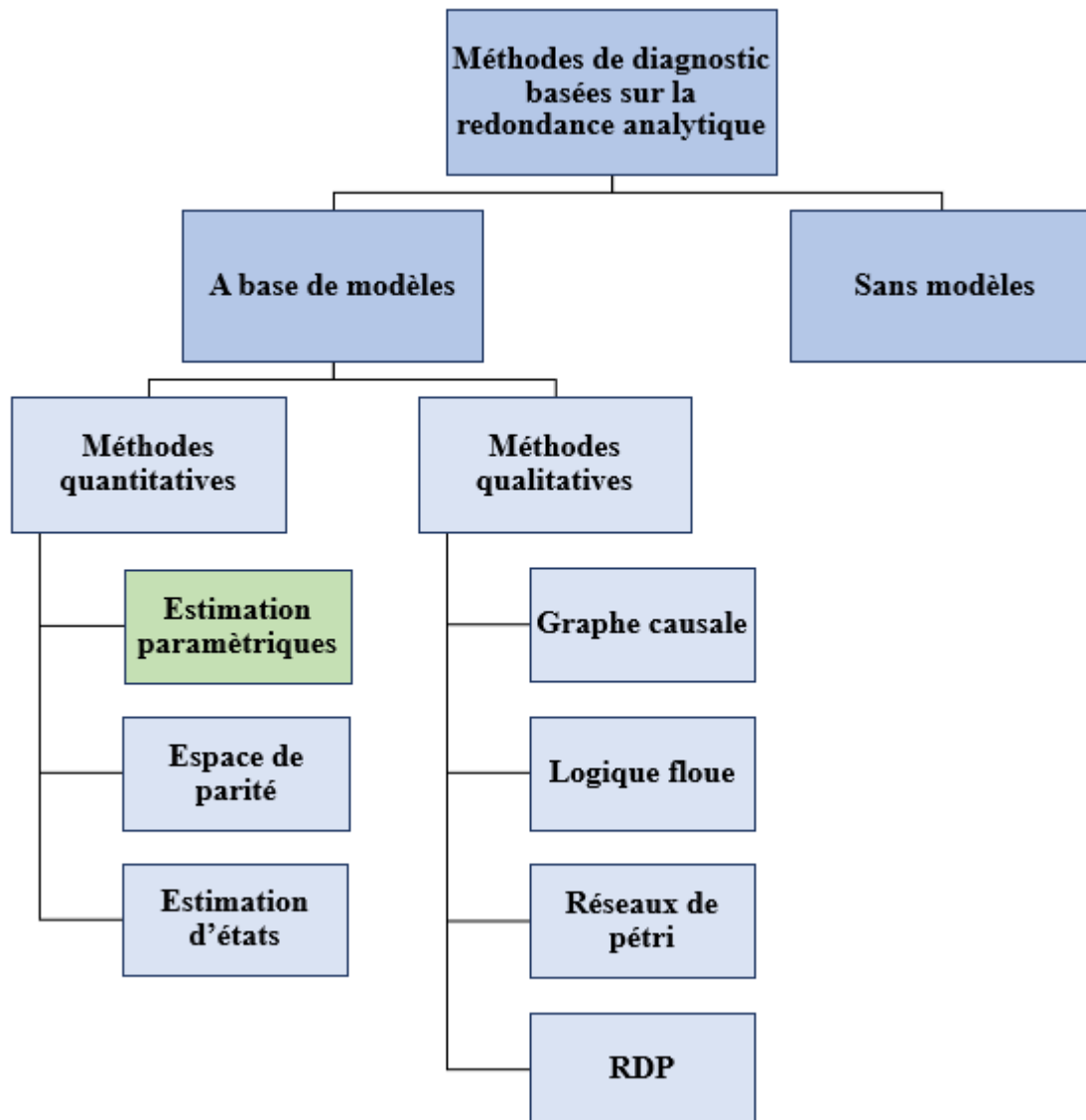


Figure III-5: Les différents types de méthodes basées sur la redondance analytique.[43]

III. 3 Estimation paramétrique et Machine Learning

La méthode d'estimation paramétrique suppose l'existence d'un modèle paramétrique décrivant le comportement du système et que les valeurs de ces paramètres en fonctionnement nominal soient connues. Elle consiste alors à identifier les paramètres caractérisant le fonctionnement réel, à partir de mesures des entrées et des sorties du système (Willsky, 1976). Pour détecter l'apparition de défaillances dans le système, il faut effectuer la comparaison entre les paramètres estimés et les paramètres théoriques.[43]

III. 3. 1 Diagnostic de défauts par estimation paramétrique

L'apparition d'un défaut dans une installation industrielle a pour effet de perturber son fonctionnement. Par conséquent, ses paramètres caractéristiques sont directement affectés, ce qui se traduit par la variation d'un (ou plusieurs) d'entre eux. Dès lors, le suivi de son évolution paramétrique par un algorithme d'identification, soit hors ligne, soit de manière récursive, permet de détecter toute dérive paramétrique, signe alors de l'apparition d'un dysfonctionnement dans le processus. En fait, une variation des paramètres d'un processus n'est pas due uniquement à l'apparition d'un défaut. Un changement normal dans l'état du processus ou une variation dans son mode de fonctionnement sont autant de phénomènes susceptibles de faire varier les paramètres du système. Par conséquent, cette méthodologie de base n'est pas capable de distinguer une variation paramétrique normale, éventuellement prévisible, de celle qui correspond à un défaut d'apparition aléatoire. Cela est dû au fait que pour pouvoir estimer des paramètres, il faut d'abord définir un modèle : le premier réflexe est en effet d'utiliser le modèle de fonctionnement normal du système. Or, justement, un défaut a tendance à modifier ce modèle, allant dans certains cas jusqu'à modifier sa structure en introduisant une erreur de modélisation. Il devient donc nécessaire d'affiner la modélisation par l'utilisation de modèles mieux adaptés à la description des défauts. Nous allons donc proposer une méthodologie basée sur :

- l'établissement de modèles réellement représentatifs de la signature du défaut envisagé
- l'estimation paramétrique avec information a priori correspondant à l'expertise de l'utilisateur sur le fonctionnement sain du système.[44]

III. 3. 2 Machine Learning

Le Machine Learning ou apprentissage automatique est un domaine scientifique, et plus particulièrement une sous-catégorie de l'intelligence artificielle. Elle consiste à laisser des algorithmes découvrir des « patterns », à savoir des motifs récurrents, dans les ensembles de données. Ces données peuvent être des chiffres, des mots, des images, des statistiques...

Tout ce qui peut être stocké numériquement peut servir de données pour le Machine Learning. En décelant les patterns dans ces données, les algorithmes apprennent et améliorent leurs performances dans l'exécution d'une tâche spécifique.

Pour résumer, les algorithmes de Machine Learning apprennent de manière autonome à effectuer une tâche ou à réaliser des prédictions à partir de données et améliorent leurs

performances au fil du temps. Une fois entraîné, l'algorithme pourra retrouver les patterns dans de nouvelles données.

Il existe une large variété d'algorithmes de Machine Learning. Certains sont toutefois plus couramment utilisés que d'autres. Tout d'abord, différents algorithmes sont utilisés pour les données étiquetées.

Les algorithmes de régression, linéaire ou logistique, permettent de comprendre les relations entre les données. La régression linéaire est utilisée pour prédire la valeur d'une variable dépendante base sur la valeur d'une variable indépendante.

La **régression logistique** est quant à elle utilisée quand les variables dépendantes sont binaires. Un autre type d'algorithme de régression appelé machine à vecteur de support est pertinent quand les variables dépendantes sont plus difficiles à classifier.

Un autre algorithme ML populaire est **l'arbre de décision**. Cet algorithme permet d'établir des recommandations basées sur un ensemble de règles de décisions en se basant sur des données classifiées.

Partie 2 : Les types de défauts les plus courants des pompes centrifuges

On rencontre dans l'utilisation des pompes centrifuges plusieurs types de problèmes qui sont dus à des causes multiples. Cette partie illustre les défauts les plus fréquemment rencontrés.

III. 1 Le phénomène de cavitation

(Du latin cavus qui signifie trou), c'est un terme employé pour décrire le phénomène de cavitation.

La cavitation est un phénomène qui concerne généralement les installations, notamment les machines hydrauliques comme les pompes, et se produit quand la pression à l'intérieur du circuit est égale ou baisse au-dessous de la pression de vapeur du fluide déplacé.

La cavitation est une vaporisation instantanée du fluide, localisée essentiellement dans les zones où la pression absolue est très basse, suivie d'une rapide recondensations.

Les bulles qui se forment, au moment où elles éclatent, créent des micro-jets à hautes pressions s'accompagnant d'une érosion des composants mécaniques atteints.

Les zones principalement concernées sont les parties où le fluide est en contact avec les surfaces solides des pompes (turbine et corps) ou celles où le fluide est en contact avec de petites particules en suspension ; la cavitation se manifeste par de sensibles claquements et vibrations.

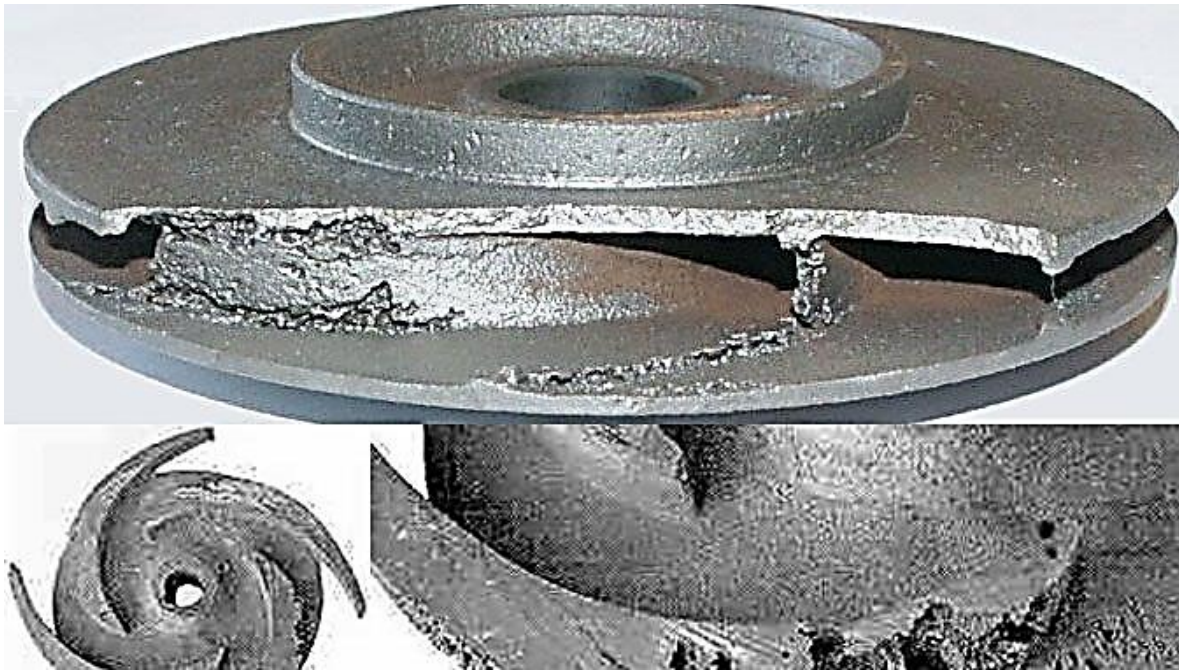


Figure III-6 : Roue à aubes soumise à la cavitation [45]

a) Effets de la cavitation sur les pompes

Concrètement, la cavitation entraîne une série de dommages en cascade :

- Érosion des composants mécaniques en contact direct avec le fluide
- Baisse du rendement, dû aux tourbillons qui se forment en raison de l'irrégularité de la surface
- Vibrations excessives causées par le déséquilibre du poids et par la haute vitesse de rotation de la turbine
- Diminution de la durée de vie utile de la pompe/du circuit due à une usure précoce des organes mécaniques (ex. roulements, joints d'étanchéité...)
- Rupture

b) Eviter la cavitation

Pour éviter la cavitation, vous devez d'abord comprendre la Hauteur d'aspiration nette positive (NPSH). Elle est utilisée comme limite de sécurité de pression d'aspiration, afin d'empêcher la cavitation. La valeur de la NPSH doit être ajoutée à la hauteur d'aspiration et à la perte de charge dans la tuyauterie d'aspiration. Leur somme doit être inférieure à la pression vapeur. En cas de risque de cavitation,

Il existe plusieurs approches pratiques pour l'éviter :

- Réduire l'aspiration de la pompe et augmenter la pression d'aspiration.
- Réduire la perte de charge dans la tuyauterie d'aspiration.
- Réduire le débit de la pompe.
- Augmenter la hauteur d'aspiration.
- Si le phénomène persiste, choisissez une autre pompe.[46]

III. 2 N.P.S.H (Net Positive Suction Head) ou hauteur de charge nette absolue

La différence entre la pression d'aspiration et le niveau de pression le plus faible dans la pompe est appelée NPSH : Hauteur d'aspiration positive nette. La NPSH est donc une expression de la perte de charge qui se produit à l'intérieur de la première partie du corps de pompe.

La pression à l'intérieur d'une pompe varie de l'entrée du côté aspiration à l'orifice de refoulement. Dans la première partie de la pompe, la pression diminue avant d'augmenter du côté refoulement pour atteindre un niveau supérieur à la pression d'aspiration.

La NPSH entraîne une baisse de la pression à l'intérieur de la pompe en dessous de la pression d'évaporation du liquide pompé, si la pression d'aspiration est trop faible. Par conséquent, la cavitation se produit dans la pompe, provoquant du bruit et entraînant des pannes.

Le NPSH peut être donné soit sous la forme $NPSH_r$ (requis), soit sous la forme $NPSH_a$ (disponible).

III. 2. 1 $NPSH_r$

La $NPSH_r$ (hauteur d'aspiration positive nette requise) est fournie dans les caractéristiques de toutes les pompes. La $NPSH_r$ indique la pression d'aspiration la plus basse requise par la pompe spécifique à un débit donné pour éviter la cavitation.[10]

III. 2. 2 $NPSH_a$

Le $NPSH_a$ (available) disponible (la hauteur d'aspiration disponible dans l'installation) est, par définition, la valeur de la pression absolue mesurée sur l'axe de la bride d'aspiration de la pompe, compte tenu des dispositions prises à l'aspiration (diamètre de

conduit, présence coudes...). Afin que les conditions d'aspiration définies par l'utilisateur (NPSH disponible) soient toujours satisfaites par la pompe, il faudra que le NPSH disponible soit toujours supérieur au $NPSH_r$ (de quelques décimètres). [10]

$$NPSH_a > NPSH_r \quad (\text{III. 1})$$

III. 3 Coup de bélier

Le coup de bélier est un phénomène de surpression qui se manifeste lors de la variation soudaine de la vitesse d'un fluide dans un réseau de canalisation. Il se produit par exemple au moment de la fermeture rapide d'une vanne ou d'un robinet, ou lors de l'arrêt d'une pompe. Lors de la fermeture d'un robinet, l'inertie de l'eau en mouvement est subitement freinée. Cela génère une pression élevée ainsi qu'une onde de choc. Cette onde de surpression qui parcourt la tuyauterie se traduit alors par des vibrations et un bruit sourd, rappelant le son d'un coup de marteau. [47]

III. 4 Usure

L'usure d'un solide est généralement définie comme une perte de matière, un mouvement de matière ou une transformation de matière en surface du solide sous l'effet d'une interaction avec un autre milieu (solide mais ça peut également être un fluide).

L'usure des pompes centrifuges est un problème courant qui se réfère à la détérioration progressive des composants internes d'une pompe centrifuge due à l'action de forces mécaniques, de particules abrasives dans le fluide pompé, de la corrosion chimique, de la cavitation, de l'érosion ou d'autres facteurs. Cette usure peut entraîner une diminution de l'efficacité de la pompe, des fuites, une augmentation de la consommation d'énergie et éventuellement la défaillance de la pompe si elle n'est pas détectée et traitée à temps. [48]

Voici quelques-unes des principales causes d'usure dans les pompes centrifuges :

III. 4. 1 La corrosion

L'usure par corrosion d'un matériau est une dégradation de type chimique. Elle se traduit par une perte de matière en surface suite à une réaction chimique entre le métal et son environnement (pression, température, gaz polluants...).

L'exposition à des produits chimiques corrosifs ou à de l'eau salée peut entraîner la corrosion des surfaces métalliques de la pompe. Cela affaiblit les composants et peut provoquer des fuites

III. 4. 2 L'érosion

L'érosion est une altération physique générée par des agents atmosphériques. L'usure par érosion est due aux impacts des liquides à haute vitesse ou contenant des particules solides en mouvement ou par des particules liquides en milieux gazeux. Peuvent provoquer une usure par érosion des composants de la pompe. Cela se produit souvent dans les applications de pompage de boues.

III. 4. 3 L'abrasion

L'usure par abrasion se produit lorsque des aspérités d'une surface rugueuse et dure ou des particules dures glissent sur une surface plus douce et endommagent l'interface par déformation plastique ou fracture.

Cela se produit lorsque des particules solides abrasives sont présentes dans le fluide pompé. Ces particules peuvent éroder les composants internes de la pompe, tels que l'impulseur, le boîtier et les garnitures, provoquant ainsi une usure prématurée.[48]

III. 5 Désalignement

Si l'arbre de pompe et l'arbre de moteur sont des éléments séparés, ceux-ci sont reliés par un accouplement. Idéalement, ces deux arbres sont strictement parallèles et leurs axes sont parfaitement alignés. Les accouplements flexibles peuvent tolérer de petits défauts d'alignement, mais un fonctionnement tranquille et sans problème requiert un alignement dans les plages de tolérances spécifiées par les fabricants de pompe, de moteur et d'accouplement.

Il existe deux types de défauts d'alignement qui peuvent entraîner des dysfonctionnements.

Un déport angulaire se produit lorsque l'axe de l'arbre moteur et celui de l'arbre pompe forment un angle.

Un déport parallèle se produit lorsque les extrémités des arbres sont parallèles, mais que leurs axes sont décalés en hauteur (vers le haut ou vers le bas)

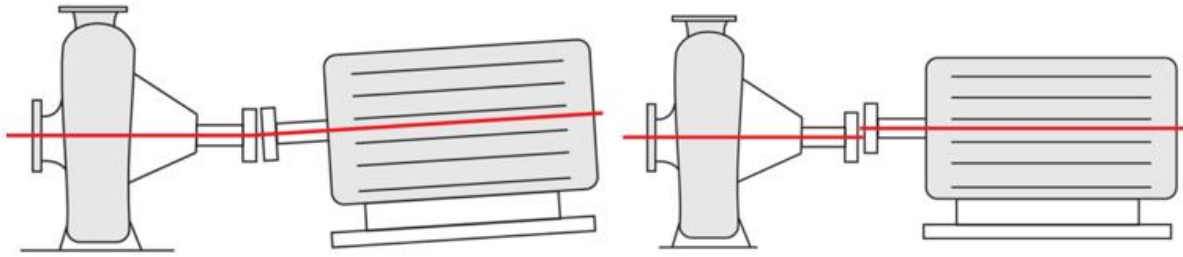


Figure III-7:Déport angulaire /Déport parallèle

Le bon alignement de la pompe et de la machine d'entraînement est primordial. Le défaut d'alignement est à l'origine de plus de 50 % des dysfonctionnements des machines tournantes, ce qui peut entraîner la rupture ou l'usure des accouplements, des vibrations et l'usure excessive des paliers, des joints d'étanchéité et des bagues d'usure. Un désalignement excessif peut même provoquer la rupture des supports, des corps de pompe ou des carcasses de moteur.[28]

III. 6 Le fonctionnement à sec

Le fonctionnement à sec des pompes centrifuges se réfère à la condition dans laquelle une pompe centrifuge fonctionne sans avoir suffisamment de liquide ou de fluide à pomper. En d'autres termes, la pompe tourne alors qu'il n'y a pas assez de liquide dans le système pour qu'elle puisse fonctionner normalement. Cela peut se produire pour diverses raisons, notamment un niveau de liquide insuffisant dans le réservoir, un arrêt incorrect de la pompe ou un problème de fourniture de liquide.

Le fonctionnement à sec est généralement une situation indésirable pour les pompes centrifuges, car cela peut entraîner plusieurs problèmes graves, notamment la cavitation, la surchauffe, l'usure prématurée des composants internes et la diminution de l'efficacité de la pompe. La cavitation, en particulier, est un phénomène courant dans le fonctionnement à sec, où la baisse de pression provoque la formation de bulles de vapeur dans le liquide, et lorsque ces bulles éclatent, elles peuvent endommager les composants de la pompe.[28]

III. 7 Dépôts de matière organique

Les dépôts dans une pompe centrifuge peuvent être causés par différentes raisons, notamment des matières organiques présentes dans le fluide pompé ou des réactions chimiques qui se produisent à l'intérieur de la pompe. Voici les causes et les conséquences des dépôts dans une pompe centrifuge :

III. 7. 1 Causes des dépôts :

Matières organiques : Si le fluide pompé contient des matières organiques en suspension, telles que des particules de saleté, des algues ou des débris végétaux, celles-ci peuvent s'accumuler à l'intérieur de la pompe au fil du temps.

Réactions chimiques : Certains fluides transportent des produits chimiques ou des substances réactives qui peuvent réagir avec les matériaux de la pompe. Ces réactions chimiques peuvent entraîner la formation de dépôts solides.

III. 7. 2 Conséquences dépôts :

Réduction de l'efficacité : Les dépôts sur les pales du rotor ou dans les passages de la pompe peuvent perturber le flux du liquide. Cela peut réduire l'efficacité de la pompe, nécessitant davantage d'énergie pour maintenir le débit souhaité.

Augmentation de la température : Les dépôts peuvent agir comme un isolant thermique, empêchant la dissipation efficace de la chaleur générée pendant le fonctionnement de la pompe. Cela peut entraîner une augmentation de la température à l'intérieur de la pompe, ce qui peut endommager les composants et réduire leur durée de vie.

Réduction de la capacité : Les dépôts peuvent réduire la capacité de la pompe à déplacer un volume donné de liquide. Cela peut entraîner une diminution du débit de la pompe, affectant ainsi la performance globale du système.[49]

III. 8 Les impacts de défauts sur les composants de la pompe centrifuge

Le tableau ci-dessous répertorie les types de défauts les plus courants et les composants affectés ainsi que leurs conséquences.

Défauts	Composants Affectés	Conséquences
Cavitation	Impulseur Diffuseur Tuyauterie	<ul style="list-style-type: none"> - Endommagement de l'impulseur et du diffuseur. - Réduction de l'efficacité hydraulique. - Bruit excessif. - Possibilité de vibrations et d'endommagement de la pompe.
Coup de bélier	Tuyauterie Soupape de décharge	<ul style="list-style-type: none"> - Contraintes mécaniques sur la tuyauterie. - Possibilité de rupture de tuyau ou de composants. - Impact sur la durée de vie de la pompe.
L'usure	Garniture mécanique Paliers Impulseur Diffuseur Tuyauterie	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction de l'efficacité hydraulique. - Fuite de liquide. - Augmentation des coûts de maintenance. - Risque de panne.
Désalignement	Garniture mécanique Paliers Impulseur	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction de l'efficacité hydraulique. - Fuite de liquide. - Augmentation des coûts

		de maintenance. - Risque de panne.
Fonctionnement à sec	Garniture mécanique Paliers Impulseur	- Surchauffe de la pompe. - Usure prématurée des composants. - Possibilité de défaillance mécanique. - Réduction de la durée de vie.
Dépôts	Pales de l'impulseur Passages de la pompe	- Réduction de l'efficacité hydraulique. - Augmentation de la température. - Réduction de la capacité de la pompe.

Tableau III-2 : les types de défauts les plus courants et les composants affectés ainsi que leurs conséquences.[49]

Conclusion

Nous avons identifié les principaux défauts auxquels les pompes centrifuges sont susceptibles de faire face, en mettant en évidence l'importance de la prévention pour éviter les pannes coûteuses et les temps d'arrêt imprévus. Nous avons également examiné les méthodes de diagnostic des pannes, allant des techniques de surveillance aux approches analytiques avancées

Chapitre IV ETUDE ET SIMULATION

IV. 1 Introduction

L'apparition d'un défaut dans une installation industrielle a pour effet de perturber son fonctionnement. Par conséquent, ses paramètres caractéristiques sont directement affectés, ce qui se traduit par la variation d'un (ou plusieurs) d'entre eux.

Dans ce chapitre nous étudions une méthode de diagnostic qui consiste alors à identifier les paramètres caractérisant le fonctionnement réel, à partir de mesures des entrées et des sorties du système (estimation paramétrique). Pour automatiser le diagnostic des défauts on utilise des algorithmes d'apprentissage automatique telle que linearfit, les tests de vraisemblances, SVM, Treebagger. Ces algorithmes d'apprentissages nous permettent d'estimer les paramètres et détecter les anomalies de systèmes.

Les pompes centrifuges, machines largement utilisées dans diverses industries pour augmenter la pression et le débit des liquides en exploitant la force centrifuge générée par la rotation de leur rotor dans une enveloppe, jouent un rôle essentiel. Leur efficacité énergétique et leur capacité à gérer une variété de liquides en font des choix judicieux. Cependant, ces appareils ne sont pas à l'abri de défaillances. La science du diagnostic intervient ici, offrant une stratégie précieuse pour minimiser les coûts de remplacement et les temps d'arrêt grâce à la détection précoce des problèmes.

Une stratégie de diagnostic bien conçue représente un atout précieux pour les opérations industrielles, permettant des économies considérables.

Le diagnostic des pannes des pompes centrifuges par estimation paramétrique est une approche sophistiquée. Elle repose sur la modélisation mathématique, l'estimation des paramètres et la comparaison avec des valeurs de référence pour identifier et isoler les problèmes. Cette méthode avancée contribue au maintien de la fiabilité des équipements industriels, soutenant ainsi l'efficacité des opérations tout en réduisant les coûts.

IV. 2 Etude de cas

Le diagnostic des pannes des pompes centrifuges par estimation paramétrique est une approche sophistiquée et précise qui repose sur l'estimation des paramètres du modèle de la pompe en utilisant des mesures provenant de son fonctionnement normal. Voici comment cela fonctionne :

Collecte de données : Tout d'abord, il est essentiel de collecter des données provenant de la pompe en fonctionnement normal (nominal). Ces données comprennent généralement des mesures de la vitesse de la pompe, du débit, de la pression, du couple, etc. (voir annexe 1)

Modélisation paramétrique : Un modèle mathématique de la pompe est développé, décrivant son comportement en fonctionnement nominal. Ce modèle repose sur des paramètres tels que les caractéristiques de la pompe, les coefficients de performance, etc.

Estimation des paramètres : Les données collectées sont utilisées pour estimer les valeurs des paramètres du modèle. Cela signifie que l'on cherche à trouver les valeurs optimales de ces paramètres qui correspondent au mieux au comportement réel de la pompe en fonctionnement nominal. Les techniques d'optimisation sont souvent utilisées pour effectuer ces estimations.

Comparaison avec les valeurs nominales : Une fois que les paramètres sont estimés, ils sont comparés aux valeurs nominales attendues. Des écarts significatifs entre les valeurs estimées et les valeurs nominales peuvent indiquer la présence d'une défaillance ou d'une anomalie dans la pompe.

Détection des pannes : Si des écarts importants sont détectés, le système peut déclencher une alerte pour indiquer qu'une panne ou une défaillance est probable. Les types de pannes qui peuvent être détectés dépendent des paramètres du modèle et des données mesurées.

Isolation des pannes : Une étape importante est d'essayer d'isoler la source de la panne. Cela peut être plus complexe car de nombreuses pannes peuvent générer des comportements similaires. Des techniques de diagnostic plus avancées peuvent être nécessaires, par exemple l'utilisation d'algorithmes de classification pour identifier le type spécifique de panne.

Prise de décision et action corrective : Une fois la panne diagnostiquée et isolée, des mesures correctives peuvent être prises. Cela peut inclure la réparation ou le remplacement des composants défectueux de la pompe.

IV. 3 Résultats et discussions

IV. 3. 1 Analyse des défauts par estimation des paramètres

Les données sont obtenue grâce à une pratique courante pour l'étalonnage et la supervision d'une pompe. Cette pratique consiste à faire fonctionner la pompe à une vitesse constante (2900 tr /min) et à enregistrer la hauteur de refoulement de la pompe, le débit de refoulement du fluide et le couple pompe. En modifiant la position de la vanne dans le système de tuyauterie, le volume de refoulement du fluide (GPM) est régulé.

L'objectif de cette procédure est de recueillir des données précises sur la relation entre le débit de fluide, la hauteur de refoulement, le couple et des paramètres critiques pour évaluer la performance d'une pompe. Ces caractéristiques sont celles d'une pompe saine (les valeurs nominales fournies par le fabricant).

Les caractéristiques de hauteur de refoulement mesurées de la pompe peuvent être comparées aux valeurs fournies par le fabricant. Toute différence indique la possibilité d'un défaut.

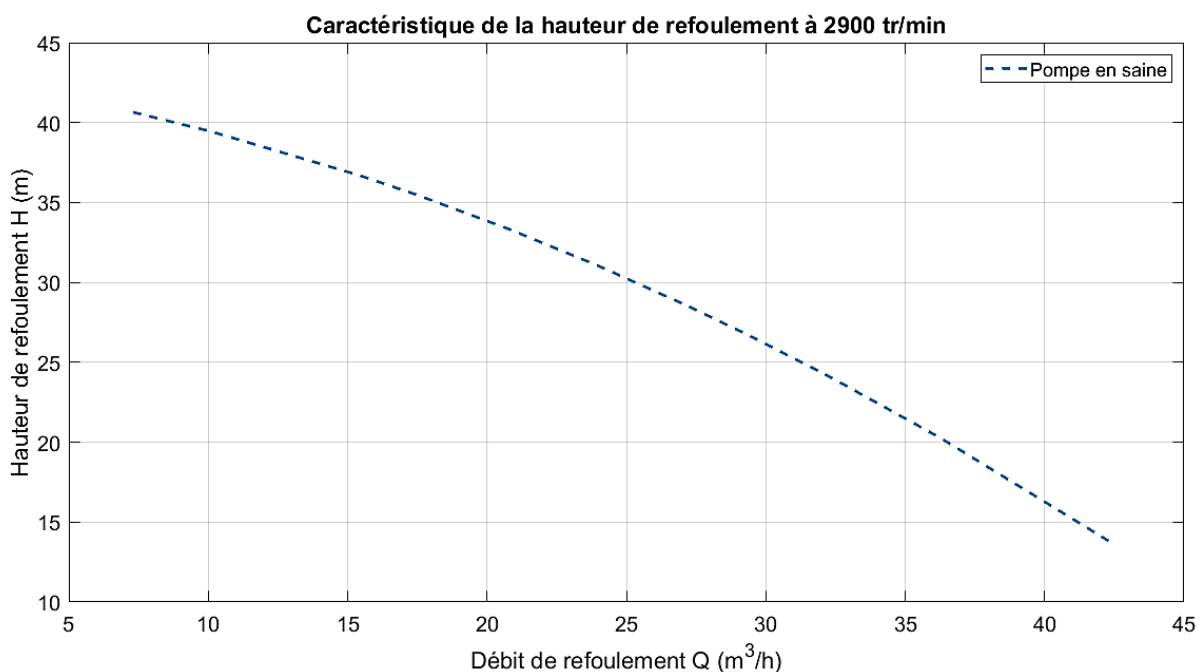


Figure IV-1 : Les caractéristiques de la hauteur de refoulement de la pompe(saine).

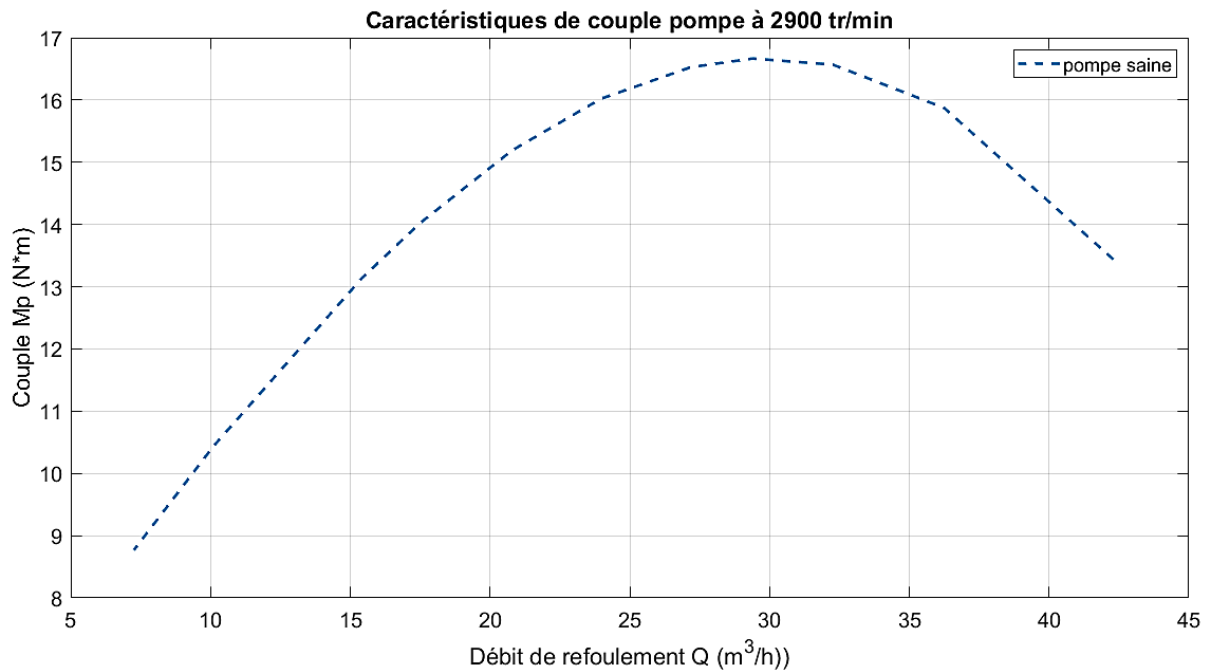


Figure IV-2 : Les caractéristiques de couple de la pompe (saine).

Figure IV-1 : Le graphe représente les caractéristiques de la hauteur de refoulement (H) de la pompe en fonction du débit de refoulement (Q). L'axe des abscisses (horizontal) représente le débit de refoulement (Q) en mètres cubes par heure (m³/h). L'axe des ordonnées (vertical) représente la hauteur de refoulement (H). La ligne en pointillés représente les caractéristiques de la pompe en bon état de fonctionnement (saine) en utilisant les données fournis par le fabricant.

Figure IV-2 : Le graphe représente les caractéristiques du couple (Mp) de la pompe en fonction du débit de refoulement (Q) pour une pompe saine à une vitesse nominale de 2900 (tr/min). L'axe des abscisses (horizontal) représente le débit de refoulement (Q) en mètres cubes par heure (m³/h). L'axe des ordonnées (vertical) représente le couple de la pompe (M). La ligne en pointillés représente la caractéristique du couple pour une pompe saine, telle que fournie par le fabricant.

Une augmentation du débit (Q) entraîne une diminution de la hauteur manométrique (H) de la pompe. Cela signifie que lorsque le débit augmente, la pompe est capable de fournir moins de pression. Ce comportement est typique des pompes centrifuges.

Le graphique montre une relation non linéaire entre le couple de la pompe et le débit de refoulement, soulignant que la pompe ne réagit pas linéairement aux changements de débit.

En conclusion, ces graphiques sont essentiels pour l'analyse de la performance des pompes centrifuges. Ils permettent de surveiller le fonctionnement optimal, de détecter les

anomalies et de déterminer les limites de fonctionnement. Ils sont précieux pour garantir que les pompes fonctionnent de manière efficace, fiable et sûre dans diverses applications industrielles.

IV. 3. 1. 1 Défauts de bague d'usure

La bague d'usure est l'une des pièces de rechange les plus fréquemment changées d'une pompe centrifuge. L'efficacité des bagues dépend de la valeur du jeu.

Un jeu trop important augmente le débit de fuite entre la sortie de la roue et le coté aspiration réduit considérablement l'efficacité de la pompe, Plusieurs expériences ont été menées avec différentes bagues (bague avec un jeu important et une bague avec un jeu faible).

Les mesures de vitesse, de couple et de débit ont été recueillies pour les pompes affectées par le défaut qui se situe au niveau de la bague d'usure.

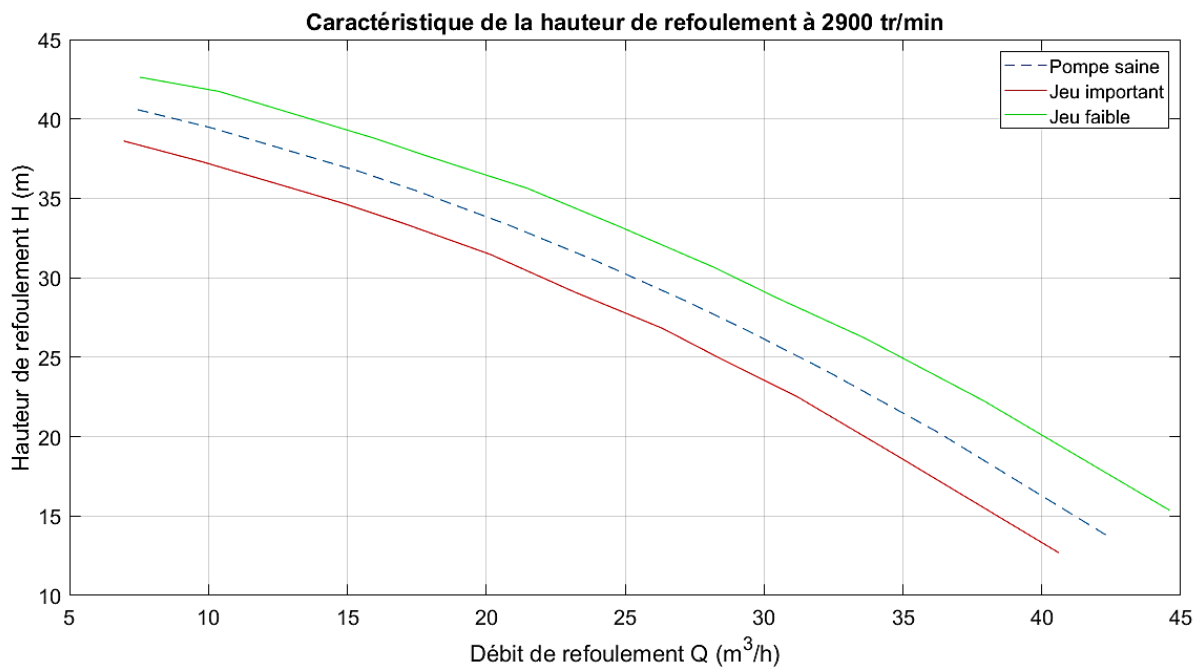


Figure IV-3 : Les caractéristiques de la hauteur de refoulement des pompes avec différents écarts de jeu.

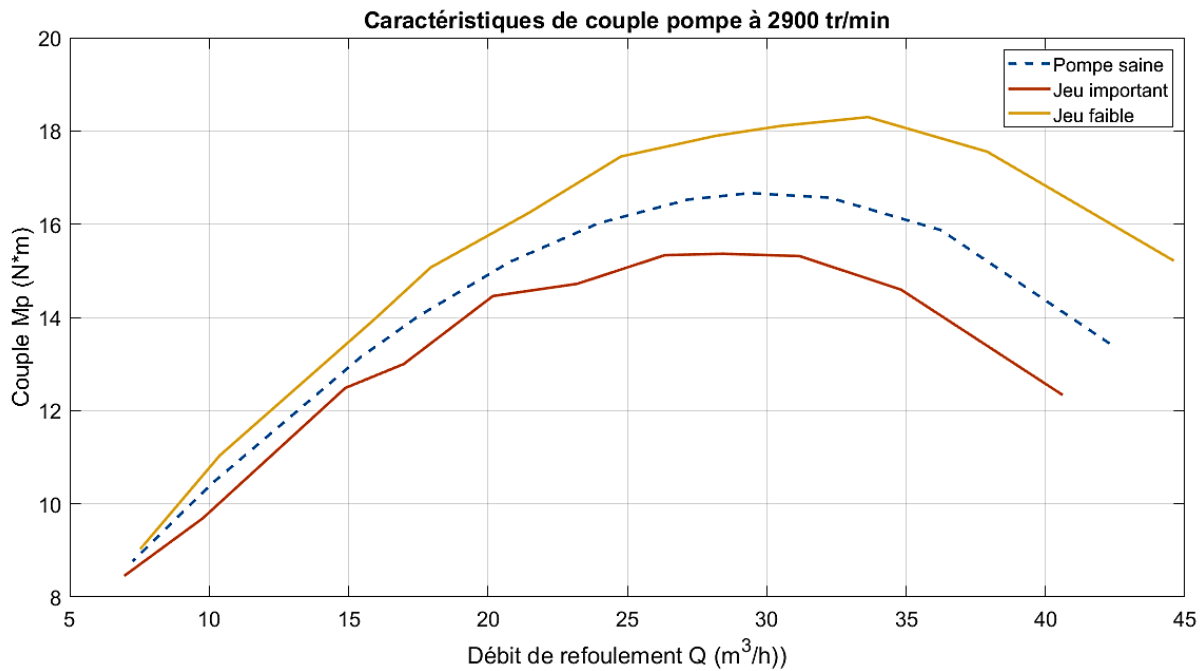


Figure IV-4: Les caractéristiques de couple des pompes avec différents écarts de jeu.

Figure IV-3 : Le graphique représente les caractéristiques de performance de différentes pompes, notamment une pompe saine ainsi que deux pompes présentant des écarts de jeu différents, l'une avec un jeu important et l'autre avec un jeu faible.

En observant ce graphique, plusieurs observations peuvent être faites :

Pompe saine : La courbe bleue en pointillés représente les caractéristiques d'une pompe en bon état de fonctionnement. On peut voir que la hauteur de refoulement diminue de manière relativement linéaire à mesure que le débit de refoulement augmente. C'est une tendance typique pour une pompe centrifuge saine.

Jeu important : La courbe orange représente les caractéristiques d'une pompe avec un jeu important entre ses composants. On peut observer que la courbe présente une perte de rendement significative par rapport à la pompe saine. La hauteur de refoulement diminue plus rapidement à mesure que le débit augmente, ce qui indique une moins bonne performance.

Jeu faible : La courbe verte représente les caractéristiques d'une pompe avec un jeu faible entre ses composants par rapport à la première. Bien qu'elle soit meilleure que la pompe avec un jeu important et la pompe saine un jeu trop faible augmente les risques de contact entre les bagues et le danger de détérioration.

Figure IV-4 : Le graphe représente la caractéristique du couple de la pompe en fonction du débit de refoulement pour différentes conditions. Plus précisément, il montre la relation entre le débit de refoulement (exprimé en mètres cubes par heure m³/h) et le couple moteur (exprimé en newtons-mètres N·m) pour la pompe à une vitesse de 2900 tours par minute (RPM).

La ligne en pointillés représente la caractéristique du couple pour une pompe saine. Les autres courbes représentent les caractéristiques du couple mesurées pour une pompe avec un jeu important et une pompe avec un jeu faible

En conclusion les deux graphiques permettent de comprendre comment les défauts de la bague d'usure affecte les performances de la pompe (hauteur de refoulement, débit et le couple). Les différences entre les courbes indiquent des variations dans les performances de la pompe en fonction de ces défauts.

IV. 3. 2 Analyse préliminaire comparaison des valeurs des paramètres

Pour automatiser le diagnostic des défauts (dans notre cas défaut de la bague d'usure), il faut transformer les changements observés (Figure IV-3, Figure IV-4) en informations quantitatives.

$h_{nn}, h_{nv}, h_{vv}, k_0, k_1, k_2$ sont les paramètres à estimer. Les paramètres seront estimés par la fonction **linearFit (régressions linéaires) pour réaliser des prédictions ou des estimations sur la base de valeur existante.**

LinearFit (ou régressions linéaires) sera exécuter sur les données de trois pompes différentes : une pompe saine, une pompe avec un grand jeu et une pompe avec un petit jeu. Ces ajustements linéaires sont effectués pour obtenir des coefficients qui caractérisent le comportement de chaque pompe en fonction, du débit (Q), de la hauteur manométrique (H), et du couple (M) a vitesse constante =2900RPM.

Les équations mathématiques de ces paramètres $h_{nn}, h_{nv}, h_{vv}, k_0, k_1, k_2$ sont :

$$H \approx h_{nn}\omega^2 - h_{nv}\omega Q - h_{vv}Q^2 \quad (\text{IV-1})$$

$$Mp \approx K_0 \omega Q - K_1 Q^2 + K_2 \omega^2 \quad (\text{IV-2})$$

Les paramètres estimés ($h_{nn}, h_{nv}, h_{vv}, k_0, k_1, k_2$) sont regroupés dans les tableaux ci-dessous (Tableau IV-1) et (Tableau IV-2)

	h_{nn}	h_{nv}	h_{vv}
Pompe saine	5.1164e-06	8.6148e-05	0.010421
Jeu important	4.849e-06	8.362e-05	0.011082
Jeu faible	5.3677e-06	8.4764e-05	0.0094656

Tableau IV-1 : les caractéristiques de la hauteur de refoulement pour différentes pompes.

	k_0	k_1	k_2
Pompe saine	0.00033347	0.016535	2.8212e-07
Jeu important	0.00031571	0.016471	3.0285e-07
Jeu faible	0.00034604	0.015886	2.6669e-07

Tableau IV-2 : Les caractéristiques de couple pour différentes pompes.

Tableau IV-1: Ce tableau représente les caractéristiques de la hauteur de refoulement (h_{nn}, h_{nv}, h_{vv}) pour différentes pompes (pompe saine, pompes avec un faible jeu et un grand jeu). Où chaque ligne représente un différent type de pompe (pompe saine, pompe avec un jeu important, pompe avec un jeu faible) et chaque colonne représente une caractéristique spécifique de la hauteur de refoulement (h_{nn}, h_{nv}, h_{vv}). Ces caractéristiques sont obtenues par la régression linéaire de la courbe hauteur-débit de la Figure IV-3.

Tableau IV-2: Ce tableau représente les caractéristiques de couple pompe (k_0, k_1, k_2) pour différentes pompes (pompe saine, pompes avec un faible jeu et un grand jeu).

Où chaque ligne représente un différent type de pompe (pompe saine, pompe avec un jeu important, pompe avec un jeu faible) et chaque colonne représente une caractéristique spécifique du couple pompe (k_0, k_1, k_2). Ces caractéristiques sont obtenues par la régression linéaire de la courbe couple-débit de Figure IV-4.

Tableau IV-1 et **Tableau IV-2** montrent que les h_{nn} et k_0 diminuent lorsque le jeu est important, tandis qu'elles sont supérieures aux valeurs nominales (valeur de la pompe saine) lorsque le jeu est faible.

En revanche, les valeurs h_{vv} et k_2 augmentent lorsque le jeu est important et diminuent lorsque le jeu est faible. La dépendance de h_{nv} et de k_1 en fonction de jeu est moins claire.

IV. 3. 3 Intégration de l'incertitude

Il est important de noter que même pour les pompes en bon état, il existe des variations dans les mesures en raison de divers facteurs tels que le bruit de mesure, la contamination du fluide, les changements de viscosité et les caractéristiques de couple de glissement du moteur.

Pour mieux visualiser ces variations, 5 séries de mesures ont été collectées d'une pompe fonctionnant sans défaut en la faisant tourner à 2900 tr/min pour 10 positions de la vanne de refoulement.

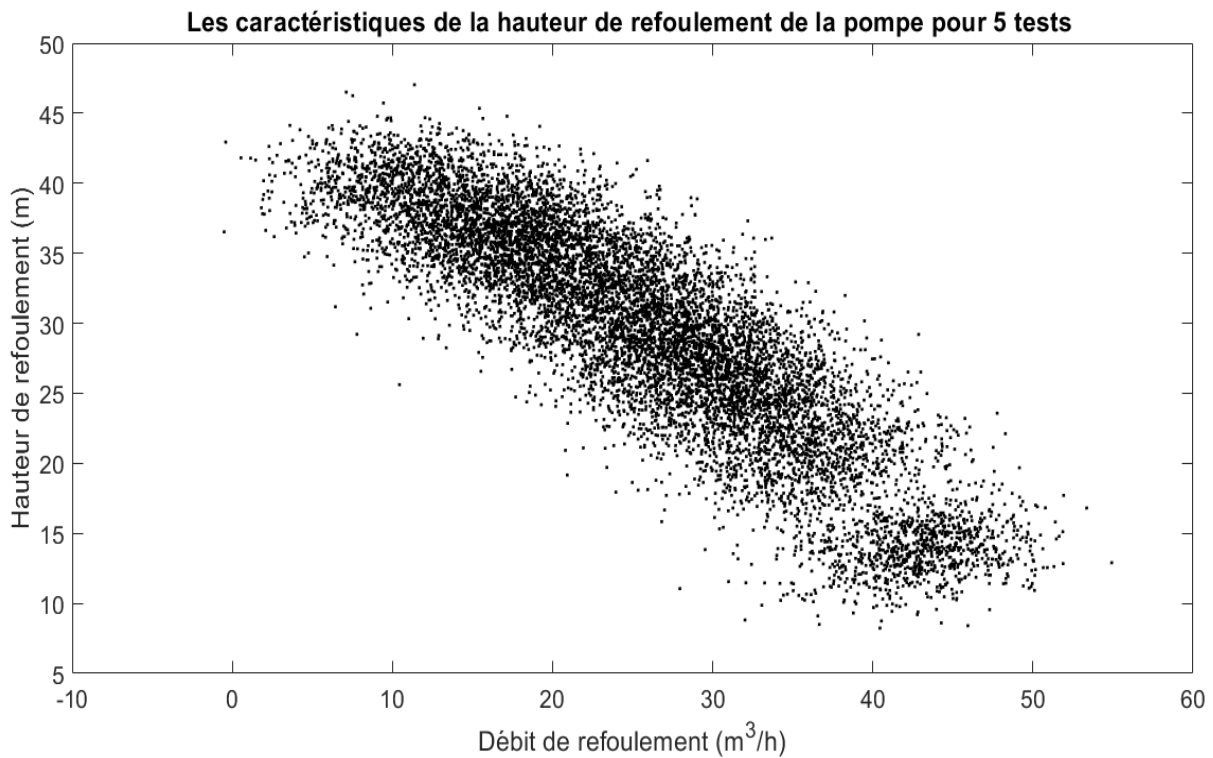


Figure IV-5 : Les caractéristiques de la hauteur de refoulement de la pompe pour 5 tests.

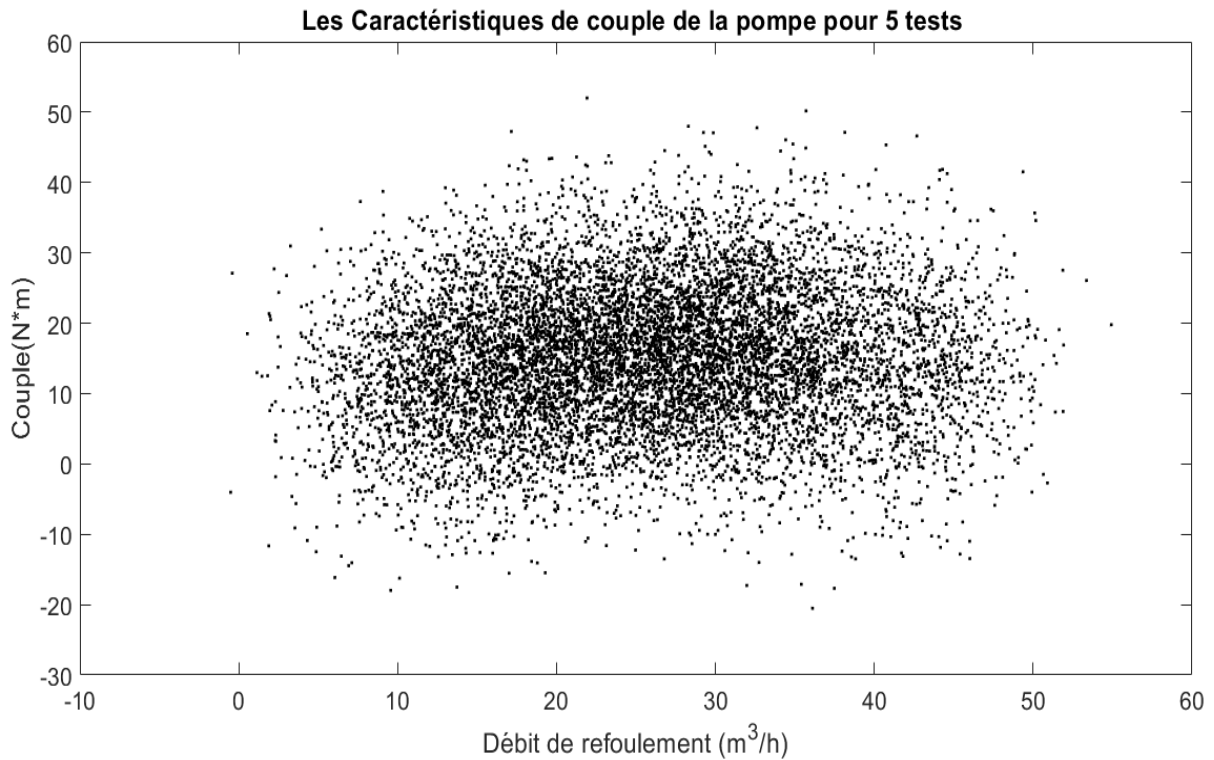


Figure IV-6 : Les caractéristiques de couple de pompe pour 5 tests.

Les graphiques représentent les caractéristiques de la hauteur de refoulement de la pompe et le couple. Sur l'axe des x, nous avons le débit de refoulement en mètres cubes par heure (m³/h), et sur l'axe des y, nous avons la hauteur de refoulement de la pompe en mètres (Figure IV-5) et le couple pompe (Figure IV-6).

Les mesures de la hauteur de la pompe et couple varient en fonction du débit pour une pompe en bon état de fonctionnement, en effet sans une compréhension approfondie de ces variations normales, il serait difficile de distinguer les changements inhabituels qui pourraient indiquer un défaut réel dans la pompe. En collectant des données à partir de pompes en bon état de fonctionnement dans des conditions réalistes, il devient possible de mieux caractériser ces variations normales, ce qui, à son tour, permet de détecter de manière plus précise et fiable les défauts potentiels.

Ces variations doivent être prises en compte pour fiabiliser le diagnostic de défaut. Les sections suivantes traitent des techniques de détection et d'isolation des défauts pour les données bruitées.

IV. 3. 4 Détection d'anomalies

Dans de nombreuses situations, seules les mesures des machines en bon état sont disponibles. Dans ce cas, une description statistique de l'état sain, encapsulée par la valeur moyenne et la covariance du vecteur de paramètres, peut être créée à l'aide des mesures disponibles. Les mesures de la pompe test peuvent ensuite être comparées aux statistiques nominales pour déterminer si la pompe test est plausible en tant que pompe saine. Une pompe défectueuse devrait être détectée comme une anomalie dans la vue des caractéristiques de détection.

Temps (second)	Exécution	Position de vanne	Vitesse	Hauteur manométrique	Refoulement	Couple
180	1	10	3034.6	12.367	35.339	0.35288
180.1	1	10	2922.1	9.6762	36.556	4.6953
180.2	1	10	2636.1	11.168	36.835	9.8898
180.3	1	10	2717.4	10.562	40.22	12.598
180.4	1	10	3183.7	10.55	40.553	14.672

Tableau IV-3 : Ensemble de mesure d'une pompe d'essai.

Le **Tableau IV-3** contient un ensemble de mesures de la vitesse, du couple, de la hauteur manométrique et du débit de la pompe à différentes positions de la vanne d'une pompe d'essai.

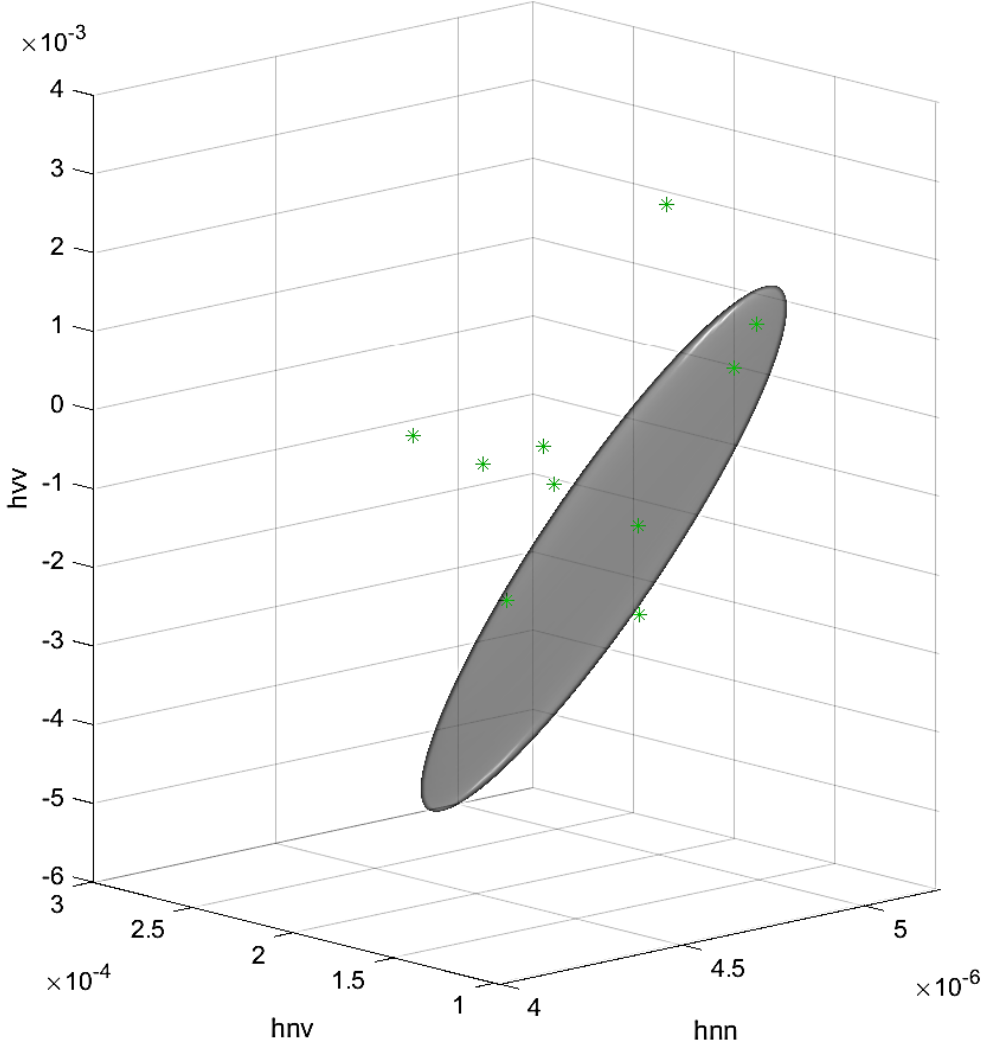


Figure IV-7 : Ellipsoïdes de confiance à 2 écarts types pour les paramètres de la hauteur de refoulement.

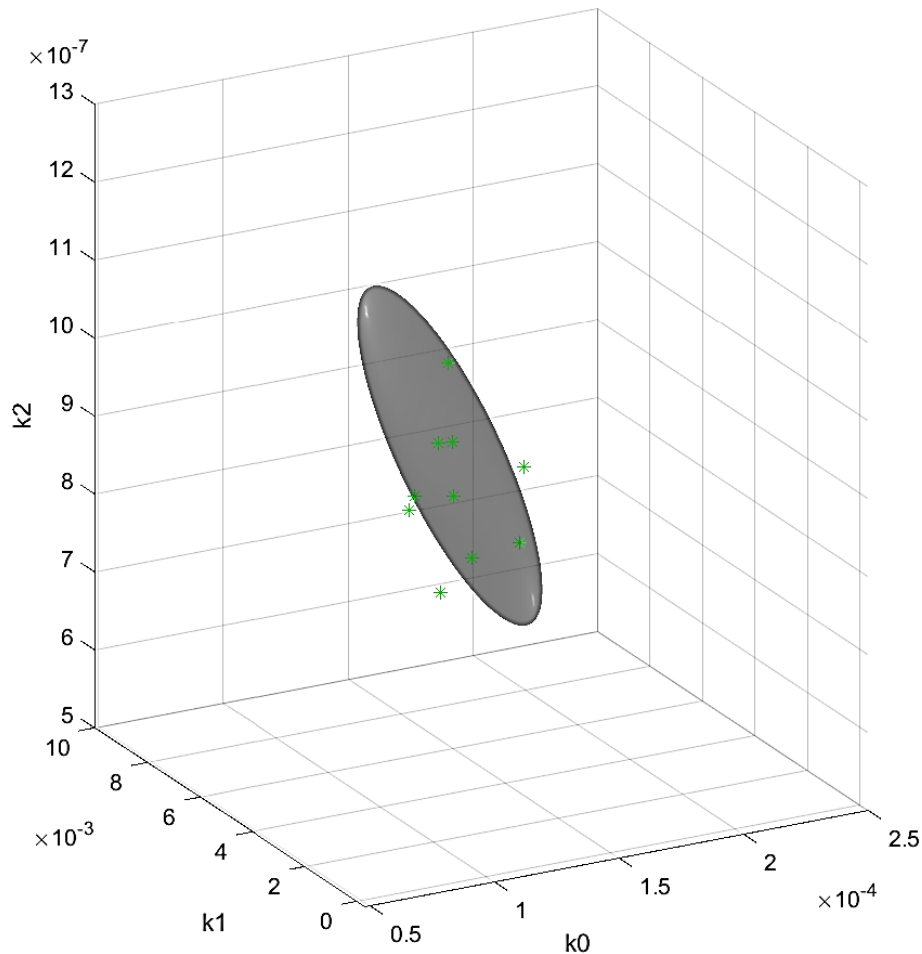


Figure IV-8: Ellipsoïdes de confiance à 2 écarts types pour les paramètres de couple

Les graphiques représentent des ellipsoïdes de confiance à 2 écarts types (représentant une confiance d'environ 74 %) pour les paramètres de la hauteur de pompe (Figure IV-7) et les paramètres de couple de pompe (Figure IV-8).

Ces ellipsoïdes montrent la région de confiance pour les paramètres de la hauteur et du couple d'une pompe saine. Les trois axes de la Figure IV-8 représentent les paramètres de refoulement (h_{nn}, h_{nv}, h_{vv}) et les axe de Figure IV-9 représentent les paramètres de couple (k_0, k_1, k_2). Les marqueurs d'étoile verte représentent les paramètres de la pompe d'essai estimés. Les étoiles vertes correspondent à une pompe testée. Les marqueurs situés en dehors des ellipsoïdes de confiance peuvent être considérés comme anormales.

En résumé, ces graphiques permettent de visualiser comment les paramètres de la pompe d'essai se comparent aux paramètres de la pompe saine en termes de caractéristiques de hauteur de pompe et du couple. Les étoiles vertes en dehors des ellipsoïdes de confiance peuvent indiquer des problèmes potentiels dans la pompe d'essai.

IV. 3. 5 Quantification de la détection d'anomalies à l'aide de régions de confiance

Dans cette partie on discute d'une façon d'utiliser les renseignements sur la région de confiance pour la détection et l'évaluation de la gravité des défauts. La technique consiste à calculer la "distance" d'un échantillon d'essai à partir de la moyenne ou de la médiane de la distribution de la région saine. Cette distance doit être relative à la "dispersion" normale des données de paramètres sains, représentée par leur covariance. La fonction MAHAL calcule la distance de Mahalanobis des échantillons de test par rapport à la distribution d'un ensemble d'échantillons de référence (l'ensemble de paramètres de la pompe saine ici).

On a considéré que 74 % de la limite de confiance (2 écarts types) est une variation acceptable pour des données saines, donc toutes les valeurs qui sont supérieures à $2^2 = 4$ seront considérées comme anormales et donc indiquent un comportement défectueux.

Numéro de la pompe	Distance d'échantillon	Anomalies
1	58.874	Oui
2	24.051	Oui
3	6.281	Oui
4	3.7179	Non
5	13.58	Oui
6	3.0723	Non
7	2.0958	Non
8	4.7127	Oui
9	26.829	Oui
10	0.74682	Non

Tableau IV-4 : Résultats de l'analyse de détection d'anomalies (hauteur de refoulement).

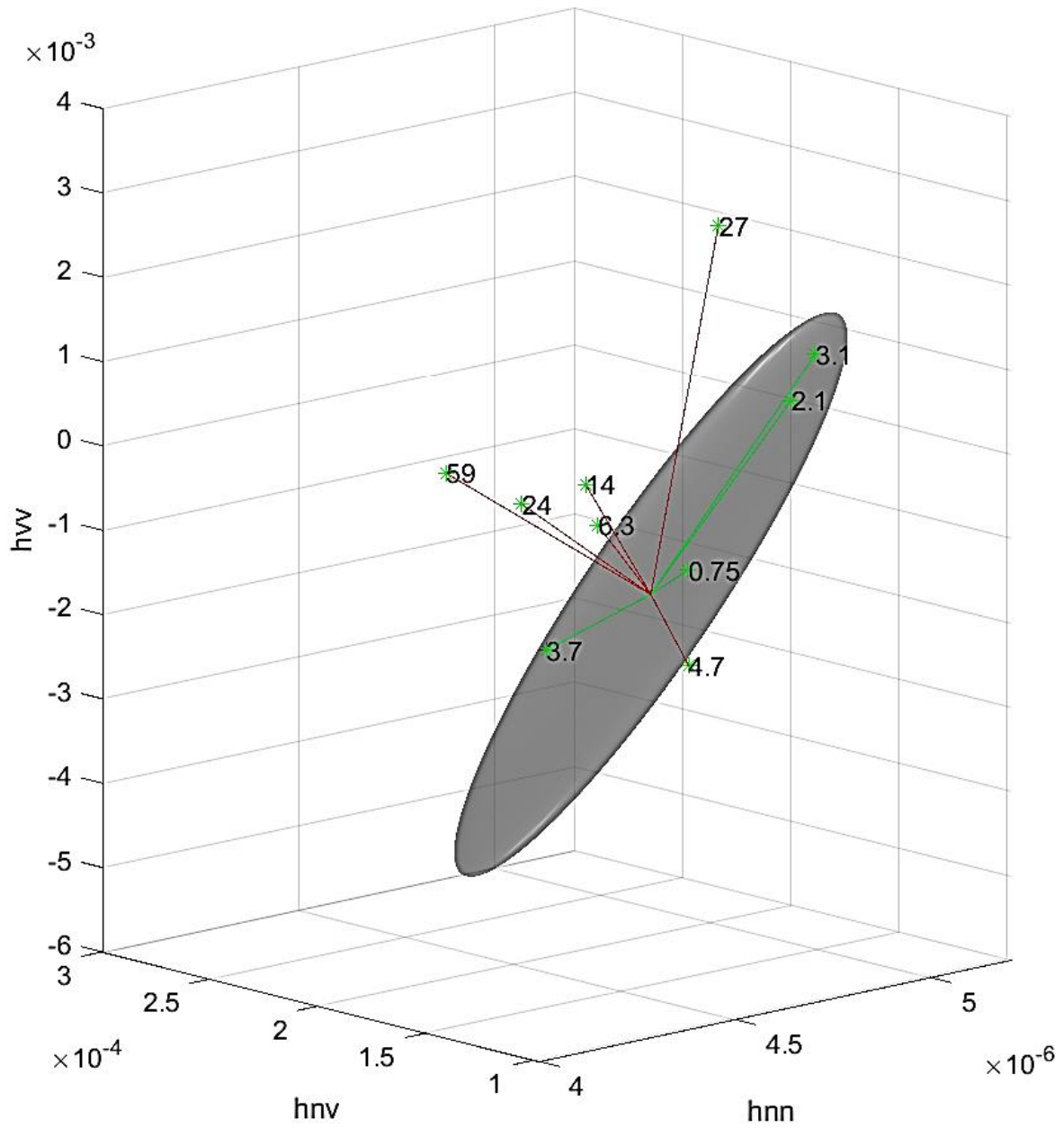


Figure IV-9 : Ellipsoïdes de confiance à 2 écarts types pour les paramètres de la hauteur de refoulement en intégrant la distance de Mahalanobis.

Numéro de la pompe	Distance d'échantillon	Anomalies
1	9.1381	Oui
2	5.4249	Oui
3	3.0565	Non
4	3.775	Non
5	0.77961	Non
6	7.5508	Oui
7	3.3368	Non
8	0.74834	Non
9	3.6478	Non
10	1.0241	Non

TableauIV-5 :Résultats de l'analyse de détection d'anomalies (couple).

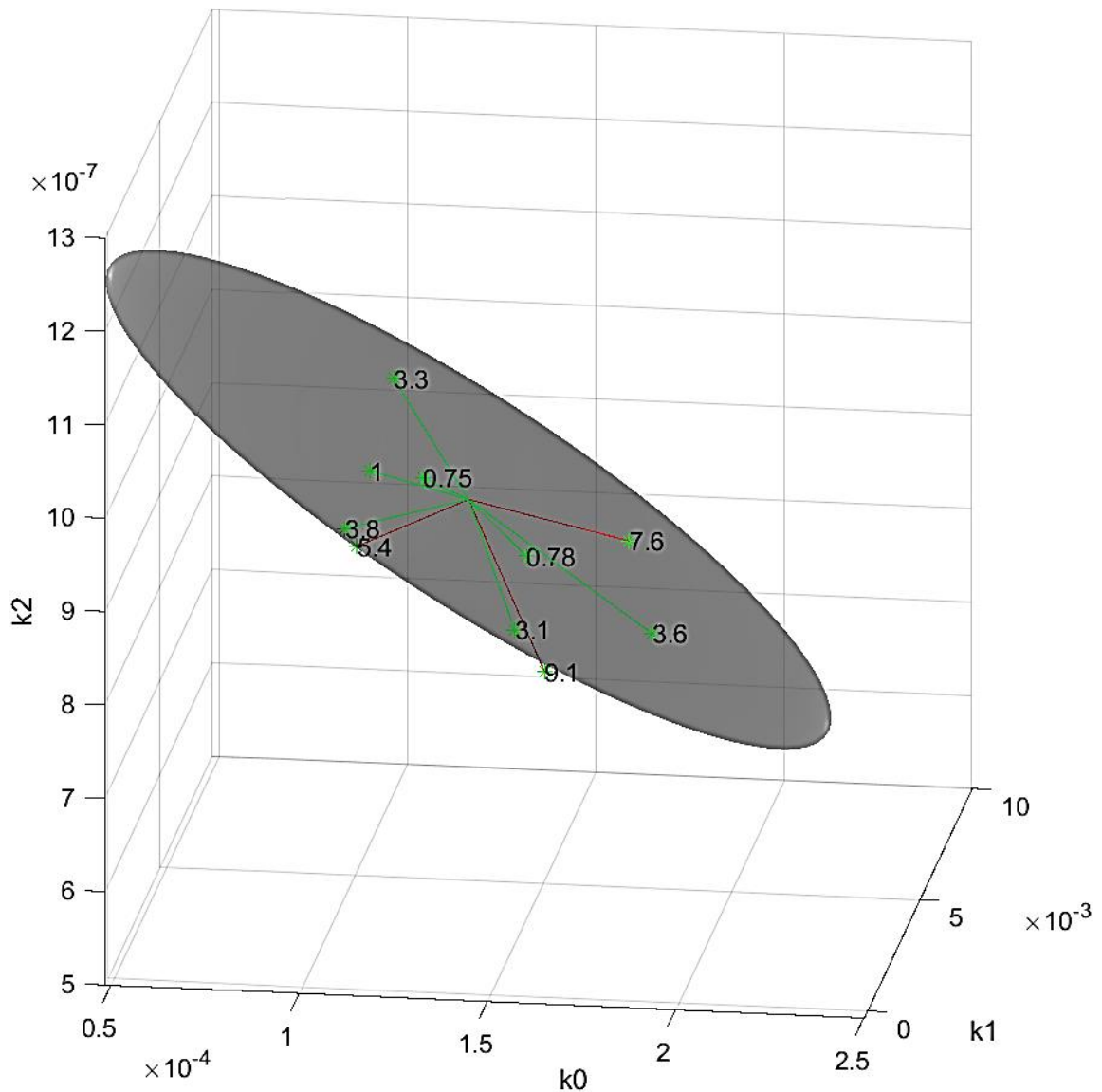


Figure IV-10 : Ellipsoïdes de confiance à 2 écarts types pour les paramètres de couple en intégrant la distance de Mahalanobis.

Les tableaux représentent un résumé des résultats de l'analyse de détection d'anomalies effectuée sur les données de test par rapport aux données saines.

Le Tableau IV-4 : présente les résultats de l'analyse de détection d'anomalies effectuée en comparant les données de hauteur de refoulement des tests avec les données de hauteur de refoulement saines.

Le Tableau IV-5 présente les résultats de l'analyse de détection d'anomalies effectuée en comparant les données de couple des tests avec les données de couple saines.

voici ce que chaque colonne des deux tableaux représente :

Numéro de la pompe : Cette colonne indique le numéro de la pompe de test. Chaque ligne de tableau correspond à une pompe de test spécifique.

Distance de l'échantillon : Cette colonne affiche les distances de Mahalanobis calculées pour chaque échantillon de test par rapport aux données saines. La distance de Mahalanobis mesure à quel point un échantillon donné est éloigné de la distribution des données saines.

Anomalie : Cette colonne indique si l'échantillon est considéré comme anormal ou non.

Figure IV-9 illustre les résultats de la détection d'anomalies dans les données de hauteur de refoulement issues des tests par rapport aux données saines.

Figure IV-10 : présente les résultats de la détection d'anomalies dans les données de couple provenant des tests par rapport aux données saines.

Les lignes rouges relient chaque étoile verte au centre de la distribution des données saines pour les paramètres de la pompe correspondants. Ces lignes représentent la distance de Mahalanobis entre chaque échantillon de test et la distribution des données saines.

Ces graphiques et ces tableaux aident à identifier les pompes de test présentant des comportements anormaux, et de déterminer quels échantillons sont considérés comme anormaux en fonction de leur éloignement par rapport à la distribution des données saines, ce qui est essentiel pour le diagnostic des défauts dans les pompes.

Plus une pompe de test est éloignée de la distribution des données saines, plus le risque de défaillance est élevé. Ces résultats peuvent être utilisés pour prioriser les actions de maintenance et les réparations sur les pompes qui présentent des anomalies graves.

IV. 3. 6 Quantification de la détection d'anomalies à l'aide d'un classificateur de classe

Dans ce cas nous traitons une autre technique efficace pour repérer les anomalies : la construction d'un classificateur d'une classe pour l'ensemble de données de paramètres sains. L'idée est de former un classificateur SVM (Support Vector Machine ou Machine à vecteurs de support) en utilisant uniquement les données de paramètres de pompe saine.

Les SVM sont une famille d'algorithmes d'apprentissage automatique qui permettent la détection d'anomalies.

L'idée ici est de traiter toutes les données comme provenant de la même classe (c'est-à-dire la classe "saine") car nous n'avons pas d'étiquettes de défaut dans nos données. Nous nous concentrons sur les paramètres h_{nn}, h_{vv}, k_0, k_2 car ils sont les plus indicatifs de potentiels défauts comme nous l'avons observé précédemment.

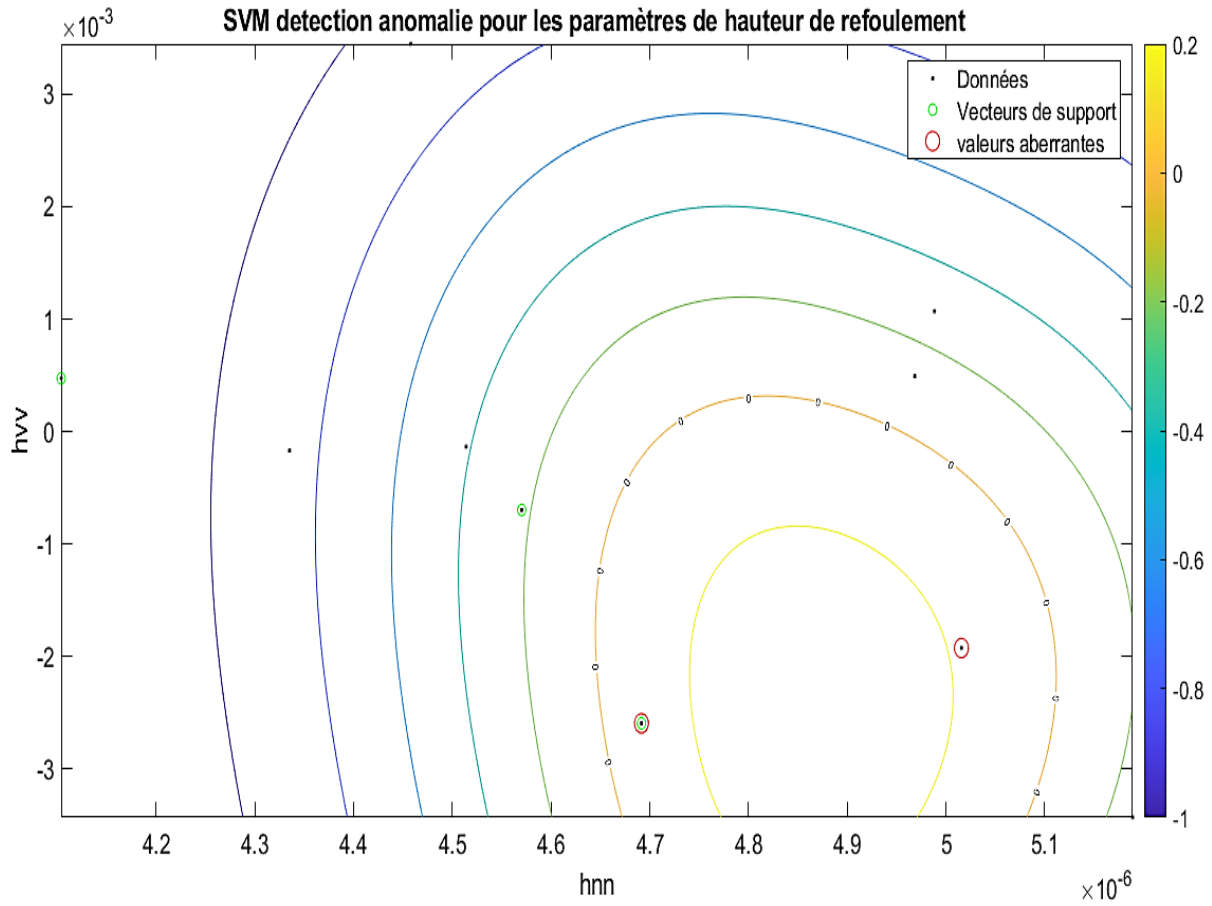


Figure IV-11 : SVM détection d'anomalie pour les paramètres de la hauteur de refoulement.

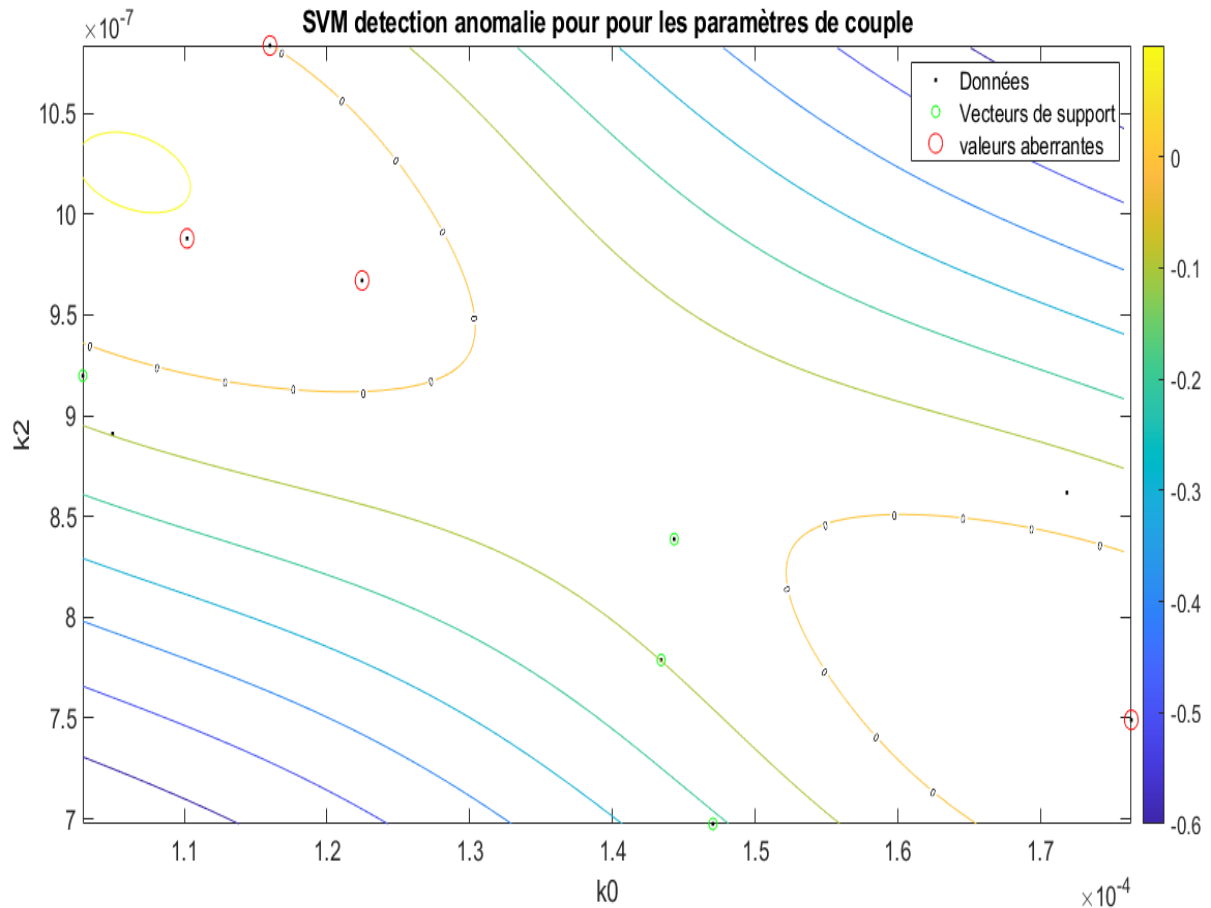


Figure IV-12 : SVM détection d'anomalie pour les paramètres du couple.

Les Figures illustrent les résultats de la détection d'anomalies pour les paramètres de hauteur de refoulement (h_{nn}, h_{vv}) ainsi que pour les paramètres de couple (k_0, k_2) à l'aide d'un modèle SVM.

Points de données : Les points sur les graphiques représentent les données collectées. Chaque point correspond à une observation des paramètres de la hauteur de refoulement ou du couple, en fonction des tests effectués.

Petits cercles verts : Ces cercles verts désignent les vecteurs de support du modèle SVM. Ce sont les points de données les plus proches de la frontière de décision du modèle.

Cercles rouges : Les cercles rouges indiquent les valeurs aberrantes, c'est-à-dire les observations considérées comme étant en dehors de la normale par le modèle SVM.

Courbe de niveau "0" : Sur les graphiques, vous verrez une courbe de niveau marquée par "0". Cette courbe représente la limite qui sépare les valeurs aberrantes du reste des données. Tout ce qui se trouve à l'extérieur de cette courbe est considéré comme une anomalie potentielle par le modèle.

Cette technique SVM nous a permis détecter les anomalies potentielles dans les paramètres de hauteur de refoulement et de couple en utilisant les données d'entraînement "saines". Les valeurs aberrantes sont mises en évidence et séparées du reste des données par la courbe de niveau "0".

IV. 3. 7 Isolation des défauts en utilisant les paramètres en régime permanent comme caractéristiques

Disposer d'informations sur le type de défaut(s) dans un système de test est très précieux pour la détection et le diagnostic des défauts. Ces informations supplémentaires peuvent être utilisées pour créer des algorithmes plus sophistiqués qui non seulement détectent quand un défaut survient, mais fournissent également des indications sur la nature spécifique ou le type du défaut.

IV. 3. 7. 1 Distinguer les défauts de jeu de la bague d'usure par des tests de rapport de vraisemblance :

Les valeurs de jeu de bague d'usure peuvent être divisées en deux types : un jeu faible que prévu et un jeu important que prévu.

Nous avons chargé des ensembles de données d'essai (ensemble sain, ensemble avec espace de jeu important et ensemble avec espace de jeu faible). Les ensembles contiennent des données provenant de 50 expériences indépendantes pour chaque mode (saines, espace de jeu important et espace de jeu faible).

Dans cette section, ces ensembles de données revêtent une importance cruciale pour notre étude, car elle repose principalement sur leur utilisation. Ces ensembles de données sont utilisés pour ajuster les modèles linéaires en régime permanent, comme nous l'avons expliqué précédemment, afin de caractériser les données liées à la hauteur de refoulement et au couple de la pompe. Par la suite, des histogrammes pour représenter graphiquement ces paramètres (hauteur de refoulement et couple) ont été créés.

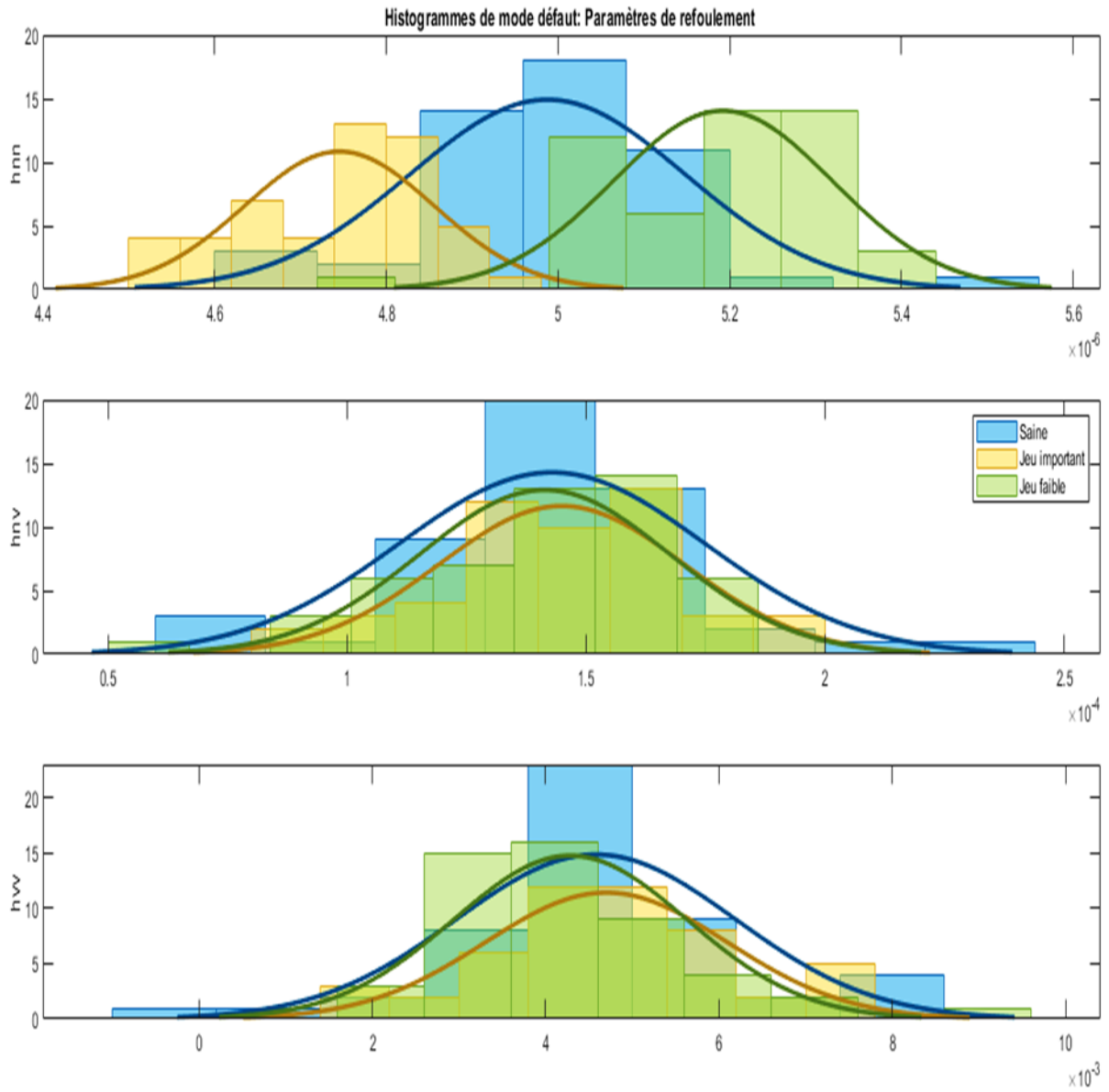


Figure IV-13 : histogrammes de mode défauts : Paramètres de hauteur du refoulement.

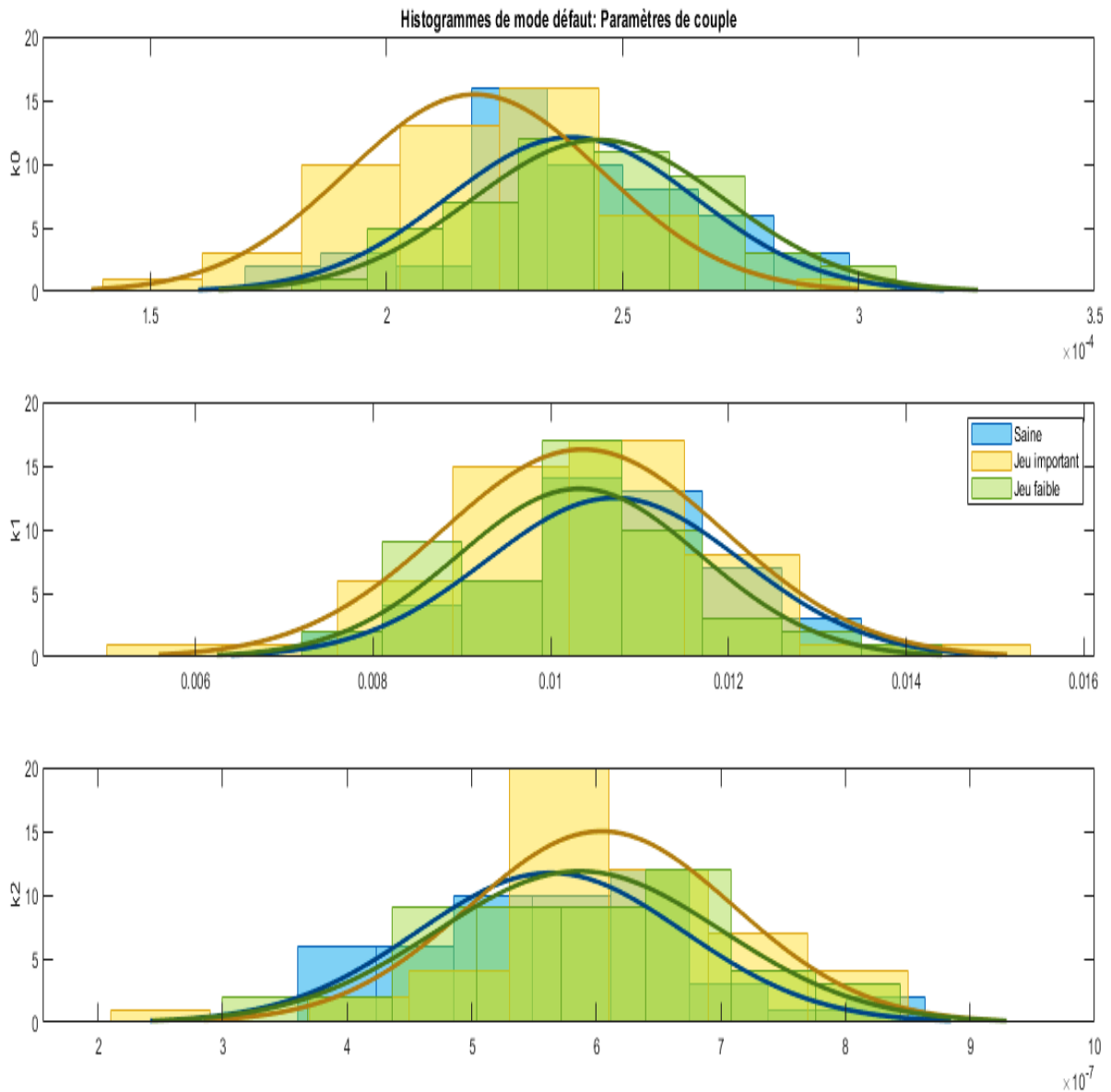


Figure IV-14 : histogrammes de mode défauts : Paramètres de couple.

Les figures représentent la distribution des données pour deux ensembles de paramètres (hauteur de refoulement ,couple) dans des histogrammes .

Figure IV-13 : représente histogramme des paramètres de la hauteur de refoulement de la pompe.

Cet histogramme montre comment les paramètres liés à la hauteur de refoulement sont distribués. Il peut s'agir de paramètres tels que la hauteur de refoulement de la pompe (h_{nn}, h_{nv}, h_{vv}) et l'histogramme permet de visualiser la distribution de ces paramètres dans les ensembles de données sains, avec un jeu de bague d'usure important et un jeu de bague d'usure faible.

Figure IV-14: représente l'histogramme des paramètres de couple de la pompe.

Cet histogramme montre comment les paramètres liés au couple de la pompe sont distribués. Il s'agit de paramètres (k_0, k_1, k_2) . L'histogramme permet de visualiser la distribution de ces paramètres dans les mêmes ensembles de données sains, avec un jeu de bague d'usure important et un jeu de bague d'usure faible.

On remarque que les valeurs de h_{nn} pour chaque mode de fonctionnement sont suffisamment distinctes les unes des autres dans l'histogramme, ce qui permet de les différencier clairement (bonne séparabilité).

En revanche, les paramètres h_{nv} , h_{vv} , k_0 , k_1 , k_2 présentent des valeurs qui se chevauchent mutuellement dans l'histogramme. Autrement dit, ces paramètres ont des fonctions de distribution de probabilité (PDF) qui se superposent. Dans de telles situations, il devient plus complexe de distinguer les données correspondant aux trois modes (sain, jeu important de bague d'usure, jeu faible de bague d'usure).

C'est dans ces circonstances qu'il devient nécessaire d'utiliser un classificateur à trois modes, car il permet d'exploiter à la fois la moyenne et la variance des données.

Lorsque les PDF présentent une séparation significative en termes de moyenne ou de variance, cela ouvre la possibilité de concevoir des tests de rapport de vraisemblance afin d'affecter rapidement un ensemble de données de test au mode le plus probable.

Les fonctions *mvnpdf*, *confusionmatrix* et *heatmap* sont utilisées pour effectuer ces calculs et créer une visualisation de la matrice de confusion.

Classes réelles	Saine	50	0	0
	Jeu important	0	50	0
	Jeu faible	1	0	49
		Saine	Jeu important	Jeu faible
		Classes prédites		

Figure IV-15 : Matrice de confusion pour les paramètres de de la hauteur de refoulement de pompe.

Classes réelles	Saine	48	1	1
	Jeu important	0	50	0
	Jeu faible	1	0	49
		Saine	Jeu important	Jeu faible
		Classes prédites		

Figure IV-16 : Matrice de confusion pour les paramètres du couple.

Les figures sont des matrices de confusion des paramètre de pompe. Les lignes représentent les classes réelles (saine, jeu important, jeu faible).les colonnes représentent les classes prédites par le modèle.Chaque cellule de la matrice indique combien d'observations

appartiennent à une certaine classe réelle et ont été classées dans une certaine classe prédite par le modèle. Les éléments de la diagonale de la matrice représentent les prédictions correctes, tandis que les éléments hors diagonale indiquent les erreurs de classification.

Figure IV-15: Matrice de confusion pour les Paramètres de la hauteur de refoulement de pompe. La diagonal de la matrice de confusion affiche (50,50 ,49).

50 /50 ont été correctement classées dans le mode "Pompe Saine". Cela signifie que le modèle a correctement identifié ces expériences comme étant saines, 50/50 expériences ont été correctement classées dans le mode "Pompe avec un Jeu important de Bague d'Usure". Cela signifie que le modèle a bien détecté ces expériences comme ayant un jeu de bague d'usure important et 49/50 expériences ont été correctement classées dans le mode "Pompe avec un faible Jeu de Bague d'Usure". Ces expériences ont été identifiées comme ayant un jeu de bague d'usure faible.

Le diagramme de confusion montre une séparation parfaite entre les trois modes, ce qui n'est pas surprenant étant donné la séparation claire entre les histogrammes h_{nm} pour paramètres.

Figure IV-16: Matrice de confusion pour les paramètres de couple de pompe .La diagonal de la matrice de confusion affiche (48, 50, 49) sur la diagonale. Cela signifie que le modèle a correctement classé 48/50 ont été classer correctement dans le mode "Pompe Saine", 50/50 expériences dans le mode "Pompe avec un Jeu important de Bague d'Usure" et 49/50 expériences dans le mode "Pompe avec un Jeu faible de Bague d'Usure".

La matrice de confusion démontre une bonne séparation entre les trois modes d'utilisation des paramètres de la pompe en utilisant à la fois les moyennes et les variances. Cependant, cette séparation est plus difficile à réaliser en se basant uniquement sur les histogrammes des paramètres de couple, car ils présentent un chevauchement significatif, ce qui rend la classification moins précise. C'est pourquoi l'utilisation des moyennes et des variances s'avère essentielle pour une meilleure classification dans ce cas.

IV. 3. 7. 2 Classification multi-classes des modes de défaut à l'aide de TreeBagging

Dans cette section, nous discutons d'une autre technique de classification plus adaptée lorsque la classification parmi un plus grand nombre de modes est nécessaire. Nous examinons les modes de défaillance suivants dans le fonctionnement de la pompe : fonctionnement sain, écart de jeu de bague d'usure, dépôts à la sortie de l'impulseur, dépôts à l'entrée de l'impulseur, usure abrasive à la sortie de l'impulseur, pales défectueuses, cavitation.

Cette technique d'apprentissage supervisé utilise un ensemble de données pour lesquelles la valeur de la variable-cible est connue afin de construire l'arbre (données dites étiquetées), puis on extrapole les résultats à l'ensemble des données de test.

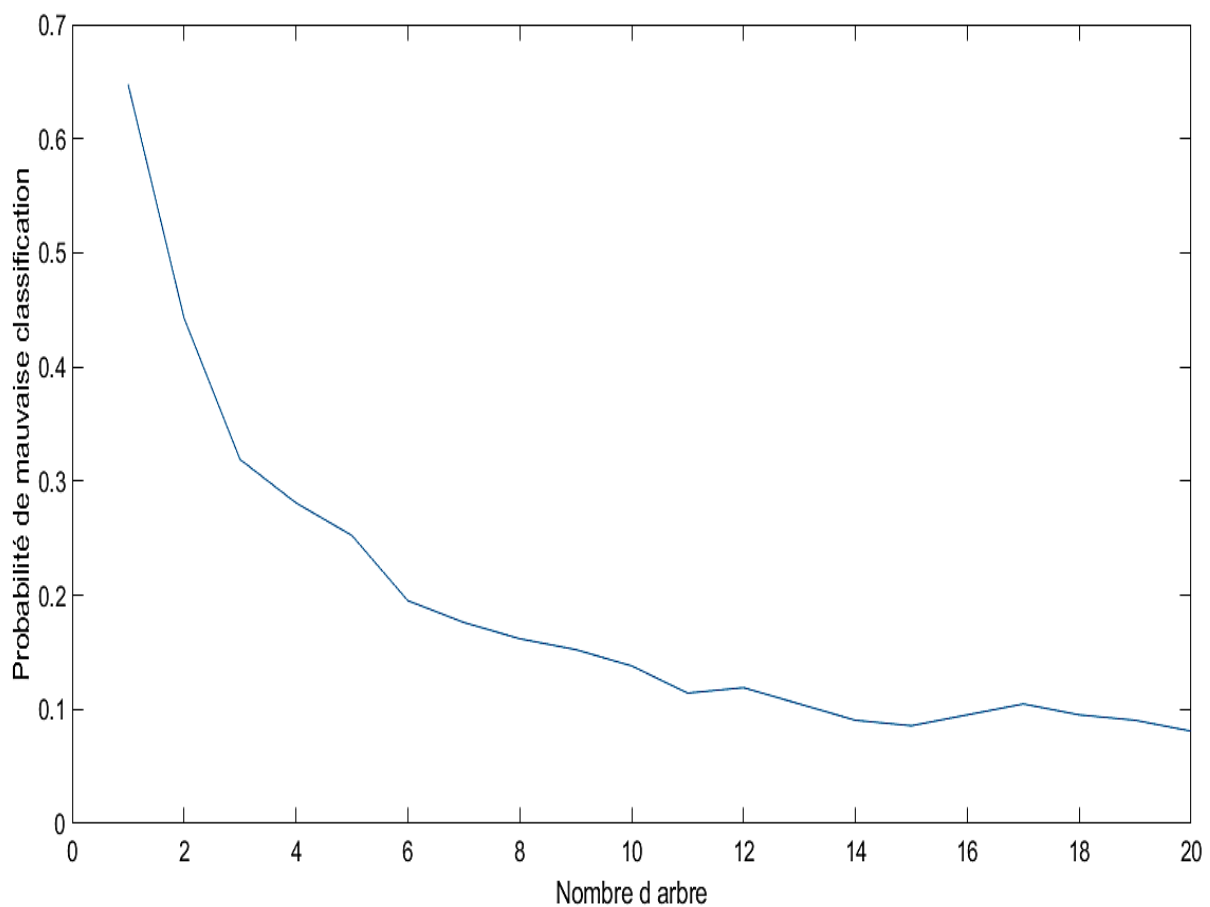


Figure IV-17 : Évolution de la Probabilité de Mauvaise Classification en Fonction du Nombre d'Arbres dans le Modèle TreeBagger

La courbe montre la probabilité d'erreur de classification pour les observations hors sac en fonction du nombre d'arbres de décision dans le modèle TreeBagger.

L'axe horizontal (X) représente le "Nombre d'arbres" dans l'ensemble d'arbres de décision (c'est pourquoi vous avez utilisé le terme "TreeBagger"). Chaque arbre dans cet ensemble contribue à la prise de décision du modèle.

L'axe vertical (Y) représente la "Probabilité de mauvaise classification" ou l'"Erreur de classification hors sac". Il mesure à quel point le modèle se trompe dans sa classification des données lorsqu'il ne tient pas compte d'un échantillon particulier de données (d'où le terme "hors sac").

Les performances du modèle TreeBagger peuvent être calculées en étudiant sa probabilité d'erreur de classification pour les observations hors sac en fonction du nombre d'arbres de décision.

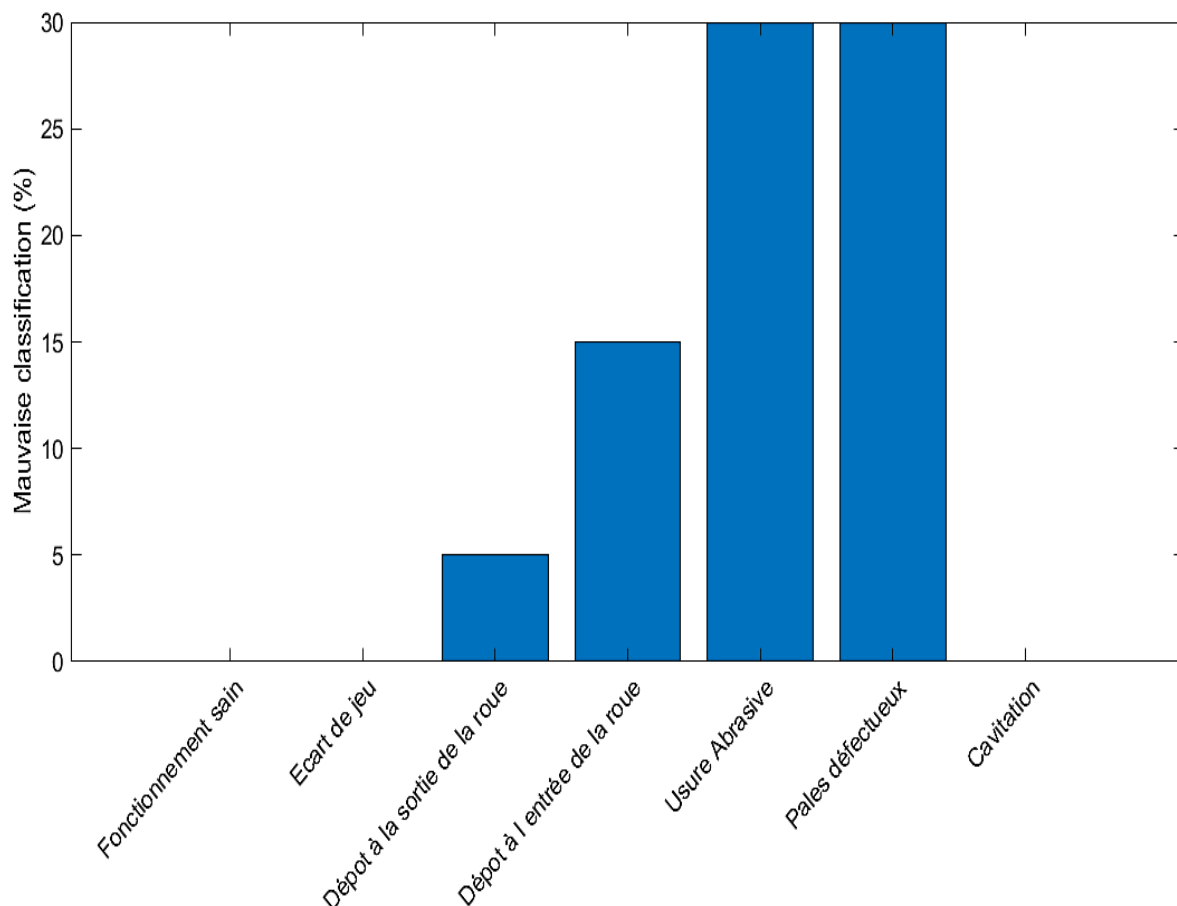


Figure IV-18 : Graphique des Erreurs de Classification.

Le graphique à barres montre les pourcentages d'erreurs de classification où chaque barre correspond à une catégorie de défaut.

L'usure abrasive et les défauts de pales défectueuses sont mal classés pour environ 30 % des échantillons de validation. Cela signifie que les caractéristiques ou les symptômes de ces deux catégories de défauts peuvent être similaires ou difficiles à distinguer pour ce modèle.

IV. 4 Conclusion

Une stratégie de diagnostic des pannes efficace offre des avantages significatifs en termes de réduction des coûts opérationnels. Elle atteint cet objectif en minimisant les temps d'arrêt des services et les dépenses liées au remplacement des composants défaillants.

L'utilisation d'algorithmes d'apprentissage automatique constitue une approche puissante pour le diagnostic des pannes. Les capteurs collectent des données en temps réel sur le fonctionnement de l'équipement. Ces données sont ensuite traitées par des algorithmes d'apprentissage automatique qui ont été formés à reconnaître des schémas et des signaux anormaux. En identifiant ces anomalies, les algorithmes peuvent détecter et isoler divers types de pannes. Par exemple, un changement soudain dans la pression, la température ou d'autres paramètres peut indiquer un problème potentiel. L'algorithme d'apprentissage automatique peut signaler cette anomalie, permettant ainsi une intervention précoce pour résoudre le problème avant qu'il ne devienne critique.

Cette combinaison de technologies permet un diagnostic rapide et précis des pannes, réduisant ainsi les temps d'arrêt non planifiés et les coûts associés à la réparation ou au remplacement des équipements. En conséquence, les opérations industrielles fonctionnent de manière plus efficace et économique.

Conclusion générale

Les pompes centrifuges sont des composants fondamentaux dans divers secteurs industriels, utilisées pour le transfert de liquides et essentielles pour le bon fonctionnement de nombreuses applications, de la gestion de l'eau à l'industrie pétrolière en passant par l'agriculture. Cependant, comme tout équipement mécanique, elles sont sujettes à des pannes qui peuvent entraîner une diminution de leur efficacité. La maintenance et la détection précoce des pannes sont donc cruciales pour garantir leur bon fonctionnement.

Ce mémoire se penche sur l'importance des pompes centrifuges, leur fonctionnement, leurs composants essentiels et les types de pannes couramment rencontrées. Il met en lumière la nécessité de détecter ces défaillances rapidement et efficacement pour minimiser les temps d'arrêt coûteux et garantir la continuité des processus industriels.

L'une des approches explorées ici est l'utilisation de l'estimation paramétrique, une technique mathématique qui consiste à estimer les paramètres d'un modèle à partir de données de fonctionnement nominal. Ces paramètres sont ensuite utilisés pour surveiller les performances de la pompe et détecter tout écart par rapport à leur valeur nominale.

En outre, ce mémoire explore l'intégration de l'apprentissage automatique (machine learning) dans le processus de détection de pannes des pompes centrifuges. L'apprentissage automatique permet d'améliorer la précision de la détection en utilisant des algorithmes qui peuvent identifier des modèles et des anomalies dans les données, contribuant ainsi à une maintenance proactive et efficace.

Ce travail vise à mieux comprendre le fonctionnement des pompes centrifuges, à mettre en évidence l'importance de leur maintenance préventive et à explorer des méthodes avancées telles que l'estimation paramétrique et l'apprentissage automatique pour détecter et prévenir les défaillances. Cette approche combinée de la technologie et de l'analyse des données offre un potentiel considérable pour améliorer la fiabilité et la durabilité des pompes centrifuges dans diverses industries.

Annexe 1 : Base de données

<https://www.mathworks.com/supportfiles/predmaint/fault-diagnosis-of-centrifugal-pumps-using-steady-state-experiments/PumpCharacteristicsData.mat>

<https://www.mathworks.com/supportfiles/predmaint/fault-diagnosis-of-centrifugal-pumps-using-steady-state-experiments/FaultDiagnosisData.mat>

<https://www.mathworks.com/supportfiles/predmaint/fault-diagnosis-of-centrifugal-pumps-using-steady-state-experiments/LabeledGapClearanceData.mat>

<https://www.mathworks.com/supportfiles/predmaint/fault-diagnosis-of-centrifugal-pumps-using-steady-state-experiments/MultipleFaultsData.mat>

Annexe 2 : Fonctions utilisées

A)

```

function varargout = linearFit(Form, Data)
%linearFit Linear least squares solution for Pump Head and Torque parameters.
%
% If Form==0, accept separate inputs and return separate outputs. For one experiment
only.
% If Form==1, accept an ensemble and return compact parameter vectors. For several
experiments (ensemble).
if Form==0
    w = Data{1};
    Q = Data{2};
    H = Data{3};
    M = Data{4};
    n = length(Q);
    if isscalar(w), w = w*ones(n,1); end
    Q = Q(:); H = H(:); M = M(:);
    Predictor = [w.^2, w.*Q, Q.^2];
    Theta1 = Predictor\H;
    hnn = Theta1(1);
    hnv = -Theta1(2);
    hvv = -Theta1(3);
    Theta2 = Predictor\M;
    k0 = Theta2(2);
    k1 = -Theta2(3);
    k2 = Theta2(1);
    varargout = {hnn, hnv, hvv, k0, k1, k2};
else
    H = cellfun(@(x)x.Head,Data,'uni',0);
    Q = cellfun(@(x)x.Discharge,Data,'uni',0);
    M = cellfun(@(x)x.Torque,Data,'uni',0);
    W = cellfun(@(x)x.Speed,Data,'uni',0);
    N = numel(H);

    Theta1 = zeros(3,N);
    Theta2 = zeros(3,N);

    for kexp = 1:N
        Predictor = [W{kexp}.^2, W{kexp}.*Q{kexp}, Q{kexp}.^2];
        X1 = Predictor\H{kexp};
        hnn = X1(1);
        hnv = -X1(2);
        hvv = -X1(3);
        X2 = Predictor\M{kexp};
        k0 = X2(2);
        k1 = -X2(3);
        k2 = X2(1);

        Theta1(:,kexp) = [hnn; hnv; hvv];
        Theta2(:,kexp) = [k0; k1; k2];
    end
    varargout = {Theta1', Theta2'};
end
end
end

```

B)

```

function helperPlotConfidenceEllipsoid(M,C,n,color)
%helperPlotConfidenceEllipsoid Plot confidence region for 3D data.
%
% This function is only in support of
% CentrifugalPumpFaultDiagnosisUsingSteadyStateExperimentsExample. It may
% change in a future release.

% Copyright 2017 The MathWorks, Inc.

%Compute the surface points of a N standard deviations ellipsoid
%corresponding to the provided mean (M) and covariance (C) data.
[U,L] = eig(C);

% For n standard deviation spread of data, the radii of the ellipsoid will
% be given by n*SQRT(eigenvalues)
l = 50;
radii = n*sqrt(diag(L));
[xc,yc,zc] = ellipsoid(0,0,0,radii(1),radii(2),radii(3),l);
%
a = kron(U(:,1),xc); b = kron(U(:,2),yc); c = kron(U(:,3),zc);
data = a+b+c;
nc = size(data,2);
x = data(1:nc,:)+M(1);
y = data(nc+1:2*nc,:)+M(2);
z = data(2*nc+1:end,:)+M(3);

if isscalar(color), color = color*ones(1,3); end
ColorMap(:,:,1) = color(1)*ones(1,1);
ColorMap(:,:,2) = color(2)*ones(1,1);
ColorMap(:,:,3) = color(3)*ones(1,1);

sc = surf(x,y,z,ColorMap);
shading interp
alpha(sc,0.4);
camlight headlight
lighting phong

```

C)

```
function helperAddDistanceLines(PlotNo, Distance, Mean, TestTheta, Threshold)
%helperAddDistanceLines Add Mahanobis distance lines to the confidence region plot.
%
% This function is only in support of
% CentrifugalPumpFaultDiagnosisUsingSteadyStateExperimentsExample. It may
% change in a future release.

% Copyright 2017 The MathWorks, Inc.

subplot(1,2,PlotNo)
hold on
for ct = 1:size(TestTheta,1)
    if Distance(ct)>Threshold^2
        Color = [1 0 0];
    else
        Color = [0 1 .2];
    end
    line([Mean(1);TestTheta(ct,1)],...
        [Mean(2);TestTheta(ct,2)],...
        [Mean(3); TestTheta(ct,3)], 'Color',Color)
    text(TestTheta(ct,1),TestTheta(ct,2),TestTheta(ct,3),num2str(Distance(ct),2))
end
```

D)

```

function helperPlotSVM(SVMModel,TestData)
%helperPlotSVM Generate SVM boundary and view outliers.
%
% This function is only in support of
% CentrifugalPumpFaultDiagnosisUsingSteadyStateExperimentsExample. It may
% change in a future release.

% Copyright 2017-2018 The MathWorks, Inc.

svInd = SVMModel.IsSupportVector;
dd = min(abs(diff(TestData)))/10;

[X1,X2] = meshgrid(min(TestData(:,1)):dd(1):max(TestData(:,1)),...
    min(TestData(:,2)):dd(2):max(TestData(:,2)));
[~,score] = predict(SVMModel,[X1(:),X2(:)]);
scoreGrid = reshape(score,size(X1,1),size(X2,2));
[~,score1] = predict(SVMModel,TestData);
outlierInd = score1>0;

plot(TestData(:,1),TestData(:,2),'k.')
hold on
plot(TestData(svInd,1),TestData(svInd,2),'go','MarkerSize',6)
plot(TestData(outlierInd,1),TestData(outlierInd,2),'ro','MarkerSize',10)
[C,h] = contour(X1,X2,scoreGrid);
clabel(C,h,0,'Color','k','LabelSpacing',50,'FontSize',6);
colorbar;
legend('Données','Vecteurs de support','valeurs aberrantes')
hold off
end

```

E)

```

function helperPlotHistogram(Theta1, Theta2, Theta3, names)
%helperPlotHistogram Plot histograms of pump parameters.
%
% This function is only in support of
% CentrifugalPumpFaultDiagnosisUsingSteadyStateExperimentsExample. It may
% change in a future release.

% Copyright 2017 The MathWorks, Inc.
f = figure;
subplot(311)
localAdjustMarkers(histfit(Theta1(:,1)));
hold on
localAdjustMarkers(histfit(Theta2(:,1)))
localAdjustMarkers(histfit(Theta3(:,1)))
ylabel(names{1})
if strcmp(names{1}, 'hnn')
    title('Histogrammes de mode défaut: Paramètres de refoulement ')
else
    title('Histogrammes de mode défaut: Paramètres de couple')
end
L = findall(gca, 'Type', 'line', 'Tag', 'PDF');
uistack(L, 'top');

subplot(312)
hg = histfit(Theta1(:,2));
hasbehavior(hg(2), 'legend', false)
localAdjustMarkers(hg)
hold on
hg = histfit(Theta2(:,2));
hasbehavior(hg(2), 'legend', false)
localAdjustMarkers(hg)
hg = histfit(Theta3(:,2));
hasbehavior(hg(2), 'legend', false);
localAdjustMarkers(hg)
ylabel(names{2})
legend('Saine', 'Jeu important ', 'Jeu faible')
L = findall(gca, 'Type', 'line', 'Tag', 'PDF');
uistack(L, 'top');

subplot(313)
localAdjustMarkers(histfit(Theta1(:,3)))
hold on
localAdjustMarkers(histfit(Theta2(:,3)))
localAdjustMarkers(histfit(Theta3(:,3)))
ylabel(names{3})
L = findall(gca, 'Type', 'line', 'Tag', 'PDF');
uistack(L, 'top');

f.Position(4) = f.Position(4)*1.8571;
centerfig(f)

%-----
function localAdjustMarkers(hh)
% Configure PDF curve markers to improve discernment.

```

```
Col = hh(1).FaceColor;
hh(2).Color = Col*0.7;
hh(1).FaceColor = min(Col*1.2, [1 1 1]);
hh(1).EdgeColor = Col*0.9;
hh(1).FaceAlpha = 0.5;
hh(2).Tag = 'PDF';
```

F)

```

function pumpModeLikelihoodTest(HealthyTheta, LargeTheta, SmallTheta)
%pumpModeLikelihoodTest Generate predictions based on PDF values and plot confusion
matrix.

m1 = mean(HealthyTheta);
c1 = cov(HealthyTheta);
m2 = mean(LargeTheta);
c2 = cov(LargeTheta);
m3 = mean(SmallTheta);
c3 = cov(SmallTheta);

N = size(HealthyTheta,1);

% True classes
% 1: Healthy: group label is 1.
X1t = ones(N,1);
% 2: Large gap: group label is 2.
X2t = 2*ones(N,1);
% 3: Small gap: group label is 3.
X3t = 3*ones(N,1);

% Compute predicted classes as those for which the joint PDF has the maximum value.
X1 = zeros(N,3);
X2 = zeros(N,3);
X3 = zeros(N,3);
for ct = 1:N
    % Membership probability density for healthy parameter sample
    HealthySample = HealthyTheta(ct,:);
    x1 = mvnpdf(HealthySample, m1, c1);
    x2 = mvnpdf(HealthySample, m2, c2);
    x3 = mvnpdf(HealthySample, m3, c3);
    X1(ct,:) = [x1 x2 x3];

    % Membership probability density for large gap pump parameter
    LargeSample = LargeTheta(ct,:);
    x1 = mvnpdf(LargeSample, m1, c1);
    x2 = mvnpdf(LargeSample, m2, c2);
    x3 = mvnpdf(LargeSample, m3, c3);
    X2(ct,:) = [x1 x2 x3];

    % Membership probability density for small gap pump parameter
    SmallSample = SmallTheta(ct,:);
    x1 = mvnpdf(SmallSample, m1, c1);
    x2 = mvnpdf(SmallSample, m2, c2);
    x3 = mvnpdf(SmallSample, m3, c3);
    X3(ct,:) = [x1 x2 x3];
end

[~,PredictedGroup] = max([X1;X2;X3],[],2);
TrueGroup = [X1t; X2t; X3t];
C = confusionmat(TrueGroup,PredictedGroup);
heatmap(C, ...
    'YLabel', 'Classes réelles', ...
    'YDisplayLabels', {'Saine','Jeu important','Jeu faible'}, ...
    'XLabel', 'Classes prédites ', ...

    'XDisplayLabels', {'Saine','Jeu important','Jeu faible'}, ...
    'ColorbarVisible','off');
end

```

G)

```

url = 'https://www.mathworks.com/supportfiles/predmaint/fault-diagnosis-of-
centrifugal-pumps-using-steady-state-experiments/MultipleFaultsData.mat';
websave('MultipleFaultsData.mat',url);
load MultipleFaultsData
% Compute pump head parameters
HealthyTheta = linearFit(1, HealthyEnsemble);
Fault1Theta = linearFit(1, Fault1Ensemble);
Fault2Theta = linearFit(1, Fault2Ensemble);
Fault3Theta = linearFit(1, Fault3Ensemble);
Fault4Theta = linearFit(1, Fault4Ensemble);
Fault5Theta = linearFit(1, Fault5Ensemble);
Fault6Theta = linearFit(1, Fault6Ensemble);

% Generate labels for each mode of operation
Label = {'Healthy','ClearanceGapWear','ImpellerOutletDeposit',...
'ImpellerInletDeposit','AbrasiveWear','BrokenBlade','Cavitation'};
VarNames = {'hnn','hnv','hvv','Condition'};
% Assemble results in a table with parameters and corresponding labels
N = 50;
T0 = [array2table(HealthyTheta), repmat(Label(1), [N,1])];
T0.Properties.VariableNames = VarNames;
T1 = [array2table(Fault1Theta), repmat(Label(2), [N,1])];
T1.Properties.VariableNames = VarNames;
T2 = [array2table(Fault2Theta), repmat(Label(3), [N,1])];
T2.Properties.VariableNames = VarNames;
T3 = [array2table(Fault3Theta), repmat(Label(4), [N,1])];
T3.Properties.VariableNames = VarNames;
T4 = [array2table(Fault4Theta), repmat(Label(5), [N,1])];
T4.Properties.VariableNames = VarNames;
T5 = [array2table(Fault5Theta), repmat(Label(6), [N,1])];
T5.Properties.VariableNames = VarNames;
T6 = [array2table(Fault6Theta), repmat(Label(7), [N,1])];
T6.Properties.VariableNames = VarNames;

% Stack all data
% Use 30 out of 50 datasets for model creation
TrainingData = [T0(1:30,:);T1(1:30,:);T2(1:30,:);T3(1:30,:);T4(1:30,:);T5(1:30,:);T6
(1:30,:)];

% Create an ensemble Mdl of 20 decision trees for predicting the
% labels using the parameter values
rng(3) % for reproducibility
Mdl = TreeBagger(20, TrainingData, 'Condition',...
'OOBPrediction','on',...
'OOBPredictorImportance','on')

```

Références bibliographiques

- [2] KHALDI et LATRECHE, « Etude d'une pompe centrifuge a un étage ». Mémoire de Master, Génie mécanique, Centre Universitaire Ain Temouchent ,2014
- [3] OUAZANI Y et SMAIL Y, « Etude de la Maintenance d'une Pompe Centrifuge Verticale par la méthode AMDEC, Mémoire de Master, Génie Mécanique, université mouloud Mammeri Tizi Ouzou 2016/2017
- [4] M. Y. Belghit, Cours, Pompes & Compresseurs Enseignant
- [5] MANUEL DE FORMATION TOTAL : Maintenance Mécanique, Les Pompe, EXP-MN-SM110-FR Dernière Révision, 20/10/2021
- [6] SUPPORT DE FORMATION TOTAL : Les Equipements, Les Accouplements, Cours EXP-PR-EQ185, Dernière Révision : 14/05/2007
- [7] PASCAL Bigot, Les différents types de la pompe MECA-FLUV, CIRA
- [9] DJAAOUI M A, « Analyse Des Mode De Défaillance, Leurs Effet Et Leurs Criticités D'une Pompe Centrifuge », mémoire de fin d'étude en vue l'obtention du diplôme Master en Génie Mécanique université Larbi Ben M'hidi Oum-El-Bouaghi, 2019/2020
- [13] KADI M, GHANA D E, « étude et amélioration FMD d'une motopompe centrifuge » Mémoire master professionnel en génie mécanique université, Kasdi Rabah Ouaregla 2014
- [15] MANUEL DE FORMATION GRUNDFOS : LES POMPES ,2004
- [18] DJEBABLA B, DHELLALI B « analyse des causes de défaillances des pompe centrifuge » Mémoire de projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de Master en Génie mécanique, Université Badji Mokhtar, Annaba 2020/2021
- [19] BECHIRI Mohammed, « Etude et mise en service du banc d'essai. Tutor de Pompe et des turbines au sein de l'université de Tlemcen ». Mémoire de projet de fin D'étude pour l'obtention du diplôme de Master en Génie mécanique, Université AboubakrBelkaïd Tlemcen. (2019)
- [20] MANUEL DE FORMATION TOTAL : Les Equipements, Les Pompe, Cours EXP-PR-EQ070, Dernière Révision : 13/04/2007

[22] OTMANI H Prédiction pour la détection de défaut de roulement à bille dans un système mécanique ». Mémoire de projet de fin

D'étude pour l'obtention du diplôme de Master, spécialité informatique industrielle, université Ibn Khaldoun Tiaret ,2016/2017

[24] BENMAHDI D, « Contribution à l'étude de diagnostic des défaut mécanique thèse, spécialité mécanique appliqué », Université Ferhat Abbas Sétif, 2020

[29] BOUKHAMLA M, DJEMIL B, « Etude et optimisation du système d'étanchéité d'une pompe centrifuge », Mémoire fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie mécanique, Ecole national polytechnique, 2012

[31] BENZAADA S, FELIACHI D. LA MAINTENANCE INDUSTRIELLE, OFFICE DES PUBLICATION UNIVERSITAIRES. Ben Aknoun (Alger 07-2002

[32] JEAN HENG, Pratique De La Maintenance Préventive : Mécanique, Pneumatique, Hydraulique électricité, froid, 2002

[33] FRIHI D, Polycopie de cours : maintenance industrielle, génie mécanique université 8 mai 1945 (Guelma), Juin 2015

[34] Jérémy LIAURENS, « Mise en place d'un plan de maintenance préventive sur un site de production pharmaceutiques », Science pharmaceutiques, 2011

[35] BAKIRI R, SAIDANI K, « pronostic des défauts des éoliennes par la méthode des réseaux neurones artificiels » mémoire fin d'étude master, maintenance industrielle, université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou ,2022

[36] ZARGOU A, ZAID M, « Outil d'aide au diagnostic basé sur l'approche de raisonnement a partir de cas (PANSOL) » Mémoire de fin d'étude, Master génie industrielle université Abou BekrBelkaid Tlemcen 2015/2016

[38] DJEBILI O, « Contribution A La Maintenance Prédictive Par Analyse Vibratoire Des Composants Mécaniques Tournants. Application Aux Butées A Billes Soumises La Fatigue De Contact De Roulement.», Thèse De Doctorat En Cotutelle Université De Reims Champagne Ardenne, 2013

[40] BOUGHAREB K, « Surveillance Et Diagnostic Des Machines Tournantes Par Analyse Vibratoire » Mémoire de master, Maintenance Industrie, Université Badji Mokhtar, Annaba 2019/2020

- [41] GHEZZAL O, TARMOUNE O E « Modélisation Et Diagnostic Des Systèmes Incertains Par Analyse En Composantes Principales » Mémoire Master Automatique Et Systemes Université Kasdi Merbah, Ouargla ,2018/2019
- [42] Cours « Diagnostic Des Systèmes » Département De Génie Electrique, Université De Msila
- [43] DERBEL H, « Diagnostic A Base De Modèles Des Systèmes Temporisés Et D'une Sous-classe De Systèmes Dynamiques Hybrides » Thèse, Département Automatique Université Joseph Fourier - Grenoble I, Tunisie ,2009
- [44] JELASSI K, BACHIR S, « Estimation Paramétrique Pour Le Diagnostic Des Processus. Application A La Bobine A Noyau De Fer » Journal Européen des Systèmes Automatisés, July2008, 509-539p
- [46] CHERAYET A, LIFA I, « Calcul De L'installation De Ravitaillement D'une Agglomération En Eau Potable » MEMOIRE De Master Electromécanique Université Larbi Tebessi, Tébessa ,2020-2021
- [49] Isermann, Rolf, Fault-Diagnosis Applications. Model-Based Condition Monitoring: Actuators, Drives, Machinery, Plants, Sensors, and Fault-Tolerant System, Edition 1, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.

Webography

- [1] <https://www.inoxmim.com/fr/pompes/types-de-bombesindustrielles>
- [8] <https://dienerprecisionpumps.com/fr/positive-displacement-pumps/>
- [10] <https://www.grundfos.com/fr/learn/>
- [11] <https://www.directindustry.fr/prod/johnson-pump/product-38862-596858.html>
- [12] <https://www.thermal-engineering.org/fr/quest-ce-que-limpulseur-types-dimpulseurs-definition/>
- [14] <https://elmaquinante.blogspot.com/2020/02/bomba-centrifuga-principio-fundamental.html>
- [16] <https://www.atlantiqueindustrie.fr/produit/flowserve-men-pompes-nomalisees-pour-eaux-claires/>
- [17] <https://dqc.dietsmann.com/nos-formations/mecanique/pompes-centrifuges/>
- [21] <https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/roulement/89187>
- [23] <https://www.skf.com/fr/products/rolling-bearings/roller-bearings/cylindrical-roller-bearings>
- [25] https://lefiabdellaoui.files.wordpress.com/2018/09/elements-normalisc3a9s_2018.pdf
- [26] <https://impeller.net/magazin/editorial-comment-choisir-des-bagues-dusure-durables-pour-les-pompes-centrifuges/?lang=fr>
- [27] <https://nicopumps.com/wear-rings-101/>
- [28] <https://www.ksb.com>
- [30] https://www.gunt.de/images/download/Connaissances-de-base-en-pompes-centrifuges_french.pdf
- [37] <https://www.tribofilm.fr/les-differents-types-de-maintenance/>
- [39] <https://mobility-work.com/fr/blog/maintenance-industrielle/>
- [45] <https://www.debem.com/fr/la-cavitation-dans-les-pompes-centrifuges/>
- [47] <https://www.lftechnologies.fr/>
- [48] https://blogs.univ-poitiers.fr/noelbrunetiere/files/2015/12/tribologie_brunetiere_2016.pdf