

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLICUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عمّار ثليجي بالأغواط
UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOUAT

كلية التكنولوجيا
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE



Mémoire de MASTER

Domaine : Science et Technologie
Filière : Electromécanique
Option : Maintenance industrielle

Par:
BENMEBAREK Sahraoui
BELLAMRI ryadh

THEME

**OPTIMISATION DE LA MAINTENANCE
PREDICTIVE D'UNE POMPE TRIPLEX SOUS
MATLAB**

Soutenu publiquement devant le jury composé de:

Mr: GEURIBIZ Djelloul

Pr

Président

Mr: MECHRAOUI Ameer

MAA

Examineur

Mr: REZIG Ahmida

MCB

Encadreur

Année Universitaire 2024/2025

Dédicace

A mes parents, que dieu que les gardes,

A tous mes frères et mes sœurs,

A toute ma famille,

A tous mes amis.

BELLAMRI

RYADH

Dédicace

A mes parents et mes sœurs, que dieu que les gardes,

A mon frère que Dieu ait pitié de lui,

A ma femme et ma petite fille,

A toute ma famille,

A tous mes amis.

BENMEBAREK

SAHRAOUI

Remerciements

Louange au Dieu le tout puissant qui nous a accordés la foi, le courage et la patience pour mener ce travail.

Nous tenons à remercier infiniment notre encadreur, Monsieur REZIG Ahmida pour sa patience et ses conseils précieux qui nous ont été très utiles. Permettez-nous Monsieur de vous exprimer nos reconnaissances et nos remerciements les plus sincères.

Nous remercions également Monsieur GEURIBIZ Djelloul (professeur à l'université de Laghouat), pour l'intérêt qu'il a porté au travail effectué en acceptant d'être président du jury de ce mémoire.

Merci à Monsieur MECHRAOUI Aneur (Maître d'assistant à l'université de Laghouat), pour avoir accepté de participer à notre soutenance en tant qu'examineurs.

Nous n'oublions pas non plus notre remerciement et de gratitude au chef du département de mécanique M. Hadj Aissa Aissa, et au chef d'option M. Bensenouci Ahmida, pour leurs encouragements et pour leur confiance.

Merci aussi à tous nos collègues et amis de l'université de Laghouat et nous leur exprimons notre profonde sympathie et leur souhaite beaucoup de chance pour leurs travaux.

Finalement, nous tenons à témoigner notre profonde gratitude à l'université de Laghouat représentée par les enseignants du département mécanique ainsi que le personnel administratif, pour leur gentillesse, leur aide, leurs conseils précieux.

ملخص

هذا العمل مخصص للدراسة التشخيصية والصيانة التنبؤية لمضخة الثلاثية، والتي قمنا خلالها بإجراء العديد من عمليات المحاكاة باستعمال برنامج MATLAB ، وهو برنامج يستخدم للكشف عن الحالات الشاذة المحتملة في المضخة. لهذا، قمنا بإدخال عمدا 3 أخطاء في الجهاز .

إن معرفة وقت حدوث العطب المتوقع يساعد على إيجاد الوقت الأمثل لجدولة الصيانة للمعدات الخاصة لأن الصيانة غير الضرورية يمكن أن تكون مضيعة للصيانة المجدولة (الصيانة الوقائية).

كلمات مفتاحية : التشخيص ، الصيانة التنبؤية ، مضخة ثلاثية ، التعلم الآلي ، MATLAB ،

Résumé

Ce travail est dédié à l'étude de diagnostic et à la maintenance prédictive d'une pompe triplex, au cours de laquelle nous avons fait plusieurs simulations avec le logiciel MATLAB. Ce logiciel est utilisé pour détecter les anomalies potentielles dans la pompe. Pour cela, nous avons délibérément créé 3 défauts dans la machine. Alors, connaître le temps de défaillance prévu nous aide à trouver le temps optimal pour planifier la maintenance de notre équipement, car une maintenance inutile peut être un gaspillage sur la maintenance prévue (préventive).

Mots-clés: Diagnostic, maintenance prédictive, pompe triplex, apprentissage automatique, Matlab

Abstract

This work is dedicated to the diagnostic study and Predictive maintenance of a triplex pump, during which we made several simulations with MATLAB software. This software is used to detect potential anomalies in the pump. For this, we have deliberately created three (3) Faults in the machine. Knowing the predicted failure time helps us to find the optimum time to schedule maintenance for our equipment because unnecessary maintenance can be wasteful on the Scheduled maintenance (preventive).

Keywords: Diagnostic, Predictive Maintenance, Triplex pump, Machine Learning, MATLAB.

Liste des figures et tableaux

LISTE DES FIGURES :

Figure I:1: Différentes politiques suivant le type de maintenance étudiée.....	8
Figure I:2: Maintenance corrective.....	8
Figure I:3: Exemple d'opération de maintenance curative urgente.....	9
Figure I:4: Courbe Baignoire.....	10
Figure II:1: Types de maintenance et leur approche de La gestion des defaillances.....	19
Figure II:2: Etapes d'une maintenance predictive.....	21
Figure II:3: Types d'algorithmes utilises dans les solutions de maintenance predictive ...	22
Figure II:4: Etape D'une Maintenance Predictive.....	22
Figure II:5: Extraction e classement de caractéristiques.....	28
Figure III:1: Pompe centrifuge.....	33
Figure III:2: Pompes à piston.....	36
Figure III:3: Pompes à membrane.....	36
Figure III:4: Pompes péristaltiques.....	37
Figure III:5: Pompes à engrenages.....	37
Figure III:6: Pompes à palettes.....	38
Figure III:7: Pompes à vis.....	38
Figure III:8: Pompe Triplex.....	40
Figure III:9 : Composition de la pompe triplex.....	42
Figure III:10: Diagramme de cause à effet. La pompe affecte les paramètres de fonctionnement.....	45
Figure III:11: Diagramme de cause à effet. Dents d'engrenage érodées.....	46
Figure III:12: Diagramme de cause à effet. Durée de vie du joint courte.....	47
Figure III:13: Diagramme de cause à effet. Durée de vie de l'insert courte.....	47
Figure III:14: Diagramme de cause à effet. Huile PWE non acceptable.....	48
Figure III:15: Diagramme de cause à effet. Stock de pièces détachées insatisfaisant.....	49
Figure IV:1: Workflow pour le developpement d'algorithmes de maintenance predictive.	51
Figure IV:2: Acquisition de données.....	52
Figure IV:3: Data collection via capteur.....	52
Figure IV:4: Climat monde carte.....	53
Figure IV:5: Chargement des donnees de la pompe Triplex sous Matlab.....	53
Figure IV:6: Matrice des mesures pression et débit.....	54
Figure IV:7: Traitement des données.....	55
Figure IV:8: Transformation de données temporelles en données fréquentielles.....	56

Figure IV:9: Traitement de données.	56
Figure IV:10: Signal de pression pour différents types de défauts.	57
Figure IV:11: Identification des indicateurs de Conditions.	58
Figure IV:12: Moyenne par diagramme de boîte.	58
Figure IV:13: Croisement des boîtes sur le diagramme.	59
Figure IV:14: Diagrammes de dispersion représentant tous les défauts.	59
Figure IV:15: Diagramme fréquentiel de différent code de défauts.	60
Figure IV:16: Peak2/Peak5 Diagramme.	61
Figure IV:17: Case des application Matlab.	62
Figure IV:18: Diagnostic features designer.	62
Figure IV:19: Placement du case « Nouveau Session ».	63
Figure IV:20: Sélection des données.	63
Figure IV:21: Signal du débit.	64
Figure IV:22: Extraction des caractéristiques temporelle.	65
Figure IV:23: Sélection des caractéristiques.	65
Figure IV:24: Tableau et courbe des caractéristiques calculées.	66
Figure IV:25: Tableau des caractéristiques.	66
Figure IV:26: Modèle autoregressive.	67
Figure IV:27: Signal fréquentiel.	67
Figure IV:28: Caractéristique spectral.	68
Figure IV:29: Choix des caractéristiques fréquentielles.	68
Figure IV:30: Histogramme de toute les caractéristiques.	69
Figure IV:31: Classement des caractéristiques.	70
Figure IV:32: Classement des caracteristiques selon la metrique One Way Anova.	70
Figure IV:33 : Entraînement du Model.	71
Figure IV:34: Exportation des caractéristiques.	71
Figure IV:35: Types de Models de classification.	71
Figure IV:36: Le model ‘Bagged Trees’.	72
Figure IV:37: Matrice de confusion.	72
Figure IV:38: Matrice de précision du Model.	73
Figure IV:39: Estimation de la durée de vie restante.	77
Figure IV:40: Duree de vie utile restante (RUL).	78
Figure IV:41: Méthodes de prédiction RUL.	79
Figure IV:42: Modèles de Similarité.	80

Figure IV:43: Modèles de survie.	80
Figure IV:44: Modèles de dégradation.	81
Figure IV:45: Déploiement et intégration.	82
Figure IV:46: Déploiement des Modèles.	82
Figure IV:47: Pompe Triplex 1051.	83
Figure IV:48: Simulation de la pompe par Simulink.	84
Figure IV:49: Intérieur de la Pompe.	84
Figure IV:50: Composants du piston.	85
Figure IV:51: Composants du vilebrequin.	85
Figure IV:52: Désactivation de toutes les paramètres 'OFF'.	86
Figure IV:53: Animation 3D de la pompe avec 0 défaut.	86
Figure IV:54: Démarrage de simulation 'Run'.	86
Figure IV:55: Résultat de simulation avec 0 défaut.	87
Figure IV:56: Résultat du débit avec 0 défaut.	87
Figure IV:57: Résultat du pression avec 0 défaut.	87
Figure IV:58: Résultat du vitesse avec 0 défaut.	87
Figure IV:59: Animation 3D de la pompe avec fuite des joints.	88
Figure IV:60: Résultat de simulation avec fuite des joints.	88
Figure IV:61: Résultat de comparaison du débit en cas de fuite des joints et en cas sain.	88
Figure IV:62 : Résultat de comparaison entre la pression en cas de fuite des joints et en cas sain.	89
Figure IV:63 : Résultat de comparaison entre la vitesse en cas de fuite des joints et en cas sain.	89
Figure IV:64 : Animation 3D en cas d'usure roulement.	90
Figure IV:65 : Résultat de simulation avec usure de roulements.	90
Figure IV:66 : Résultat de comparaison entre le débit en cas d'usure roulements et en cas sain.	91
Figure IV:67 : Résultat de comparaison entre la pression avec usure des roulements et en cas sain.	91
Figure IV:68 : Résultat de comparaison entre la vitesse en cas d'usure des roulements et en cas sain.	91
Figure IV:69 : Résultat de simulation avec entrée bloquée.	92
Figure IV:70 : Animation 3D en cas d'entrée bloquée.	92

Figure IV:71: Résultat de comparaison entre le débit en cas d'entrée bloquée et en cas sain.....	93
Figure IV:72: Résultat de comparaison du pression en cas d'entrée bloquée et en cas sain.	93
Figure IV:73: Résultat du comparaison entre la vitesse en cas d'entrée bloquée et en cas sain.....	94
Figure IV:74: Animation 3D de la pompe avec usure roulements et entrée bloquée.	94
Figure IV:75: Résultat de simulation avec usure roulements et entrée bloquée.	94
Figure IV:76: Résultat du débit avec usure roulements et entrées bloquées.	95
Figure IV:77: comparaison avec courbe du bon état.	95

LISTE DES TABLES:

TABLE I-1: Niveaux De Maintenance.....	14
--	----

Sommaire

INTRODUCTION GÉNÉRALE :	1
CHAPITRE I GÉNÉRALITÉ SUR LA MAINTENANCE.....	4
I.1 Introduction :	5
I.2 Entretien et maintenance :	5
I.3 Classification des défaillances :.....	6
I.3.1 Définitions:.....	6
I.3.1.1 La défaillance :.....	6
I.3.1.2 Défaut:.....	6
I.3.1.3 La panne :.....	6
I.3.1.4 La réparation :	6
I.3.1.5 Le dépannage :	6
I.3.1.6 Les causes de défaillance :	6
I.4 Définition de la maintenance :	7
I.5 Orientation et planification de la maintenance :.....	7
I.6 Les type de maintenance :	8
I.6.1 La Maintenance Corrective :.....	8
I.6.1.1 Maintenance palliative :	9
I.6.1.2 Maintenance curative :	9
I.6.2 Maintenance préventive :	10
I.6.2.1 Maintenance systématique :	11
I.6.2.2 Maintenance conditionnelle :	11
I.6.2.3 Maintenance prévisionnelle :	12
I.7 Objectifs de la maintenance dans l'Entreprise :	12
I.8 Objectifs généraux de la maintenance :.....	12
I.9 Niveaux de maintenance :.....	13
I.10 Les opérations de la maintenance :	15
I.10.1 Les inspections :.....	15
I.10.2 Les visite :	16
I.10.3 Le dépannage :	16
I.10.4 La réparation :	16
I.10.5 Les révisions :	16
I.11 CONCLUSION :.....	16
CHAPITRE II LA MAINTENANCE PRÉDICTIVE.....	17
II.1 Introduction:	Erreur ! Signet non défini.

II.2	Importance de la maintenance prédictive :	19
II.3	Maintenance réactive et maintenance préventive :	19
II.4	Maintenance prédictive :	20
II.4.1	Définition :	20
II.5	Fonctionnement de la maintenance prédictive	21
II.6	Étapes suivies pour développer une maintenance prédictive :	22
II.6.1	Acquisition de données (Data acquisition) :	22
II.6.2	Traitement des données (Data processing) :	23
II.6.3	Prise de décision concernant la machine (Machine decision making) :	24
II.7	Limites de la maintenance prédictive :	24
II.8	Techniques de la maintenance prédictive :	24
II.8.1	Inspections visuelles :	24
II.8.2	Thermographie :	25
II.8.3	Analyse acoustique:	26
II.8.4	Analyse vibratoire des machines tournantes :	26
II.9	MATLAB dans la maintenance prédictive :	27
II.10	Déploiement de modèles MATLAB :	29
II.11	Visualisation et rapports d'analyse :	29
II.12	Conclusion :	29
	CHAPITRE III GÉNÉRALITÉ SUR LES POMPES	31
III.1	Introduction :	32
III.2	Principe de base :	32
III.3	Typologie générale :	32
III.4	Types de pompes :	33
III.4.1	Pompes dynamiques (ou centrifuges) :	33
III.4.1.1	Principe de fonctionnement :	33
III.4.1.2	Caractéristiques techniques :	34
III.4.1.3	Types de pompes centrifuges :	34
III.4.1.4	Avantages des pompes centrifuges :	34
III.4.1.5	Inconvénients :	34
III.4.1.6	Applications industrielles courantes :	35
III.4.2	Pompes volumétriques :	35
III.4.2.1	Principe de fonctionnement :	35
III.4.2.2	Type de pompes volumétriques :	35

A. Pompes à déplacement alternatif :	35
1. Pompes à piston / plongeur :	36
2. Pompes à membrane (ou diaphragme) :	36
3. Pompes péristaltiques :	37
B. Pompes à déplacement rotatif :	37
1. Pompes à engrenages :	37
2. Pompes à palettes :	38
3. Pompes à vis :	38
III.4.2.3 Avantages des pompes volumétriques :	39
III.4.2.4 Inconvénients :	39
III.4.2.5 Applications typiques :	39
III.5 Critères de choix d'une pompe:	39
III.6 Pompe triplex :	39
III.6.1 Principe de fonctionnement :	40
III.6.2 Constitution de la pompe triplex :	40
III.6.3 Applications :	42
III.7 Élaboration du plan de maintenance des pompes Triplex :	43
III.7.1 Introduction :	43
III.7.2 Problèmes liés à l'état et à l'entretien des pompes :	44
III.7.2.1 Analyse des problèmes :	44
III.8 Conclusion :	49
CHAPITRE IV RÉSULTAT DE SIMULATION SUR MATLAB.....	50
IV.1 Conception et testes des algorithmes de surveillance de l'état et de maintenance : ...	51
IV.1.1 Exploitation l'outils informatiques dans les calculs complexes.....	51
IV.2 Procédures dans Matlab :	52
IV.2.1 Acquisition de données: :	52
➤ Sur Matlab :	53
IV.2.2 Traiter les données:.....	55
IV.2.3 Identification les indicateurs de conditions: :	58
➤ Sur Matlab :	61
IV.2.4 Entraînement du model :	71
IV.2.4.1 Durée de vie utile restante (RUL) ? :	77
IV.2.4.2 Façons d'estimer le RUL :	78
IV.2.5 Déploiement du Modèle: :	82

IV.3 Simulation d'une pompe triplex CAT 1051 par Simulink Simscape :	83
IV.3.1 Composants de la pompe:	84
IV.3.2 Début de simulation:	85
➤ Cas de 0 défaut :	85
➤ Cas d'entrée bloquée :	92
➤ Cas de usure roulements et entrée bloquée :	94
IV.4 Discussion et remarques sur les résultats :	95
IV.5 Conclusion :	96
CONCLUSION GÉNÉRALE:	99
ANNEXE	100
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	106

Introduction générale

Introduction générale :

Dans un environnement industriel en constante évolution, où la performance, la sécurité et la compétitivité sont devenues des enjeux majeurs, la maintenance industrielle joue un rôle central dans la gestion efficace des équipements de production. Elle regroupe l'ensemble des actions techniques, administratives et organisationnelles visant à maintenir ou à rétablir un bien dans un état lui permettant de remplir sa fonction, tout en réduisant les coûts liés aux arrêts non planifiés et aux pannes majeures.

Parmi les équipements les plus sollicités figurent les pompes industrielles, utilisées dans une multitude de secteurs pour le transfert de fluides. Leur bon fonctionnement conditionne souvent la continuité de la production. Or, les contraintes mécaniques, l'usure des composants, les phénomènes de cavitation ou les déséquilibres dynamiques peuvent engendrer des dysfonctionnements importants si une stratégie de maintenance appropriée n'est pas mise en place.

Dans ce contexte, la maintenance prédictive émerge comme une approche particulièrement efficace. Basée sur la surveillance en temps réel des paramètres de fonctionnement (vibrations, température, pression, etc.) et l'analyse des données, elle permet de détecter précocement les signes annonciateurs de défaillance. Cela permet d'intervenir au moment optimal, ni trop tôt (comme en maintenance préventive classique), ni trop tard (comme en maintenance corrective). Pour les pompes, cela se traduit par une meilleure planification des interventions, une réduction significative des arrêts non planifiés et un allongement de la durée de vie des composants critiques.

Ainsi, l'intégration de la maintenance prédictive dans la gestion des systèmes de pompage représente une avancée majeure, à la fois sur le plan technique, économique et environnemental, en permettant une exploitation plus intelligente et plus durable des installations industrielles toujours en quête de puissance, beaucoup de types de pompes ont été inventés afin de répondre aux besoins actuels dans le domaine de l'extraction. Plusieurs types de pompe de forage, (duplex double effet et triplex simple effet) ont été inventés et chacune d'entre elles possède ses propres caractéristiques, mais ont toutes le même mode de fonctionnement.

La maintenance prédictive permet de détecter d'éventuelles apparition d'anomalies par le biais d'une intelligence artificielle et notamment l'apprentissage automatique constitué d'algorithmes d'apprentissage qui permettent de faire des prédictions de très grande précision et à long terme grâce à leur capacité à inférer des modèles prédictifs qui se basent sur l'exploitation des historiques des données collectées effectuent des opérations de maintenance tout en optimisant le taux de disponibilité des machines et augmentant ainsi leur productivité.

Ce travail est consacré au diagnostic et à la maintenance prédictive de la pompe triplex. Nous avons réalisé plusieurs simulations avec le logiciel SIMSCAPE sous MATLAB, un programme utilisé pour détecter d'éventuelles anomalies de la pompe. Pour cela, nous avons délibérément créé trois défauts dans la machine. Connaître le temps de défaillance prévu nous aide à déterminer le moment optimal pour planifier la maintenance de votre équipement, car une maintenance inutile peut s'avérer coûteuse en maintenance programmée (préventive). [1]

La mémoire est structurée en quatre chapitres, en dehors de l'introduction générale, la conclusion générale et l'annexe

Le premier chapitre est consacré à l'étude théorique de la maintenance, la définition générale, la classification de la maintenance, les buts et l'importance de la maintenance, classification des défaillances, les objectifs généraux de la maintenance, les niveaux de maintenance les types de maintenance.

Le deuxième chapitre sera consacré sur la définition générale de maintenance prédictive et leur importance, avantages, inconvénients, et les techniques de la maintenance prédictive et à la fin du chapitre nous parlons de MATLAB dans la maintenance prédictive et apprentissage automatique (Machine Learning).

Le troisième chapitre aux généralités des pompes avec ses types et à la présentation des pompes triplex et leur principe de fonctionnement, Rôle de la pompe triplex avec ses avantages et ses inconvénients, à la fin de ce chapitre on a traité les parties de la pompe triplex

Et le quatrième et le dernier chapitre nous effectuerons la simulation du comportement de la pompe Triplex sous Matlab.

Chapitre I

**Généralité sur
la maintenance**

I.1 Introduction :

Les activités de maintenance, entendues comme le dépannage des équipements, existent depuis longtemps. Toutefois, elles étaient initialement peu structurées et rarement confiées à du personnel spécialisé, en l'absence de méthodes ou de procédures formalisées. Ces interventions se limitaient souvent à la réparation après défaillance, sans réelle prise en compte d'une approche préventive, c'est-à-dire d'actions destinées à anticiper et éviter les pannes. La formalisation du concept de maintenance est relativement récente. Elle s'est développée en réponse à l'automatisation croissante des systèmes de production, à la complexification des enjeux économiques et industriels, ainsi qu'aux exigences réglementaires de plus en plus strictes en matière de sécurité des personnes et de protection de l'environnement.

Aujourd'hui, la maintenance ne se limite plus à la simple réparation ou à l'entretien des machines. Elle s'inscrit dans une vision globale qui couvre l'ensemble du cycle de vie des équipements : depuis le choix et la conception des matériels, en passant par leur mise en service, l'élaboration des plans de maintenance, jusqu'à l'organisation logistique des interventions et le suivi de l'évolution des systèmes dans le temps.

I.2 Entretien et maintenance :

L'entretien se limite à intervenir sur un système défaillant pour rétablir la production et réaliser les opérations courantes recommandées par le constructeur. Il ne prend pas en compte les spécificités des conditions de fonctionnement (cadence, ancienneté, température ambiante, etc.). Par conséquent, cela peut conduire à des interventions mal ajustées (trop ou trop peu d'entretien), sans évaluation préalable ni analyse ultérieure.

Entretenir, c'est subir – alors que maintenir, c'est prévoir et anticiper. En effet, la maintenance intègre les objectifs de production et la connaissance du comportement des équipements, considérant les notions de « bon état » et de « rendement » comme relatives. Grâce à une démarche réfléchie et une collaboration étroite avec la production, la maintenance contribue à l'amélioration de la productivité.

Son objectif principal est d'optimiser en permanence la disponibilité des moyens de production, participant ainsi directement à la performance globale de l'entreprise.

Aujourd'hui, la maintenance est reconnue comme une activité nécessaire et génératrice de profit, contrairement à l'entretien traditionnel, qui était perçu comme une charge financière.

I.3 Classification des défaillances :

I.3.1 Définitions:

I.3.1.1 La défaillance :

D'après la norme AFNOR 60010X : 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.

I.3.1.2 Défaut:

Un défaut est tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique de référence lorsque celui-ci est en dehors des spécifications.

I.3.1.3 La panne :

État d'un bien inapte à accomplir une fonction requise, excluant l'inaptitude due à la maintenance préventive ou à d'autres actions programmées ou à un manque de ressources extérieures. Remarque : Après une défaillance, le bien est en panne, totale ou partielle. Une défaillance est un événement à distinguer d'une panne qui est un état.

I.3.1.4 La réparation :

Ce sont les actions physiques exécutées pour rétablir la fonction requise d'un bien en panne.

I.3.1.5 Le dépannage :

Ce sont les actions physiques exécutées pour permettre à un bien en panne d'accomplir sa fonction requise pendant une durée limitée jusqu'à ce que la réparation soit exécutée.

I.3.1.6 Les causes de défaillance :

Ce sont les raisons de la défaillance. Les raisons peuvent résulter d'au moins un des facteurs suivants : défaillance due à la conception, à la fabrication, à l'installation, à un mauvais emploi, par fausse manœuvre, à la maintenance. [2]

I.4 Définition de La Maintenance :

La maintenance est un domaine stratégique dans la gestion des systèmes industriels. Elle ne se limite pas à la simple réparation des équipements en panne, mais constitue un ensemble structuré d'actions visant à garantir la fiabilité, la disponibilité et la sécurité des installations techniques tout au long de leur cycle de vie.

Selon la norme NF EN 13306 publiée par l'AFNOR, la maintenance est définie comme :

« L'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management, durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise. » (AFNOR, 2001) [1]

Ainsi, la maintenance est aujourd'hui considérée comme un levier majeur de performance industrielle, intégrant des considérations économiques, technologiques, sécuritaires et environnementales.

I.5 Orientation et planification de la maintenance :

La politique de maintenance représente l'ensemble des orientations stratégiques et des choix organisationnels qu'une entreprise adopte pour assurer la gestion efficace de la maintenance de ses équipements. Elle constitue un cadre de référence qui définit les objectifs, les méthodes, les ressources et les niveaux de maintenance à mettre en œuvre, en fonction des contraintes techniques, économiques, humaines et environnementales propres à chaque contexte industriel.

L'élaboration d'une politique de maintenance cohérente permet de répondre à plusieurs enjeux majeurs : [3]

- ✓ Assurer la disponibilité et la fiabilité des installations de production.
- ✓ Réduire les coûts globaux de maintenance et d'exploitation.
- ✓ Optimiser la durée de vie des équipements.
- ✓ Préserver la sécurité des opérateurs et la conformité aux réglementations en vigueur.
- ✓ Anticiper les défaillances à travers des approches préventives ou prédictives.

Dans la figure (I.1) nous présentons les différentes politiques suivant le type de maintenance étudié. Alors que la mise en place d'opérations correctives ne dépend que de l'occurrence d'une panne, les maintenances préventives peuvent être programmées en fonction de différents paramètres. [4]

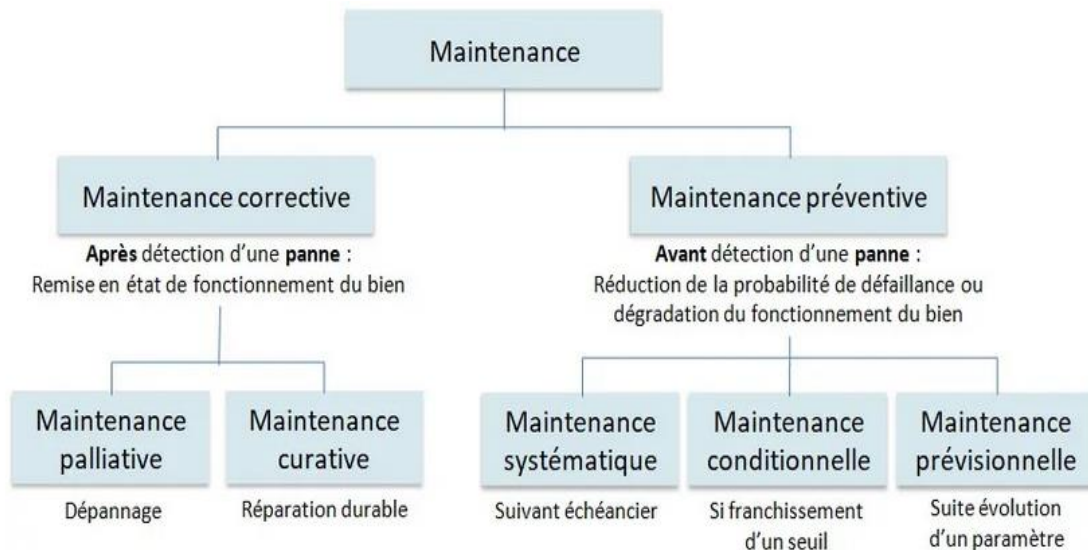


Figure I:1: Différentes politiques suivant le type de maintenance étudiée.

I.6 Les type de maintenance :

I.6.1 Maintenance Corrective :

Selon la définition de l’AFNOR, la maintenance corrective est : « une maintenance réalisée après la survenue d’une panne, visant à restaurer un bien dans un état lui permettant d’assurer une fonction requise ».

Elle intervient donc après un dysfonctionnement, un incident ou un imprévu, dans le but de remettre en service un équipement. Cette remise en état peut prendre la forme d’un dépannage, d’une réparation ou du remplacement de composants défectueux.

Il existe deux formes de maintenance corrective :

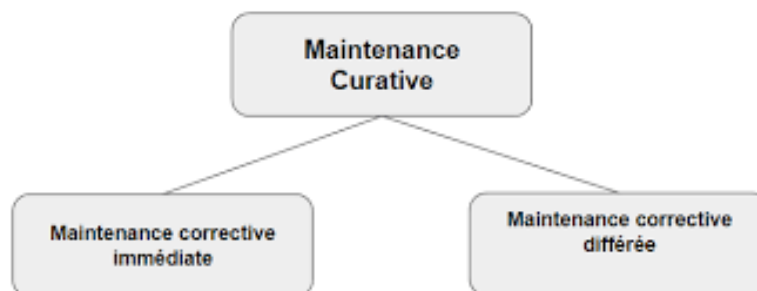


Figure I:2: Maintenance corrective.

I.6.1.1 Maintenance palliative :

La maintenance palliative se rapporte au dépannage temporaire. Elle permet de remettre en état de marche un équipement ou un outil de façon provisoire, en attendant une réparation complète. Ce type de maintenance vise à éviter une interruption totale de la production, en permettant une reprise en mode dit « dégradé ».

- **Dépannage** : Il s'agit d'actions techniques permettant à un bien de fonctionner temporairement jusqu'à la réalisation d'une réparation définitive.

Exemple : Si un tuyau d'arrosage est percé, appliquer du ruban adhésif sur la fuite constitue une maintenance palliative.

I.6.1.2 Maintenance curative :

La maintenance curative vise à éliminer à la fois les causes et les effets de la panne. Contrairement à la maintenance palliative, elle implique une intervention complète et durable, souvent par le remplacement de la pièce endommagée. L'équipement retrouve ainsi son fonctionnement normal. [5]

- **Réparation** : Ensemble d'actions techniques visant à rétablir le bon fonctionnement d'un bien en panne.

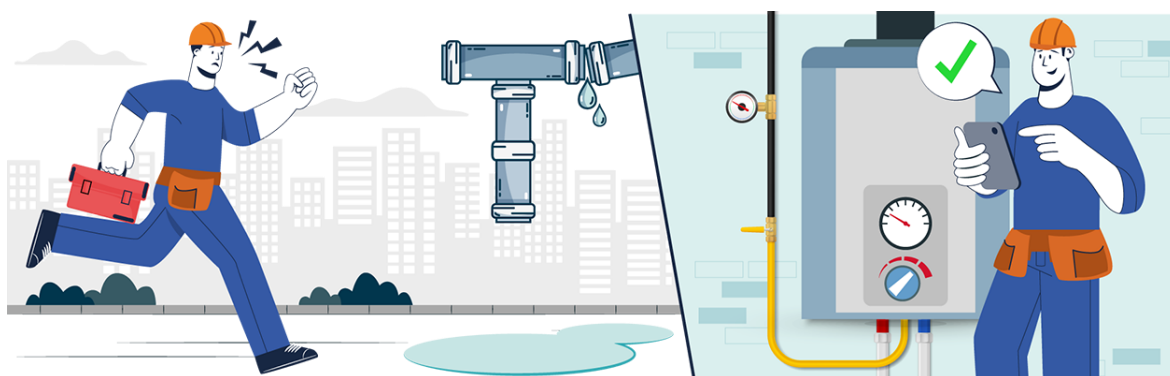


Figure I:3: Exemple d'opération de maintenance curative urgente.

I.6.2 Maintenance préventive :

Selon la définition de l'AFNOR, la maintenance préventive est une « maintenance réalisée à des intervalles définis ou selon des critères spécifiques, destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien ».

Comme son nom l'indique, la maintenance préventive vise à anticiper les problèmes en assurant un entretien régulier d'un équipement ou d'un bien. Elle repose sur des contrôles effectués conformément à des normes établies, aux recommandations du fabricant, mais aussi en tenant compte de l'expérience humaine et des historiques d'intervention liés à l'équipement.

Les objectifs de la maintenance préventive sont de :

- ✓ Assurer la disponibilité optimale du bien,
- ✓ Prolonger sa durée de vie,
- ✓ Réduire la fréquence des pannes et donc des interventions correctives,
- ✓ Maîtriser les consommations d'énergie et de pièces de rechange, contribuant ainsi à une meilleure gestion des stocks.

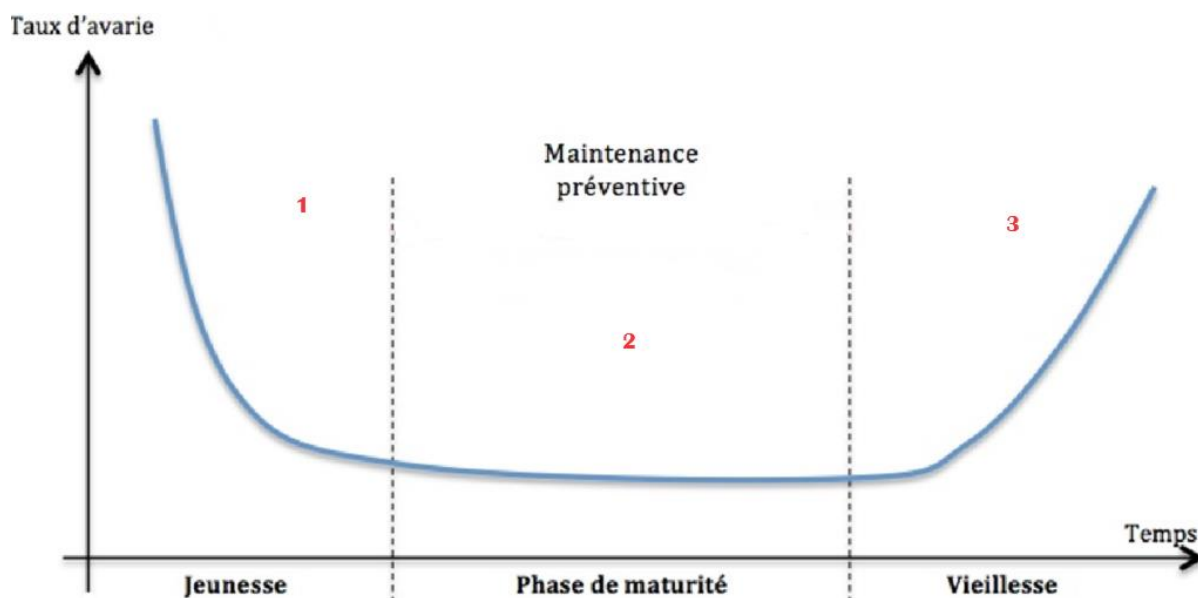


Figure I:4: Courbe Baignoire.

On distingue plusieurs formes de maintenance préventive :

I.6.2.1 Maintenance systématique :

Cette maintenance est planifiée selon un calendrier précis, basé sur le temps d'utilisation ou le nombre d'unités consommées, sans examen préalable de l'état du bien.

La périodicité des interventions est déterminée à partir de la mise en service de l'équipement ou après une révision partielle ou totale.

C'est une maintenance préventive effectuée selon un échéancier établi selon un temps. Pour maintenir le système dans l'état avec de ses performances initiales, on procède à différentes opérations qui peuvent être :

➤ Le remplacement :

- ✓ L'huile des mécanismes en mouvement.
- ✓ Des filtres.
- ✓ Des roulements et des paliers.
- ✓ Des joints d'étanchéité.

➤ Le réglage :

- ✓ Des jeux.
- ✓ Des tensions de courroie.
- ✓ Des températures.

➤ Le contrôle :

- ✓ Niveau d'huile.
- ✓ Bocages des boulons.

Exemple : Le remplacement régulier de l'huile d'une machine au bout d'un certain nombre de semaines d'usage, sans vérification préalable, relève de la maintenance systématique.

I.6.2.2 Maintenance conditionnelle :

Cette forme repose sur la surveillance continue ou ponctuelle de l'équipement, déclenchée par un événement spécifique (auto-diagnostic, données issues de capteurs, etc.). Elle s'appuie sur des techniques telles que la tribologie ou la thermographie infrarouge afin

d'intervenir au moment précis où le bien atteint un seuil d'usure ou de dégradation défini à l'avance. L'objectif est d'effectuer l'intervention adéquate au bon moment, optimisant ainsi les coûts.

Exemple : L'analyse régulière de l'huile d'une machine permet de détecter des contaminants, l'usure de pièces ou la dégradation du lubrifiant, et de procéder à son remplacement dès que ses caractéristiques ne garantissent plus un bon fonctionnement.

I.6.2.3 Maintenance prévisionnelle :

Parfois appelée maintenance prédictive, elle est définie par l'AFNOR comme une maintenance conditionnelle basée sur des prévisions issues de l'analyse et de l'évaluation de paramètres représentatifs de la dégradation de l'équipement.

Elle permet d'anticiper précisément les besoins d'intervention en prévenant les pannes ou défaillances avant qu'elles ne surviennent. Cette approche, souvent qualifiée de maintenance 4.0, s'appuie sur une surveillance continue de divers paramètres, seuils et données (par exemple via un logiciel GMAO), pour planifier la bonne opération au moment opportun. [6]

I.7 Objectifs de la maintenance dans l'Entreprise :

La maintenance constitue aujourd'hui un élément essentiel du service après-vente proposé par les fabricants. Elle est perçue comme un indicateur de qualité et un facteur de différenciation entre les marques. Une entreprise ou une unité de production qui néglige la maintenance, ou qui en applique une mauvaise gestion, s'expose à des pertes importantes. Cela résulte souvent d'une méconnaissance du cycle de vie des équipements ou d'un manque d'attention à la préservation des outils de production.

Les objectifs d'un service maintenance varient selon la nature et l'activité de l'entreprise. Leur atteinte dépend de la capacité du gestionnaire à maîtriser les paramètres techniques et organisationnels propres à son environnement industriel.

I.8 Objectifs généraux de la maintenance :

La maintenance industrielle ne se limite pas à la réparation des équipements défectueux. Elle constitue une fonction stratégique qui vise à garantir la disponibilité, la fiabilité et la sécurité des moyens de production. Ses objectifs s'inscrivent à la fois dans une logique technique, économique, environnementale et sécuritaire.

Parmi les objectifs généraux de la maintenance, on distingue notamment :

- ✓ **Assurer la disponibilité des équipements** : L'un des objectifs fondamentaux de la maintenance est de maximiser le temps de fonctionnement des installations. Une bonne disponibilité permet d'éviter les interruptions de production et de répondre efficacement aux exigences de rendement industriel.
- ✓ **Améliorer la fiabilité** : Il s'agit de garantir que les équipements remplissent leur fonction sans défaillance sur une période donnée. Une fiabilité accrue réduit les interventions d'urgence, améliore la planification des opérations et renforce la qualité du produit final.
- ✓ **Optimiser les coûts d'exploitation** : En adoptant une stratégie de maintenance adaptée (préventive, conditionnelle ou prédictive), il est possible de réduire les coûts liés aux arrêts non planifiés, aux réparations majeures, au stockage de pièces de rechange et à la consommation énergétique.
- ✓ **Prolonger la durée de vie des équipements** : Un entretien régulier et ciblé permet de retarder l'usure prématurée des composants, de maintenir les performances d'origine des machines et de retarder les investissements de remplacement.
- ✓ **Garantir la sécurité des personnes et des biens** : La maintenance participe activement à la prévention des risques industriels en maintenant les équipements dans un état sûr. Elle contribue ainsi à la conformité avec les réglementations en vigueur en matière de sécurité et de santé au travail.
- ✓ **Réduire l'impact environnemental** : Une maintenance efficace limite les fuites, les pertes d'énergie, les émissions non contrôlées ou encore les accidents industriels, ce qui permet de respecter les normes environnementales et de s'inscrire dans une démarche de développement durable.

I.9 Niveaux de Maintenance :

Un niveau de maintenance se définit par rapport :

1. A la nature de l'intervention.
2. A la qualification de l'intervenant.
3. Aux moyens mis en œuvre.

Le degré de développement de la maintenance est classifié en 5 niveaux. Ces niveaux sont donnés par la norme à titre indicatif pour servir de guide et leur utilisation pratique n'est

1	Réglage simple ou échange de consommable, sans démontage	Opérateur	Nettoyage, remise à niveau de l'huile
2	Action peu complexe, sur place	Technicien	Changement d'un filtre
3	Action peu complexe, sur place ou en atelier	Technicien spécialisé	Changement d'une pompe
4	Intervention spécifique, en atelier spécialisé	Équipe spécialisée	Analyse vibratoire
5	Intervention réalisée par le constructeur ou société agréée	Constructeur	Réparation, remise en conformité

Table I-1: Niveaux de maintenance.

Concevable qu'entre des parties qui sont convenues de leur définition précise selon le type de bien maintenir.

1er niveau :

Réglages simples prévus par le constructeur au moyen d'éléments accessibles sans aucun démontage ou ouverture de l'équipement, ou échanges d'éléments consommables accessibles en toute sécurité, tels que voyants ou certains fusibles, etc...Ce type d'intervention peut être effectué par l'exploitant du bien, sur place, sans outillage et à l'aide des instructions d'utilisation. Le stock des pièces consommables nécessaires est très faible.

2e niveau :

Dépannage par échange standard des éléments prévus à cet effet et opérations mineures de maintenance préventive, telles que graissage ou contrôle de bon fonctionnement. Ce type d'intervention peut être effectué par un technicien habilité de qualification moyenne, sur place, avec l'outillage portable défini par les instructions de maintenance, et à l'aide de ces mêmes instructions. On peut se procurer les pièces de rechange transportables nécessaires sans délai et à proximité immédiate du lieu d'exploitation.

3e niveau :

Identification et diagnostic des pannes, réparations par échange de composants ou d'éléments fonctionnels, réparations mécaniques mineures et toutes opérations courantes de maintenance préventive telles que réglage général ou réalignement des appareils de mesure. Ce type d'intervention peut être effectué par un technicien spécialisé, sur place ou dans le local de maintenance, à l'aide de l'outillage prévu dans les instructions de maintenance ainsi que des appareils de mesure et de réglage, et éventuellement des bancs d'essais et de contrôle des équipements et en utilisant l'ensemble de la documentation nécessaire à la maintenance du bien ainsi que les pièces approvisionnées par le magasin.

4e niveau :

Tous les travaux importants de maintenance corrective ou préventive à l'exception de la rénovation et de la reconstruction. Ce niveau comprend aussi le réglage des appareils de mesure utilisés pour la maintenance, et éventuellement la vérification des étalons du travail par les organismes spécialisés. Ce type d'intervention peut être effectué par une équipe comprenant un encadrement technique très spécialisé, dans un atelier spécialisé.

5e niveau :

Rénovation, reconstruction ou exécution des réparations importantes confiées à un atelier central ou à une unité extérieure. Par définition, ce type de travaux est donc effectué par le constructeur, ou par le reconstruteur, avec des moyens définis par le constructeur et donc proches de la fabrication. [7]

I.10 Opérations de la maintenance :**I.10.1 Les inspections :**

Ce sont des activités de surveillances constituent à relever périodiquement des anomalies et exécuter des réglages simples ne nécessitant pas l'outillage spécifique ni l'arrêt de l'outil de production ou des équipements.

I.10.2 Les visite :

Ce sont les opérations de surveillances qui rentrent dans le cadre de la prédéterminée

I.10.3 Le dépannage :

C'est l'opération de la maintenance curative sur un matériel en panne en vue de le remettre en état de fonctionnement, compte tenu de l'objectif, une action de dépannage peut s'accommoder de résultat provisoire, donc elle sera suivie d'une réparation.

I.10.4 La réparation :

C'est une opération définitive et limitée en maintenance curative après la panne.

I.10.5 Les révisions :

Effectuées en vue d'assurer le bien contre toute défaillance majeure critique pendant un temps ou un nombre d'unité d'usage donné.

I.11 CONCLUSION :

La maintenance est une fonction complexe qui, selon le type de processus, peut être déterminante pour la réussite d'une entreprise. Les fonctions qui la composent et les actions qui les réalisent doivent être soigneusement équilibrées pour que les performances globales de l'outil de production soient optimisées. Pour être efficace, il faut d'abord avoir une idée aussi claire que possible des mécanismes qui influent sur les grandeurs significatives (nombre de pannes, temps de réparation, délais logistiques, coûts de maintenance préventive, coûts du stockage des matières, actions de communication, etc.). Il faut ensuite mesurer ces grandeurs et construire des indicateurs pour juger de l'état du système maintenance et pour identifier les points faibles de ce système. Sans oublier le côté HSE (Hygiène – Sécurité et Environnement) et avoir pour devise : pas d'accident et pas d'atteinte à l'environnement.

Chapitre II

**La Maintenance
prédictive**

II.1 Introduction :

La maintenance prédictive est aujourd'hui largement considérée comme la prochaine étape dans tout secteur d'activité comportant des équipements coûteux qui représentent un investissement important, en utilisant le machine learning pour contrôler les coûts de maintenance croissants de ces équipements. La maintenance prédictive permet de collecter des données auprès de sources multiples et variées, de les combiner, et d'utiliser les techniques de machine learning pour anticiper les défaillances potentielles des équipements, avant qu'elles ne surviennent. De nombreuses entreprises utilisent déjà des technologies permettant une surveillance constante. C'est notamment le cas avec les dispositifs connectés à l'Internet des objets (IoT), qui constituent un bon départ dans cette nouvelle voie. Mais il s'agit surtout, et c'est là un facteur clé, de ne pas se contenter de surveiller la production de différentes données (ce que font aujourd'hui de nombreuses entreprises) mais d'aller plus loin en utilisant des algorithmes avancés et le machine learning pour prendre des mesures à partir de perspectives acquises en temps réel. En passant à l'étape suivante, les entreprises les plus innovantes (indépendamment du type de machines et d'équipements dont elles doivent assurer la maintenance), voient dans la maintenance prédictive une source d'économies majeure, pas uniquement en mettant en place un système capable de fournir de simples éléments prédictifs, mais en revisitant et en optimisant leur stratégie de maintenance dans sa globalité et de haut en bas. Cela signifie:

1. Prendre en compte plusieurs stratégies de maintenance afin de déterminer la combinaison coûts/économies optimale en termes de maintenance prédictive et traditionnelle, peut-être même équipement par équipement
2. Ouvrir la voie à l'intelligence artificielle (IA) et à l'auto-maintenance en optimisant (et en automatisant) les prochaines étapes, dès lors que les systèmes prédictifs pointent une défaillance imminente, avec le déclenchement automatique d'une commande de travail, la notification d'un technicien ou d'une équipe, la passation d'une commande pour une pièce de rechange, etc.
3. Identifier comment réaliser au mieux les réparations nécessaires, via une analyse de second ordre ou secondaire. Cela signifie qu'il convient d'avoir un processus déjà en place pour permettre une couche plus profonde d'analyse, afin de déterminer le meilleur moment pour mettre l'équipement hors service et voir quelles réparations supplémentaires doivent éventuellement être réalisées simultanément pour éviter

d'avoir à immobiliser l'équipement peu de temps après, mais cette fois-ci pour un autre type de défaillance.

4. Déterminer si, grâce à la maintenance prédictive, les équipements disposent désormais de capacités supplémentaires, en diminuant leur temps d'immobilisation, et si ce temps peut être cédé à d'autres entreprises (généralement plus petites).

II.2 Importance de la maintenance prédictive :

Afin de comprendre ce qui rend la maintenance prédictive si attrayante, il est essentiel de distinguer les deux types de maintenance couramment utilisées : la maintenance réactive et la maintenance préventive.

II.3 Maintenance réactive et maintenance préventive :

Dans une approche de maintenance réactive, nous n'intervenons qu'une fois que l'équipement est tombé en panne. Cette approche peut être adéquate pour une simple ampoule électrique, mais les défaillances non planifiées et les temps d'arrêt peuvent s'avérer très coûteux et risqués pour les machines industrielles.

De nombreux opérateurs adoptent donc une stratégie préventive, en planifiant la maintenance à intervalles réguliers sans tenir compte de l'état réel de la machine. Cette approche atténue certes le risque de défaillance par rapport à une stratégie de maintenance réactive, mais elle entraîne des coûts de maintenance plus élevés, un temps d'immobilisation globalement plus long et une augmentation des stocks et des pièces de rechange. Elle ne permet pas non plus de prévenir les pannes, car l'état de l'équipement n'est évalué que périodiquement, au lieu d'être continuellement suivi et analysé en temps réel.

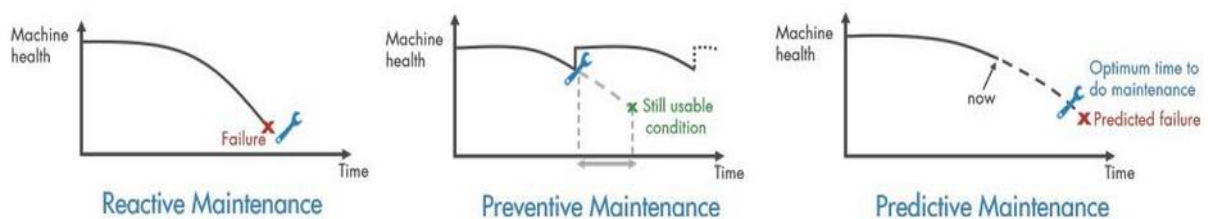


Figure II:1: Types de maintenance et leur approche de la gestion des défaillances.

II.4 Maintenance prédictive :

II.4.1 Définition :

Comme la maintenance préventive, la maintenance prédictive a de nombreuses définitions. Pour certains, la maintenance prédictive consiste à surveiller les vibrations des machines tournantes afin de détecter les problèmes naissants et d'éviter les pannes catastrophiques.

Pour d'autres, il s'agit de surveiller l'image infrarouge des appareillages électriques, des moteurs et autres équipements électriques afin de détecter les problèmes en développement. Le principe de base de la maintenance prédictive est que la surveillance régulière de l'état mécanique réel, de l'efficacité opérationnelle et d'autres indicateurs de l'état de fonctionnement des trains de machines et des systèmes de traitement fournira les données nécessaires pour garantir un intervalle maximal entre les réparations et minimiser le nombre et le coût des arrêts imprévus causés par les pannes des trains de machines.

La maintenance prédictive est bien plus que cela. C'est un moyen d'améliorer la productivité, la qualité des produits et l'efficacité globale des usines de fabrication et de production. La maintenance prédictive ne se résume pas à la surveillance des vibrations, à l'imagerie thermique, à l'analyse des huiles de lubrification ou à toute autre technique de contrôle non destructif commercialisée comme outil de maintenance prédictive.

La maintenance prédictive est une philosophie ou une attitude qui, en termes simples, utilise l'état de fonctionnement réel des équipements et systèmes d'une usine pour optimiser son fonctionnement global. Un programme complet de gestion de la maintenance prédictive utilise les outils les plus rentables (par exemple, surveillance des vibrations, thermographie, tribologie) pour obtenir l'état de fonctionnement réel des systèmes critiques de l'usine et, sur la base de ces données, planifier toutes les activités de maintenance selon les besoins. L'intégration de la maintenance prédictive dans un programme complet de gestion de la maintenance optimise la disponibilité des machines de traitement et réduit considérablement les coûts de maintenance. Elle améliore également la qualité des produits, la productivité et la rentabilité des usines de fabrication et de production. [8]

Le terme de maintenance prédictive n'est pas normalisé. On le trouve souvent employé pour caractériser les prévisions de maintenance en fonction de la tendance d'évolution du dysfonctionnement détecté et de l'estimation du temps de fonctionnement correct qui subsiste. Les conditions de mise en place d'une maintenance prédictive sur un équipement considéré peuvent être notées comme suit :

- L'équipement présente une dégradation progressive et détectable.
- Cette dégradation peut être saisie et mesurée à l'aide d'un paramètre.
- L'appareillage qui permet cette mesure est fiable et les résultats peuvent être interprétés par un personnel qualifié.
- La valeur initiale et la valeur limite du paramètre peuvent être fixées.
- La limite fixée correspond bien à un seuil significatif pour la perte de fonction de l'équipement (ou sa dangerosité).
- La périodicité de mesure est définie et elle est suffisante pour saisir toutes les évolutions du paramètre.

La surveillance du paramètre représentatif pourra se faire, suivant l'importance de l'équipement, d'une manière périodique (observation, relevés, rondes, ...) ou d'une manière continue à l'aide de capteurs fixés sur l'équipement.

Un programme de maintenance prédictive se compose de trois étapes : [8]

1. L'acquisition des données.
2. Traitement des données.
3. Prise de décision de la machine.

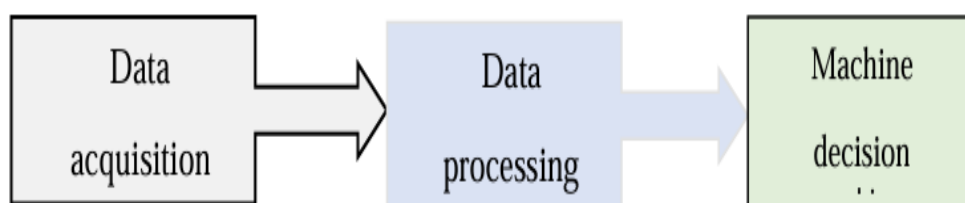


Figure II:2: Etapes d'une maintenance prédictive.

II.5 Fonctionnement de la maintenance prédictive

Au cœur d'une solution de maintenance prédictive se trouve un algorithme qui analyse les données issues des capteurs pour détecter les anomalies, établir un diagnostic des problèmes ou prédire la durée de vie utile restante (RUL) de l'équipement.

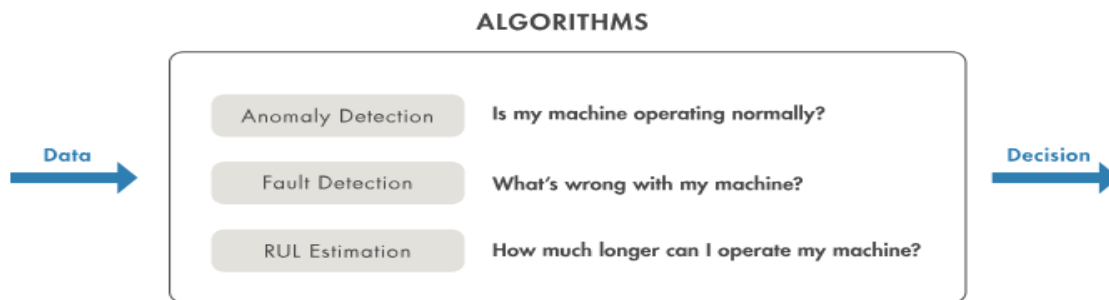


Figure II:3: Types d'algorithmes utilisés dans les solutions de maintenance prédictive

Pour développer cet algorithme, les ingénieurs doivent tout d'abord recueillir les données appropriées, puis utiliser des outils comme MATLAB® pour les prétraiter et en extraire des caractéristiques. Ces caractéristiques seront ensuite utilisées comme entrée d'un algorithme d'IA ou d'un algorithme statistique. Cet algorithme peut ensuite être déployé à grande échelle, que ce soit en l'embarquant directement sur un dispositif périphérique ou en l'intégrant aux systèmes IT/OT vers lesquels les données sont diffusées en streaming. Ce déploiement est indispensable pour bénéficier pleinement des avantages de la solution de maintenance prédictive.

Étapes suivies pour développer une maintenance prédictive:

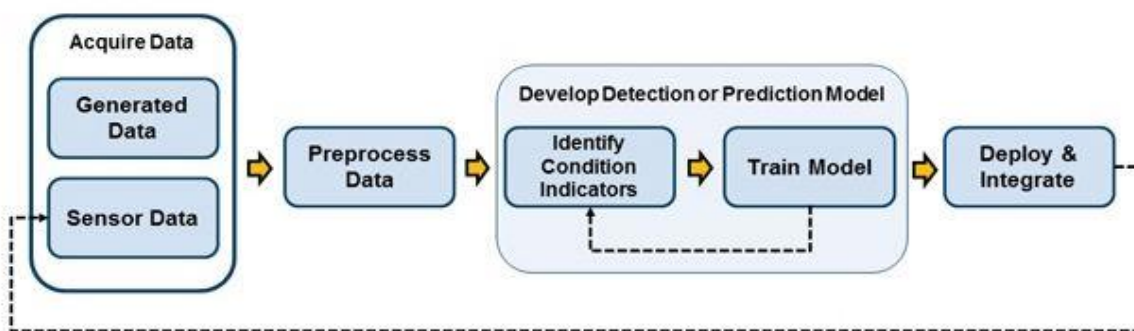


Figure II:4: Les étapes d'une maintenance prédictive.

II.5.1 Acquisition de données (Data acquisition) :

L'acquisition de données est le processus de collecte et de stockage de données provenant d'un processus physique dans un système, ce qui est essentiel pour la mise en œuvre d'une maintenance prédictive.

Les données collectées dans un programme de maintenance prédictive peuvent être classées en deux types principaux :

1. **Données d'événements :** Comprennent des informations sur ce qui est arrivé à l'actif et la maintenance qui lui a été appliquée.

2. **Données de surveillance** : Sont liées aux mesures de la santé du bien physique. Ils ont développé un cadre pour la notification d'informations entre les ressources de fabrication.

Il existe une grande variété de signaux, tels que :

- ✓ Les vibrations,
- ✓ L'acoustique,
- ✓ L'analyse de l'huile,
- ✓ La température,
- ✓ La pression,
- ✓ L'humidité,
- ✓ Le bruit, etc.

Afin de collecter ces données, de nombreux capteurs ont été développés, tels que :

- ✓ Les capteurs à ultrasons,
- ✓ Les accéléromètres,
- ✓ Les gyroscopes,
- ✓ Les capteurs de pluie, etc.

De nombreux sites et beaucoup d'industries travaillent à l'amélioration des technologies des capteurs et des ordinateurs, ce qui implique un moyen plus facile pour le stockage des données.

II.5.2 Traitement des données (Data processing) :

Les données acquises sont susceptibles de présenter des valeurs manquantes, incohérentes et du bruit. La qualité des données a un impact important sur les résultats obtenus par les techniques de l'exploration des données. Pour améliorer ces résultats, des méthodologies de prétraitement peuvent être appliquées.

Le prétraitement des données est l'une des étapes les plus critiques, qui traite de la préparation et de la transformation de l'ensemble de données initial. Les méthodes de prétraitement des données peuvent être divisées en trois catégories principales :

- ✓ Le nettoyage des données.
- ✓ La transformation des données.
- ✓ La réduction des données.

II.5.3 Prise de décision concernant la machine (Machine decision making) :

Il s'agit de la dernière étape de la décision de maintenance, qui peut être divisée en deux catégories principales :

1. **Le diagnostic** : Se concentre sur la détection, l'identification et l'isolation des défauts lorsqu'ils se produisent.
2. **Le pronostic** : Prétend de prédire les défaillances avant qu'elles ne se produisent, et est lié à la maintenance prédictive.

Le diagnostic et le pronostic sont complémentaires dans la mesure où le diagnostic ajoute de nouvelles informations provenant du processus.

Ces informations permettent de passer d'un problème non supervisé à un problème supervisé. Un modèle supervisé est toujours plus facile à développer et plus précis, ce qui implique un meilleur modèle de pronostic. [8]

II.6 Limites de la maintenance prédictive :

On peut résumer les limites de la maintenance prédictive en : [7]

- Nécessité de détecter les anomalies et de suivre leur évolution par la mesure d'un paramètre significatif d'où la notion d'accessibilité du matériel.
- Le coût des équipements de mesure.
- La formation poussée que certaines techniques exigent du personnel (analyse vibratoire en particulier).

II.7 Techniques de la maintenance prédictive :

II.7.1 Inspections visuelles :

L'inspection visuelle a été toujours la première méthode utilisée pour la maintenance prédictive. Presque le début de la révolution industrielle, les techniciens de maintenance effectuaient quotidiennement des visites guidées des systèmes de production et de fabrication critiques, pour tenter d'identifier les défaillances potentielles ou les problèmes liés à la maintenance qui pourraient avoir un impact sur la fiabilité, la sécurité et la qualité des produits. L'inspection visuelle reste un outil de maintenance prédictive viable, puisqu'il est simple rapide et efficient. Pour cela il devrait être inclus dans tous les programmes de gestion de la maintenance totale de toute industrie. [8]

II.7.2 Thermographie :

Utilisée pour surveiller l'état des machines, des structures et des systèmes d'une industrie.

Elle utilise des instruments conçus pour contrôler l'émission d'énergie infrarouge (température de surface) pour déterminer l'état de fonctionnement de l'organe examiné.

En détectant les anomalies thermiques (zones plus chaudes ou plus froides qu'elles ne devraient l'être), un technicien expérimenté peut localiser et définir une multitude d'anomalies et de problèmes naissants au niveau des installations techniques.

1. Types de systèmes thermographiques :

Trois types d'instruments sont généralement utilisés dans le cadre d'un programme efficace de maintenance :

1. Les thermomètres infrarouges.
2. Les scanners de lignes.
3. Les systèmes d'imagerie infrarouge.

La thermographie est une technique de maintenance prédictive utile pour les raisons suivantes :

- Il n'entre pas en contact avec la surface.
- La technique ne comporte pas d'actions dangereuses.
- Il peut être utilisé dans les zones dangereuses.
- Il n'est pas affecté par les ondes électromagnétiques.

Comme d'autres techniques prédictives, elle est utilisée pendant que les systèmes sont fonctionnés.

- Il fournit des informations instantanées.
- Les données peuvent être collectées et stockées sous forme numérique.

2. Applications de la thermographie :

La thermographie est appliquée pour la détection des défauts dans les domaines suivants :

- Équipements électriques.
- Équipements mécaniques.
- Systèmes énergétiques.
- Systèmes électroniques.

II.7.3 Analyse acoustique :

1. **Définitions** : Les ultrasons, comme l'analyse des vibrations, sont un sous-ensemble de l'analyse du bruit.

La seule différence entre les deux techniques est la bande de fréquence qu'elles surveillent. Dans le cas de l'analyse des vibrations la plage surveillée est comprise entre 1Hz et 30KHz. Les fréquences élevées sont utiles pour certaines applications, comme la détection de fuites qui créent généralement un bruit à haute fréquence causé par l'expansion ou la compression de l'air, des gaz ou des liquides lorsqu'ils traversent un orifice, ou une fuite dans un récipient sous pression ou sous vide.

Ces fréquences élevées sont également utiles pour mesurer les niveaux de bruit ambiant dans diverses zones d'une industrie.

2. **Applications** : On peut utiliser l'analyse des bruits pour :

- Contrôle des échangeurs de chaleur, chaudières, condenseurs et compresseurs.
- Détection des fuites de vapeur et d'air.
- Inspection des roulements et des systèmes mécaniques.
- Inspection des vannes et des purgeurs de vapeur.
- Inspection électrique.

II.7.4 Analyse vibratoire des machines tournantes :

En pratique, une bonne conception produira de faibles niveaux vibratoires dans une machine tournante. Cependant, la machine vieillissante, les fondations travaillent, les pièces se déforment et s'usent, et de légers changements dans ses propriétés dynamiques apparaissent. Les arbres se désalignent, les paliers s'usent, les rotors se déséquilibrent, les courroies se détendent, les jeux augmentent.

Tous ces facteurs se traduisent par une augmentation de l'énergie vibratoire qui excite les résonances et ajoute une charge dynamique considérable aux paliers.

Les vibrations recueillies lors des campagnes de mesures sont porteuses d'informations qui caractérisent l'état de fonctionnement de certains composants mécaniques constituant la machine analysée. C'est grâce à l'analyse de ces vibrations qu'il est possible de détecter les composants défectueux et éventuellement de les localiser.

Lorsqu'un certain seuil (correspondant à un niveau de vibration limite) fixé est atteint, il est possible d'estimer la durée de vie résiduelle du composant dans les conditions de fonctionnement données à partir de la connaissance des lois d'endommagement. [9]

II.8 MATLAB dans la maintenance prédictive :

L'un des grands atouts de MATLAB réside dans sa capacité à gérer des volumes importants de données industrielles issues de capteurs variés (vibration, température, courant, etc.) et à appliquer rapidement des méthodes avancées de traitement du signal. Il permet aussi d'entraîner et d'évaluer différents modèles de machine learning, sans avoir besoin d'intégrer plusieurs logiciels distincts. En plus, MATLAB offre des fonctionnalités de visualisation interactives et la possibilité de générer des rapports automatisés, facilitant ainsi la prise de décision pour les équipes de maintenance.

MATLAB est un environnement logiciel puissant et polyvalent, largement utilisé dans le domaine de la maintenance prédictive pour son efficacité dans le traitement des données, l'analyse des signaux, et le développement de modèles d'intelligence artificielle. Grâce à ses nombreuses boîtes à outils spécialisées, MATLAB offre une plateforme intégrée qui accompagne toutes les étapes clés du processus de maintenance prédictive, de l'acquisition des données à la visualisation des résultats.

Les ingénieurs utilisent MATLAB, Simulink et Predictive Maintenance Toolbox™ pour concevoir, tester et déployer des algorithmes personnalisés de surveillance d'état et de maintenance prédictive. [10]

Avec MATLAB et Simulink, nous pouvons :

- Accéder aisément aux données en streaming et archivées à partir du stockage sur le cloud, des bases de données, des systèmes d'historisation de données et des protocoles industriels.
- Explorer, extraire et classer les caractéristiques de manière interactive avec Diagnostic Features Designer.
- Développer des modèles prédictifs pour détecter les anomalies, identifier les défaillances et prédire la durée de vie utile restante (RUL).
- Créer des modèles basés sur la physique afin de générer des données de capteurs synthétiques et de déployer des jumeaux numériques.
- Générer du code C/C++ pour un traitement temps réel en périphérie.
- Intégrer vos systèmes IT/OT sans nécessiter de recodage : mettez à l'échelle les algorithmes dans le cloud sous forme de bibliothèques partagées, de packages,

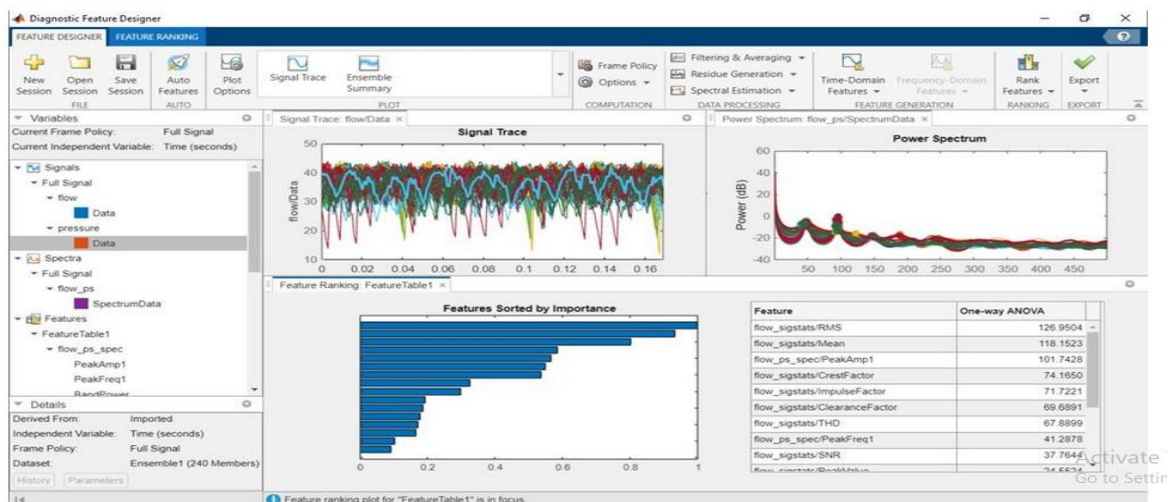


Figure II:5: Extraction et classement de caractéristiques.

a) Prétraitement des données avec MATLAB :

Avant d'exploiter les données collectées, il est souvent nécessaire de les nettoyer et de les préparer. MATLAB permet d'importer des données provenant de multiples sources, telles que des fichiers CSV, des bases SQL, ou des systèmes SCADA. Ensuite, grâce à la Signal Processing Toolbox, il est possible d'appliquer divers filtres (passe-bas, passe-haut, passe-bande) pour éliminer les bruits parasites et corriger les défauts d'acquisition. L'interpolation permet également de combler les valeurs manquantes afin d'obtenir des séries temporelles cohérentes.

b) Analyse de signaux industriels :

L'analyse des signaux est une étape clé pour détecter les signes précurseurs de panne. MATLAB permet d'extraire facilement des indicateurs caractéristiques comme la valeur RMS (Root Mean Square), la kurtosis, ou la skewness, qui renseignent sur la nature et l'évolution des défauts mécaniques. Par ailleurs, la transformée de Fourier (FFT) et le spectrogramme offrent une vision dans le domaine fréquentiel, utile notamment pour détecter des fréquences anormales liées à l'usure des roulements ou à des déséquilibres.

c) Extraction de caractéristiques pour la machine learning :

Pour que les algorithmes d'intelligence artificielle puissent détecter ou prédire des pannes, il faut transformer les données brutes en vecteurs de caractéristiques (features). MATLAB

facilite cette étape en permettant d'extraire et de combiner plusieurs indicateurs statistiques, temporels, ou fréquentiels. Ces caractéristiques serviront ensuite de variables d'entrée pour entraîner des modèles de classification ou de régression.

d) Modélisation prédictive :

MATLAB dispose de boîtes à outils spécialisées pour la machine learning, notamment la Statistics and Machine Learning Toolbox et la Deep Learning Toolbox. Ces outils permettent de créer différents types de modèles, tels que des forêts aléatoires, des machines à vecteurs de support (SVM), ou des réseaux de neurones profonds. Par exemple, un modèle de classification pour différencier un équipement sain d'un équipement en risque de panne peut être entraîné en quelques lignes de code

II.9 Déploiement de modèles MATLAB :

Une fois validés, les modèles peuvent être déployés dans un environnement industriel réel. MATLAB permet de générer du code C optimisé grâce à MATLAB Coder, facilitant ainsi l'intégration sur des systèmes embarqués, tels que des automates programmables industriels (PLC), des microcontrôleurs ou des plateformes IoT comme Raspberry Pi. Simulink peut également être utilisé pour développer des systèmes temps réel permettant une surveillance continue.

II.10 Visualisation et rapports d'analyse :

MATLAB offre des outils pour créer des tableaux de bord interactifs, notamment via le Live Editor, qui combine texte, code, graphiques et résultats. Cela permet aux équipes de maintenance de visualiser en temps réel l'état des équipements, les tendances d'usure et les alertes générées. En outre, la génération automatique de rapports PDF facilite la communication des résultats aux différentes parties prenantes, tout en assurant une traçabilité des interventions.

II.11 Conclusion :

Compte tenu des ressources aujourd'hui dépensées en maintenance dans les différents secteurs industriels, la maintenance prédictive constitue une avancée importante pour réduire les coûts, accroître la productivité et, in fine, rester pertinent à une époque où les entreprises de pointe, basées sur la data, gagnent des parts de marché. Bien que le coût initial de la mise en œuvre d'une stratégie de maintenance prédictive puisse être élevé, les entreprises démontrent

déjà que les gains de productivité qui en résultent, auxquels s'ajoute la réduction des coûts, constituent un retour sur investissement des plus intéressants.

La maintenance prédictive est une approche de la maintenance des équipements industriels (moteurs à réaction, éoliennes, pompes à pétrole, etc.) utilisant des algorithmes prédictifs. Ces algorithmes prédictifs exploitent des données issues de capteurs et d'autres informations pertinentes pour détecter des anomalies, surveiller l'état des composants et estimer la durée de vie utile restante (RUL). Grâce à la maintenance prédictive, nous pouvons programmer la maintenance au bon moment : ni trop tôt, ni trop tard.

Chapitre III

Généralité sur les

pompes

III.1 Introduction :

Les pompes sont des machines hydrauliques essentielles utilisées dans une multitude de secteurs industriels, domestiques et agricoles. Leur fonction principale est d'assurer le transfert de fluides (liquides ou gaz), en leur communiquant une énergie mécanique transformée en énergie hydraulique, généralement sous forme de pression ou de vitesse.

Elles jouent un rôle fondamental dans des domaines aussi variés que le traitement de l'eau, l'agroalimentaire, la chimie, la pétrochimie, l'énergie, les installations sanitaires, ou encore les systèmes de chauffage et de climatisation. La fiabilité, la performance et la disponibilité des pompes conditionnent directement la continuité et l'efficacité des procédés dans lesquels elles sont intégrées.

III.2 Principe de base :

Le principe de fonctionnement d'une pompe repose sur le transfert d'énergie à un fluide, afin de vaincre les pertes de charge dues à la gravité, aux frottements dans les canalisations, ou aux différences de pression entre deux points. Cette énergie est fournie par un moteur (électrique, thermique ou pneumatique) qui entraîne les organes mécaniques de la pompe.

III.3 Typologie générale :

On distingue principalement deux grandes familles de pompes selon leur principe de fonctionnement :

1. **Les pompes volumétriques** : elles déplacent le fluide en réduisant ou augmentant le volume d'une chambre fermée (ex. : pompes à piston, à membrane, à engrenages). Elles conviennent particulièrement aux applications nécessitant une haute pression et un débit constant.
2. **Les pompes dynamiques (ou centrifuges)** : elles utilisent la rotation rapide d'un élément (rouet) pour transmettre de l'énergie cinétique au fluide. Ces pompes sont largement utilisées pour le pompage de grands débits à pression modérée. [11]

III.4 Types de pompes :

III.4.1 Pompes dynamiques (ou centrifuges) :

Les pompes dynamiques, également appelées pompes centrifuges, constituent la catégorie de pompes la plus répandue dans les installations industrielles et domestiques. Leur fonctionnement repose sur le transfert d'énergie cinétique à un fluide par l'intermédiaire d'un organe tournant, généralement un rouet (ou impeller), qui convertit cette énergie en pression à travers un processus de guidage et de diffusion.

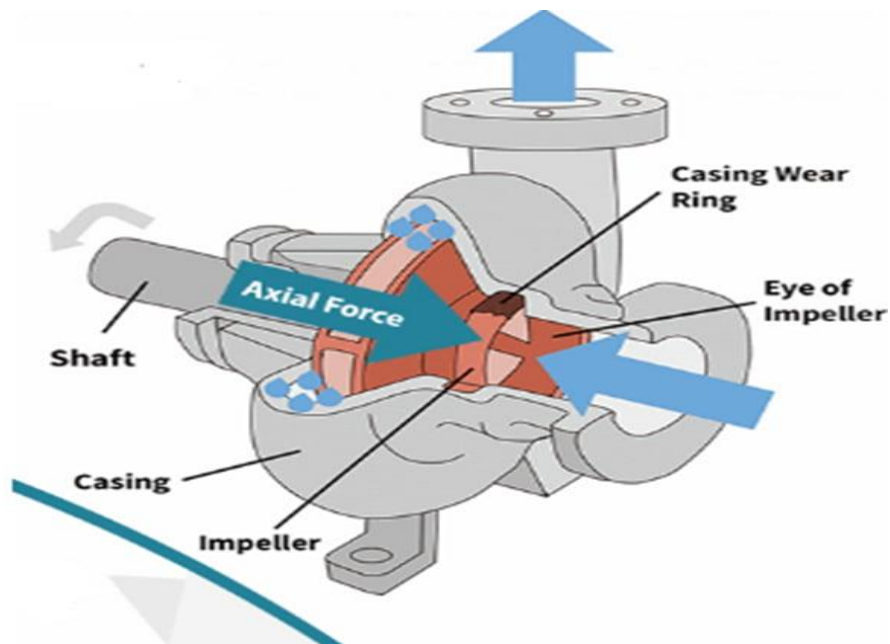


Figure III:1: Pompe centrifuge.

III.4.1.1 Principe de fonctionnement :

Une pompe centrifuge fonctionne selon le principe de la force centrifuge. Le fluide pénètre dans la pompe par l'axe central (entrée ou aspiration), est capté par le rouet en rotation, et est ensuite projeté vers l'extérieur grâce à la force centrifuge. En traversant le volute (ou diffuseur), l'énergie cinétique acquise par le fluide est progressivement convertie en énergie de pression. Cela permet au fluide d'être refoulé dans le circuit sous une pression suffisante pour vaincre les pertes de charge.

III.4.1.2 Caractéristiques techniques :

- Débit élevé (adapté aux grands volumes).
- Pression modérée à moyenne (souvent limitée par la conception du rouet).
- Fonctionnement continu, idéal pour les processus stables.
- Sensibilité au désamorçage (souvent nécessite une amorce ou un clapet anti-retour).
- Moins adaptée aux fluides visqueux ou contenant des particules solides, sauf modèles spécifiques (ex. : vortex).

III.4.1.3 Types de pompes centrifuges :

1. **Pompes centrifuges monocellulaires** : Un seul étage de pompage (rouet unique), utilisées pour des applications simples comme le pompage d'eau claire.
2. **Pompes centrifuges multicellulaires** : Plusieurs étages de compression pour atteindre des pressions plus élevées, utilisées dans les chaudières, les réseaux d'eau sous pression, etc.
3. **Pompes submersibles** : Intégrées dans le fluide à pomper, idéales pour les forages, les eaux usées, ou les nappes phréatiques.
4. **Pompes à turbine ou à canal latéral** : Destinées à des applications spécifiques (fluides à faible NPSH, faibles débits mais fortes pressions).

III.4.1.4 Avantages des pompes centrifuges :

- Simplicité de conception et faible coût d'investissement.
- Faible encombrement.
- Peu de pièces en mouvement → entretien facilité.
- Bon rendement énergétique sur une large plage de débits.

III.4.1.5 Inconvénients :

- Moins efficaces à basse vitesse ou faible débit,
- Nécessitent un amorçage préalable dans de nombreuses configurations,
- Moins adaptées aux liquides visqueux ou fortement chargés sans adaptation spécifique.

III.4.1.6 Applications industrielles courantes :

- Systèmes de distribution d'eau potable,
- Circuits de refroidissement et de chauffage,
- Transfert de liquides non visqueux dans les industries agroalimentaires, chimiques, textiles, etc.,
- Stations de pompage et irrigation. [12]

III.4.2 Pompes volumétriques :

Les pompes volumétriques sont des machines hydrauliques conçues pour aspirer et refouler un fluide en déplaçant un volume fixe de liquide à chaque cycle de fonctionnement. Contrairement aux pompes centrifuges, dont le débit dépend fortement de la pression, les pompes volumétriques assurent un débit quasi constant, quelle que soit la contre-pression, ce qui les rend particulièrement adaptées aux applications de dosage, de transfert haute pression, ou de fluides visqueux.

III.4.2.1 Principe de fonctionnement :

Le principe repose sur l'alternance de phases d'aspiration et de refoulement d'un fluide, via une chambre de volume variable. À chaque cycle, un volume de fluide est capturé, puis expulsé mécaniquement, garantissant un contrôle précis du débit.

Il existe deux grandes catégories de pompes volumétriques selon le type de mouvement du fluide :

A. Pompes à déplacement alternatif

B. Pompes à déplacement rotatif

III.4.2.2 Type de pompes volumétriques :

A. Pompes à déplacement alternatif :

Ces pompes utilisent un mouvement de va-et-vient (alternatif) pour déplacer le fluide. Elles comprennent :

1. Pompes à piston / plongeur :

- **Fonctionnement** : Un piston se déplace dans un cylindre pour aspirer et refouler le fluide.
- **Applications** : Systèmes haute pression, injection, nettoyage industriel, industrie pétrolière.
- **Avantage** : Très haute pression possible, bon rendement volumétrique.

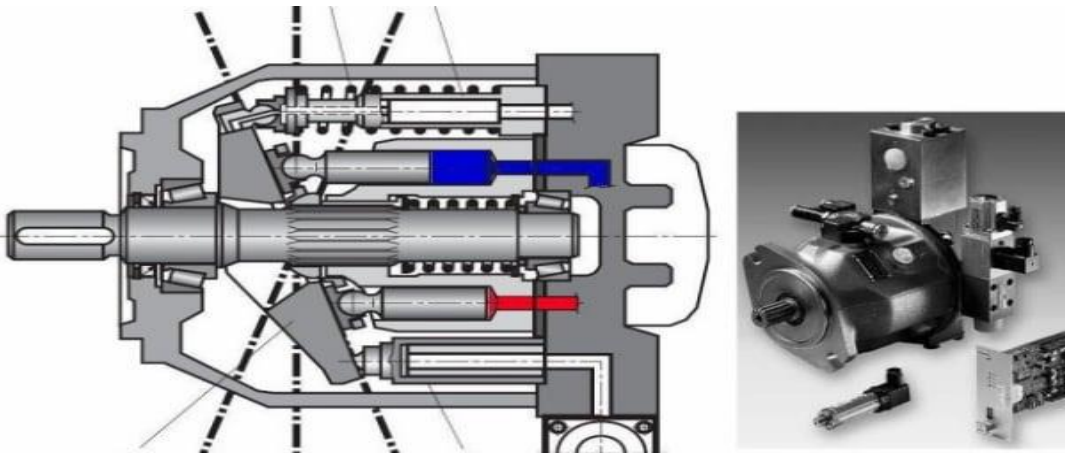


Figure III:2: Pompes à piston.

2. Pompes à membrane (ou diaphragme) :

- **Fonctionnement** : Une membrane flexible déforme une chambre pour aspirer/refouler le fluide.
- **Applications** : Industrie chimique, pharmaceutique, fluides corrosifs ou abrasifs.
- **Avantage** : Excellente étanchéité (pas de contact fluide/parties mécaniques).

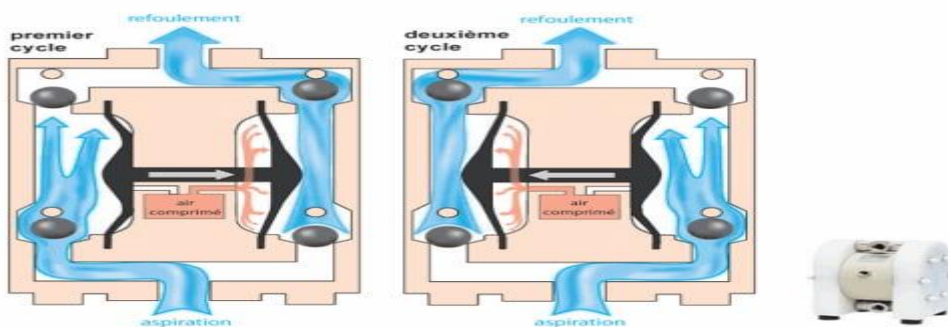


Figure III:3: Pompes à membrane.

3. Pompes péristaltiques :

- **Fonctionnement** : Le fluide est poussé dans un tube flexible par des galets rotatifs.
- **Applications** : Laboratoire, industrie alimentaire, applications médicales.
- **Avantage** : Aucun contact fluide/machine ; auto-amorçante.



Figure III:4: Pompes péristaltiques.

B. Pompes à déplacement rotatif :

Ces pompes déplacent le fluide au moyen d'éléments rotatifs (engrenages, vis, palettes...) tournant dans une enceinte fermée.

1. Pompes à engrenages :

- **Fonctionnement** : Deux engrenages s'engrènent et créent une aspiration/refoulement.
- **Applications** : Lubrification, hydrocarbures, huiles.
- **Avantage** : Compactes, robustes, fonctionnement stable.

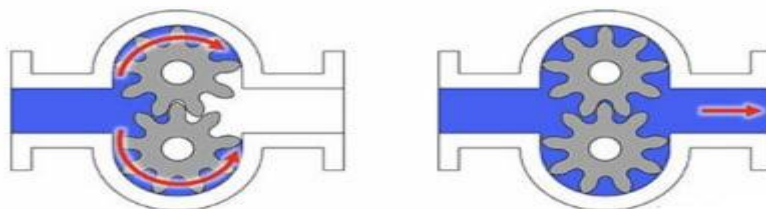


Figure III:5: Pompes à engrenages.

2. Pompes à palettes :

- **Fonctionnement** : Des palettes glissent dans un rotor excentré et déplacent le fluide.
- **Applications** : Circuits hydrauliques, industries chimiques.
- **Avantage** : Bonne régularité du débit.

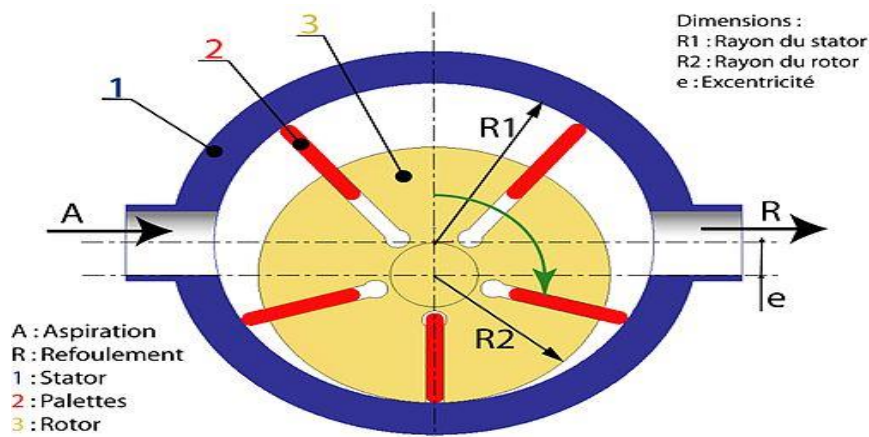


Figure III:6: Pompes à palettes.

3. Pompes à vis :

- **Fonctionnement** : Le fluide est déplacé longitudinalement par une ou plusieurs vis tournantes.
- **Applications** : Transfert de produits visqueux (miel, peinture, colles).
- **Avantage** : Faibles pulsations, débit stable, excellente pour produits sensibles.

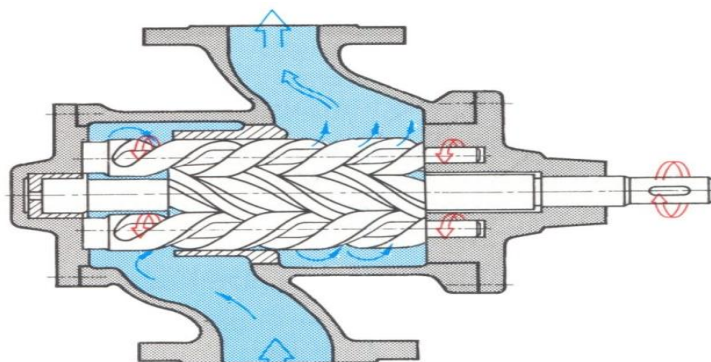


Figure III:7: Pompes à Vis.

III.4.2.3 Avantages des pompes volumétriques :

- Débit indépendant de la pression.
- Idéales pour fluides visqueux, chargés ou sensibles.
- Très efficaces pour les applications de dosage.
- Capables de fonctionner à haute pression.

III.4.2.4 Inconvénients :

- Sensibles aux surpressions (risque de casse si circuit bouché → soupape obligatoire),
- Entretien plus fréquent (joints, pistons, clapets),
- Rendement plus faible à haute vitesse que les pompes centrifuges.

III.4.2.5 Applications typiques :

- Industrie pétrolière (injection, forage),
- Industrie chimique (fluides agressifs ou corrosifs),
- Agroalimentaire (transfert de sirops, purées, sauces),
- Pharmaceutique (transfert stérile et précis),
- Systèmes hydrauliques (circuits de puissance). [13]

III.5 Critères de choix d'une pompe :

Le choix d'une pompe dépend de plusieurs paramètres, parmi lesquels :

- La nature du fluide (viscosité, température, abrasivité, corrosivité).
- Le débit et la pression requis.
- La hauteur manométrique totale (HMT).
- Les conditions d'installation (horizontale, submersible, auto-amorçante).
- La maintenance et la durée de vie attendue.

III.6 Pompe triplex :

Une pompe à piston triplex est une pompe volumétrique alternative utilisant seulement trois pistons. Ce type de pompe est souvent utilisé pour les applications haute pression, comme les systèmes hydrauliques. Grâce à sa conception robuste, elle est capable de pomper des fluides à haute viscosité et des fluides contenant des solides.

Le nom "triplex" vient du fait qu'elle comporte trois cylindres (3 pistons).

III.6.1 Principe de fonctionnement :

Le fluide est aspiré dans un cylindre, ou refoulé, par le piston qui lui est associé. Lorsqu'un piston est au plus près des soupapes d'aspiration et de refoulement, il commence à se déplacer linéairement vers le vilebrequin. En se rétractant, la dépression régnant dans le cylindre surmonte la pression du ressort de la soupape d'aspiration et le fluide est aspiré dans l'espace du cylindre ; ce mouvement représente la « course d'aspiration ». Lorsque le cylindre est complètement chargé, le piston se déplace linéairement vers les soupapes d'aspiration et de refoulement. À mesure que le piston se rapproche des soupapes, la surpression régnant dans le cylindre provoque la fermeture de la soupape d'aspiration et l'ouverture de la soupape de refoulement, le fluide est alors refoulé du cylindre par la soupape de refoulement.

Chaque piston agit successivement, selon un décalage angulaire de 120° sur le vilebrequin. Cela permet une répartition équilibrée de l'effort mécanique et un flux hydraulique relativement constant, ce qui réduit les pulsations par rapport à une pompe monocylindre.

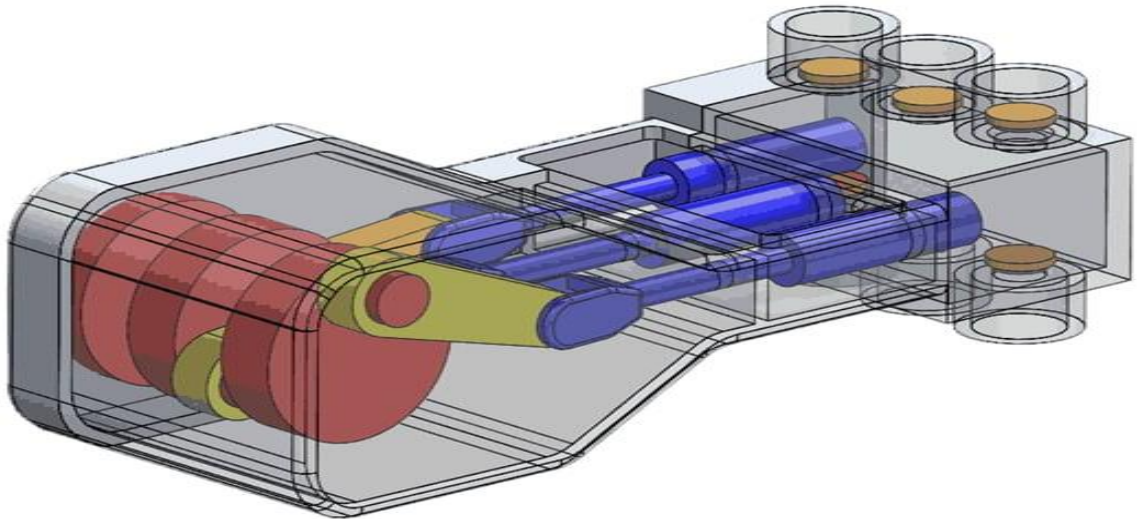


Figure III:8: La Pompe Triplex.

III.6.2 Constitution de la pompe triplex :

La conception de la pompe triplex repose sur une architecture mécanique robuste et une répartition équilibrée des efforts, assurant une meilleure stabilité du débit.

Les principaux composants d'une pompe triplex sont :

1) Tête de pompe (ou corps hydraulique) :

C'est la partie dans laquelle circule le fluide aspiré et refoulé. Elle comprend :

- Les chambres d'aspiration et de refoulement.
- Les clapets anti-retour (à bille, à ressort ou à siège) qui assurent l'orientation unidirectionnelle du fluide.
- Les orifices de raccordement aux conduites.

2) Plongeurs ou pistons :

- Ce sont les organes mobiles qui assurent le déplacement volumétrique du fluide.
- Généralement fabriqués en acier inoxydable, céramique ou chrome dur pour résister à l'abrasion et à la corrosion.
- Ils effectuent un mouvement linéaire alternatif et sont étanchéifiés par des joints haute pression (tresses, garnitures, ou bagues).

3) Bielle-manivelle (vilebrequin) :

- Transforme le mouvement rotatif du moteur en mouvement alternatif des pistons.
- Composé d'un vilebrequin, de bielles et de roulements.
- Bien équilibré pour réduire les vibrations et assurer un fonctionnement fluide.

4) Carter de transmission (ou carter d'huile) :

Contient les éléments mécaniques internes et l'huile de lubrification.

Assure :

- La lubrification des pièces en mouvement,
- La dissipation thermique,
- La protection contre l'usure.

5) Joints d'étanchéité :

- Empêchent les fuites de fluide à haute pression et la contamination du carter.
- Composés de joints toriques, bagues de guidage, et presse-étoupes.

6) Système de refroidissement (optionnel) :

- Sur certaines applications industrielles, un refroidissement par air ou liquide peut être intégré pour maintenir une température de fonctionnement stable.

7) Soupape de sécurité :

- Protège la pompe contre les surpressions accidentelles en déchargeant le fluide au-delà d'un seuil de pression prédéfini. [9]

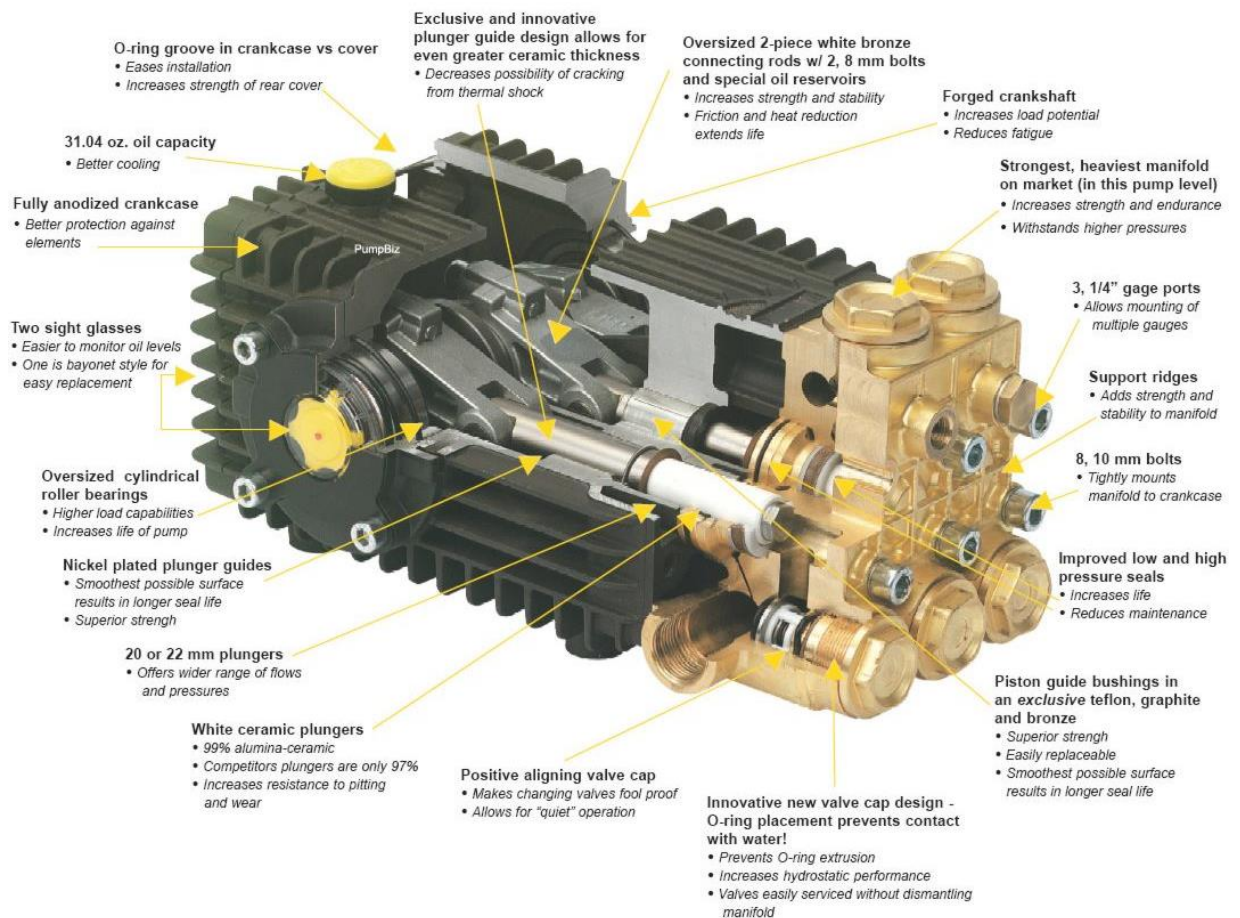


Figure III:9 : Composition de la pompe triplex

III.6.3 Applications :

- Nettoyage haute pression : (stations de lavage, nettoyage industriel)
- Industrie pétrolière / gaz : injection de produits chimiques, forages
- Hydrocurage : débouchage de canalisations

- Tests de pression (bancs d'épreuve)
- Pulvérisation agricole, brumisation sous pression

III.7 Élaboration du plan de maintenance des pompes Triplex :

III.7.1 Introduction

Ce chapitre présente les paramètres fonctionnels et opérationnels des pompes Triplex, les exigences de maintenance et le plan de maintenance.

Actuellement, la maintenance des pompes ne se résume pas à un ensemble de tâches assignées à une seule personne ou à un groupe de personnes. Certaines tâches sont effectuées par le service de maintenance, tandis que d'autres sont effectuées par le service d'exploitation.

Le service maintenance effectue davantage d'interventions mécaniques, réparations, modifications et révisions. Le service exploitation effectue davantage d'entretiens, de réparations, de remplacements et de réglages de routine et périodiques.

En effet, le service maintenance effectue une vidange de l'huile de lubrification de la partie mécanique tous les six mois. Cette opération comprend la vidange de l'huile usagée, le nettoyage du carter et des crépines, ainsi que la mise en place d'une nouvelle huile. Cette tâche est considérée comme la seule effectuée sur la pompe par le service maintenance (hors réparations majeures), une tâche qui devrait devenir la responsabilité du service exploitation.

Cependant, les problèmes liés à la pompe triplex surviennent principalement au niveau du FLE, géré par la zone d'exploitation. Il convient de noter qu'il n'existe aucun enregistrement des tâches de maintenance effectuées. Actuellement, une inspection de routine est effectuée, consistant à vérifier les composants de la pompe les plus sujets à l'usure et facilement accessibles après le retour de l'unité. Il s'agit des soupapes d'admission et de refoulement, ainsi que de leurs composants, tels que les inserts et les joints toriques.

Les composants soumis à une usure égale ou supérieure, tels que les garnitures ou la bague de retenue, ne sont pas inspectés régulièrement. En effet, leur inspection nécessite le démontage de composants tels que le piston et le support de garniture, une tâche avec des moyens considérables et qui demande un investissement en temps et en efforts jugé injustifié. Une fois l'inspection visuelle des composants effectuée et les critères nécessaires pour déterminer si leur état justifie un remplacement est nécessaire, la tâche devient encore plus difficile. Par conséquent, l'activité habituelle consiste à attendre que l'huile de lubrification de la garniture apparaisse sous forme d'une couche irrégulière à la surface du piston (ceci est dû à la

détérioration d'un composant). C'est alors, et seulement alors, que toutes les garnitures et la bague de retenue sont remplacées.

III.7.2 Problèmes liés à l'état et à l'entretien des pompes :

III.7.2.1 Analyse des problèmes :

Pour identifier les problèmes de manière plus technique, l'utilisation de diagrammes de cause à effet (Ishikawa) a été envisagée. Ces diagrammes ont été élaborés pour analyser les causes des problèmes suivants :

- L'état de la pompe affecte les paramètres de fonctionnement.
- Les dents de l'engrenage souffrent d'usure et d'érosion excessives.
- La durée de vie des garnitures est très courte.
- La durée de vie des inserts est très courte.
- L'huile PWE est en mauvais état.
- Le stock de pièces détachées est insuffisant.

Le premier véritable problème auquel les entreprises pétrolières est confronté (concernant les pompes) est la possibilité qu'une tâche ne soit pas exécutée, ou qu'elle soit exécutée de manière insatisfaisante, en raison de l'incapacité de la pompe à respecter les paramètres de fonctionnement souhaités. Il arrive par le passé, que des opportunités de travail ont été perdues en raison d'une planification inadéquate de la quantité et du type de pièces de rechange nécessaires lors d'une intervention de pompage, ou en raison d'autres imprévus ayant empêché la disponibilité des pompes au moment souhaité.

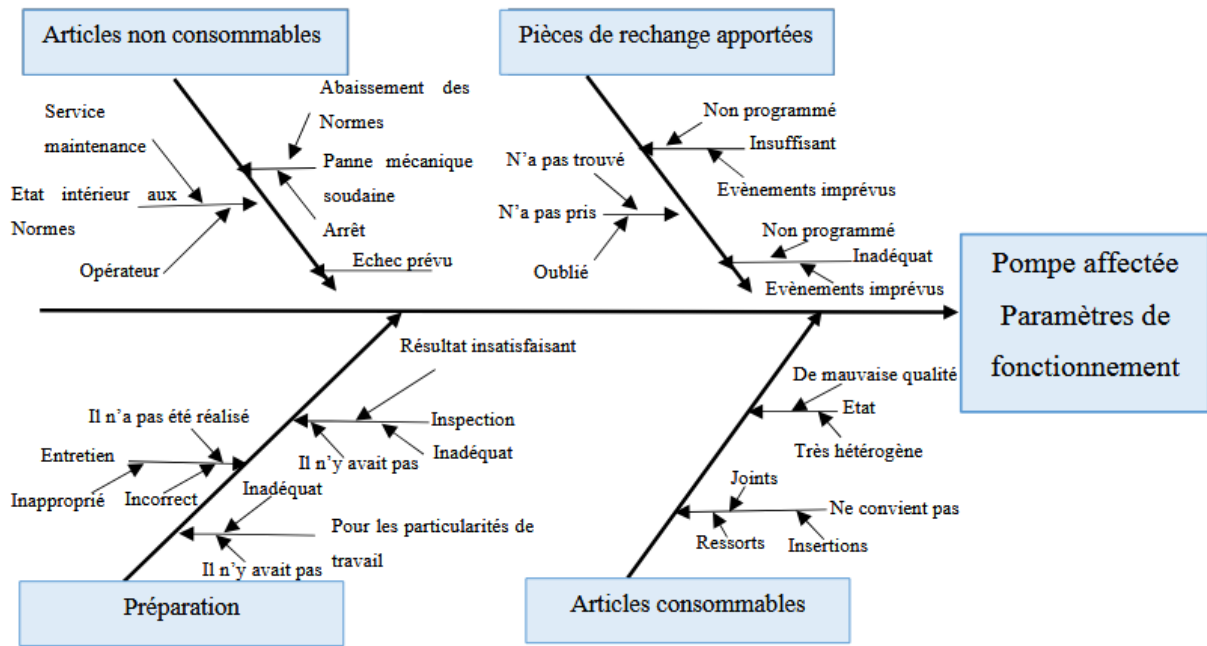


Figure III:10: Diagramme de cause à effet. La pompe affecte les paramètres de fonctionnement.

Sur les pompes en service aux chantiers, une érosion excessive de la surface des dents du vilebrequin est généralement observée, et la même situation est observée sur les dents de l'arbre de transmission.

Les pompes continuent de fonctionner malgré cela, et il est frappant de constater que le problème évident de cette usure ne semble susciter aucune réaction de la part du personnel, faute d'effet tangible (tel qu'une diminution de l'efficacité de pompage ou une augmentation de la consommation de carburant).

Un problème grave auquel l'organisation est confrontée est précisément son incapacité à accorder suffisamment d'importance aux spécificités non évidentes des événements.

L'ouverture du capot mécanique est une pratique courante, même dans des environnements non adaptés. La preuve en est la présence d'insectes de grande taille dans les filtres. Les vidanges d'huile semblent irrégulières : plusieurs unités ont constaté que l'huile était émulsifiée et dégageait une odeur d'huile en fin de vie due à une contamination, une dégradation, une oxydation ou une émulsifiations.

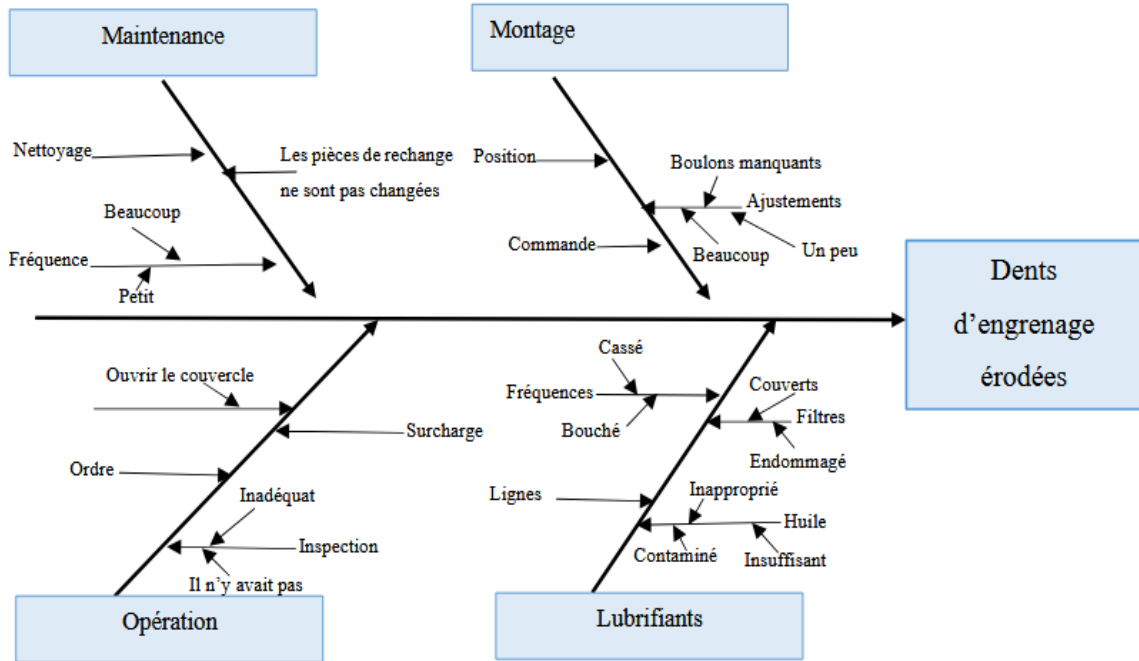


Figure III:11: Diagramme de cause à effet. Dents d'engrenage érodées.

Les bagues à l'intérieur du corps de la garniture sont des consommables. Le fabricant a effectué plusieurs tests de matériaux avant de sélectionner le matériau le plus adapté à l'huile utilisée et au type d'intervention sur une pompe triplex. Cependant, l'entreprise pétrolière utilise des pièces détachées fabriquées localement, dont la composition n'est pas garantie identique à celle de la pièce d'origine importée.

De plus, une huile non spécifiée par le fabricant est utilisée pour lubrifier la garniture. De ce fait, le système de lubrification du piston ne suit pas la tendance à l'usure attendue selon les pratiques internationales et, plus inquiétant encore, la tendance réelle est inconnue. La procédure d'assemblage n'est pas standardisée entre les opérateurs, et la maintenance se limite au remplissage d'huile et au remplacement des composants en cas de fuite.

Il n'existe pas de gestion spécifique de la planification des activités de maintenance en fonction du type d'intervention ou du fluide de fonctionnement utilisé par la pompe.

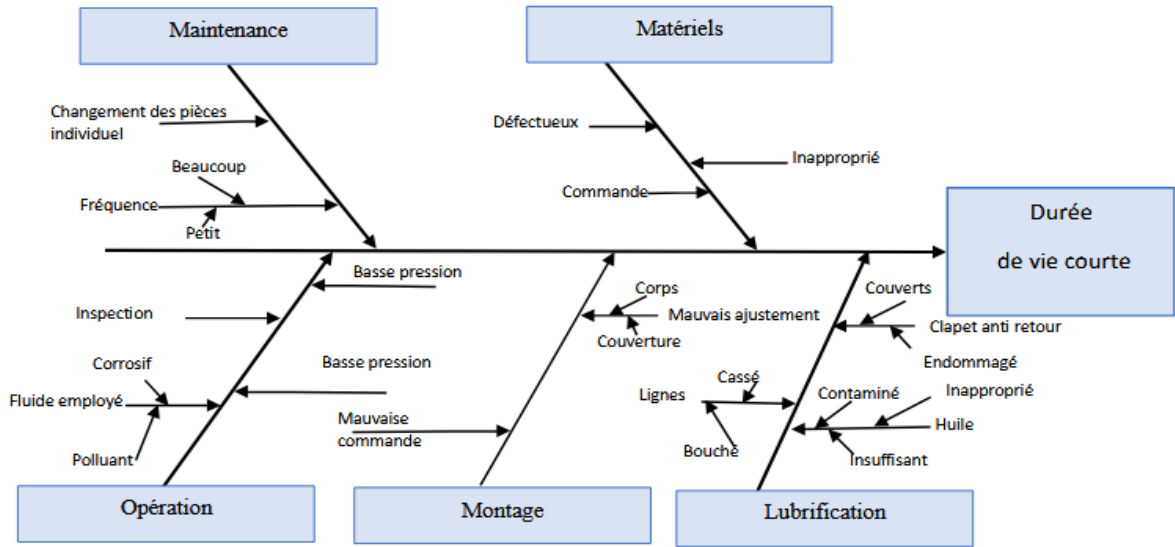


Figure III:12: Diagramme de cause à effet. Durée de vie du joint courte.

La durée de vie des inserts en fonctionnement est très variable. Le comportement de ces éléments est imprévisible, car les impuretés et les corps étrangers présents dans le fluide ne peuvent pas toujours être contrôlés. Dans le secteur des services pétroliers, le pompage exige un contrôle de l'uniformité du fluide pompé, mais certaines précautions peuvent être prises pour espacer les changements d'éléments. L'assemblage des vannes n'est pas standard, mais il n'est pas une cause fréquente de pannes ; il pourrait toutefois être amélioré en termes de fréquence et de méthode. En raison de problèmes d'approvisionnement en pièces détachées et de gestion des stocks, certains inserts ont perdu leurs propriétés, apparaissant excessivement vulcanisés et secs. Ces inserts peuvent parfois être utilisés par erreur.

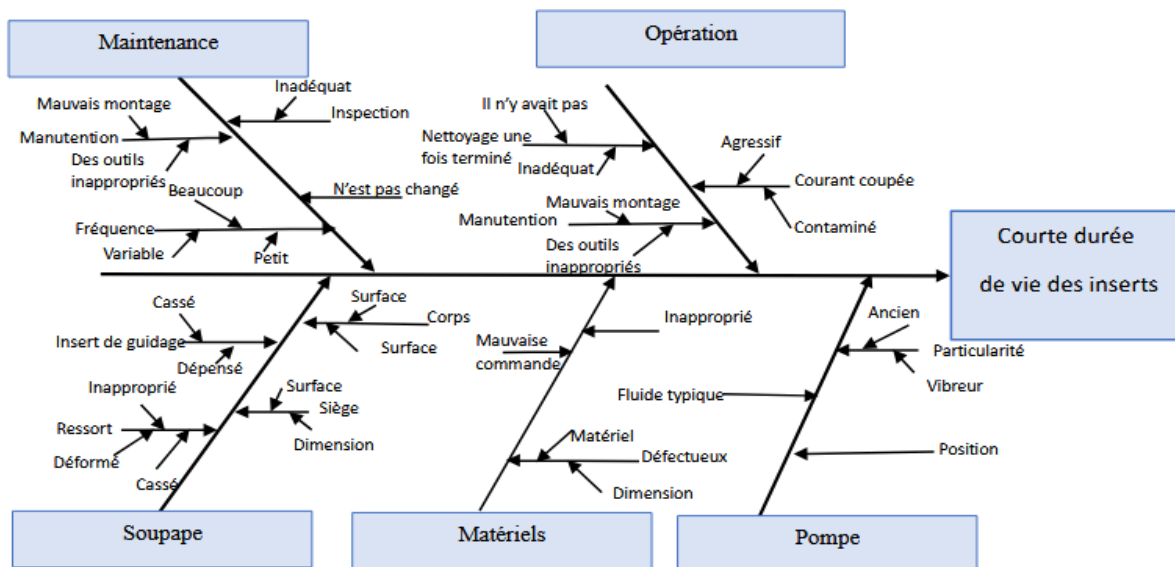


Figure III:13: Diagramme de cause à effet. Durée de vie de l'insert courte.

L'huile monograde utilisée pour lubrifier le corps mécanique convient parfaitement à ce type de travail. Cependant, il existe actuellement des huiles multigrades plus performantes et mieux adaptées, qui amélioreront certainement la lubrification. De plus, elles sont recommandées par les fabricants des pompes, mais leur remplacement n'est pas obligatoire. Actuellement, l'huile se détériore et n'est remplacée que lorsqu'un changement de propriétés est visible. Ce changement est visible par son odeur, sa couleur et son aspect ; lors de toutes les inspections de pompes que nous avons observées, l'huile était dans un état apparemment inacceptable et différait sensiblement de l'huile neuve. L'huile contient fréquemment des contaminants importants dus à l'ouverture du couvercle du corps mécanique, à une fermeture incorrecte ou à une contamination provenant d'autres sources. La fréquence des vidanges et des inspections doit impérativement être modifiée, et l'état de l'huile doit être examiné plus attentivement et selon des critères uniformes par les utilisateurs.

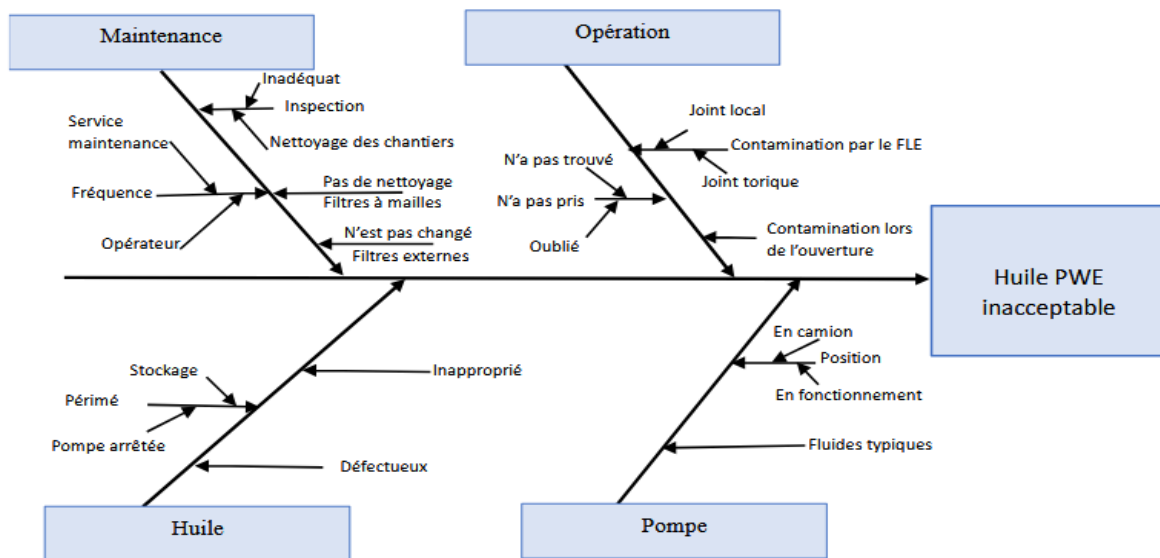


Figure III:14: Diagramme de cause à effet. Huile PWE non acceptable.

La gestion des stocks et des approvisionnements est un enjeu fondamental pour l'entreprise. Cependant, jusqu'à présent, les commandes étaient passées sur la base de l'expérience du responsable de base et du jugement des superviseurs. La principale faiblesse de ce mécanisme réside dans le fait qu'il repose sur la fragilité de la mémoire et le degré d'objectivité et de subjectivité des employés. Parallèlement, aucun élément ne permet d'étayer les décisions du responsable de base auprès du personnel administratif. Il en résulte des commandes délibérément supérieures aux besoins, car une quantité inférieure à celle demandée est souvent approuvée, ce qui entraîne un excédent de pièces de rechange. Loin d'être bénéfique, cet excédent de pièces de rechange entraîne une perte d'espace d'entrepôt utilisable, une

augmentation des pièces périssables (principalement des matériaux polymères) et une diminution du quota d'acquisition d'autres pièces par le personnel administratif.

Les informations sur l'utilisation et la consommation des composants sont généralement gérées par les personnes les plus proches de la pompe : l'opérateur le plus courant, le superviseur le plus courant, et parfois d'autres. Ces informations risquent d'être perdues ou modifiées lors de leur transmission dans la chaîne d'information menant au processus de décision d'achat de pièces détachées. Non seulement il n'existe pas de registres organisés, mais cela rend également impossible la génération d'un historique permettant de tracer les tendances d'utilisation.

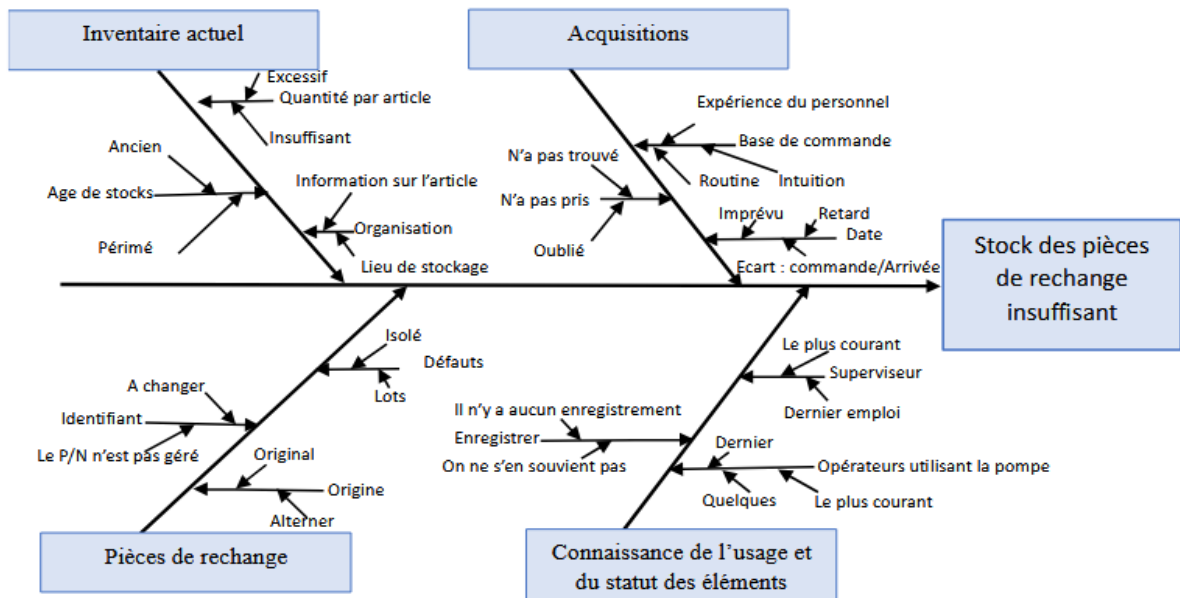


Figure III:15: Diagramme de cause à effet. Stock de pièces détachées insatisfaisant.

III.8 Conclusion :

Les pompes étant des équipements fortement sollicités, leur bon fonctionnement dépend en grande partie d'une stratégie de maintenance adaptée. Une surveillance régulière, une lubrification correcte, et le remplacement des pièces d'usure permettent d'éviter les pannes critiques, d'assurer la continuité de service et d'optimiser les coûts d'exploitation.

La pompe triplex est un système de pompage de précision, conçu pour des environnements exigeants. Sa construction modulaire et robuste permet une maintenance aisée et une adaptation à divers fluides et conditions de service. Sa conception permet également une meilleure continuité de service avec une usure répartie sur les trois cylindres, ce qui en fait un choix privilégié pour les applications à haute performance.

Chapitre IV

Résultat de simulation

sur MATLAB

IV.1 Concevoir et tester des algorithmes de surveillance de l'état et de maintenance :

IV.1.1 Exploiter l'outils informatique dans les calculs complexes

Au cœur d'une solution de maintenance prédictive se trouve un algorithme qui analyse les données issues des capteurs pour détecter les anomalies, établir un diagnostic des problèmes ou prédire la durée de vie utile restante (RUL) de l'équipement.

Pour développer cet algorithme, les ingénieurs doivent tout d'abord recueillir les données appropriées, puis utiliser des outils comme MATLAB® pour les prétraiter et en extraire des caractéristiques. Ces caractéristiques seront ensuite utilisées comme entrée d'un algorithme d'IA ou d'un algorithme statistique. Cet algorithme peut ensuite être déployé à grande échelle, que ce soit en l'embarquant directement sur un dispositif périphérique. Ce déploiement est indispensable pour bénéficier pleinement des avantages de la solution de maintenance prédictive.

Predictive Maintenance Toolbox sur logiciel Mathworks MATLAB offre des fonctions et des applications pour le design d'algorithmes de surveillance de l'état et de maintenance prédictive dédié au cette pompe triplex.

La toolbox nous permet de concevoir des indicateurs d'état, de détecter les défauts et les anomalies, et d'estimer la durée de vie utile restante (RUL). [10]

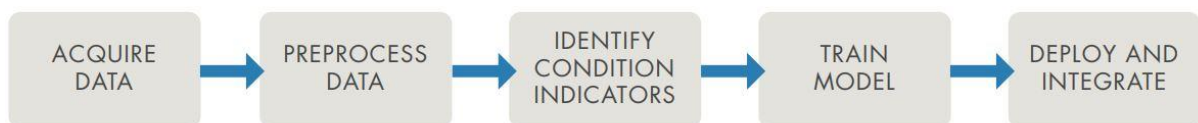


Figure IV:1: Workflow pour le développement d'algorithmes de maintenance prédictive.

Avec l'application Diagnostic Feature Designer sur MATLAB, nous pouvons extraire de manière interactive des caractéristiques temporelles, fréquentielles, temps-fréquence et basées sur la physique. Nous pouvons classer et exporter les caractéristiques afin de développer des algorithmes spécifiques à une application pour la détection de défauts et d'anomalies. Pour estimer la RUL, nous pouvons utiliser des modèles de survie, de similarité et de tendances.

La toolbox nous aide à organiser et analyser les données de capteurs importées à partir de fichiers locaux, d'un stockage dans le cloud ou de systèmes de fichiers distribués. Nous pouvons générer des données de défaillance simulées à partir de modèles Simulink et Simscape.

Nous verrons tout cela en détail dans les prochains titres.

IV.2 Voyons comment nous procédons dans Matlab :

IV.2.1 Acquisition de données:

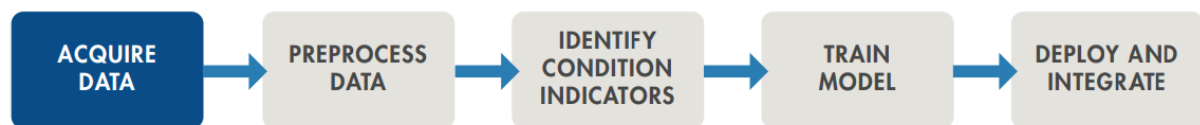


Figure IV:2: Acquisition de données.

La première étape consiste à collecter un large ensemble de données de capteurs représentant un fonctionnement correct et défectueux.

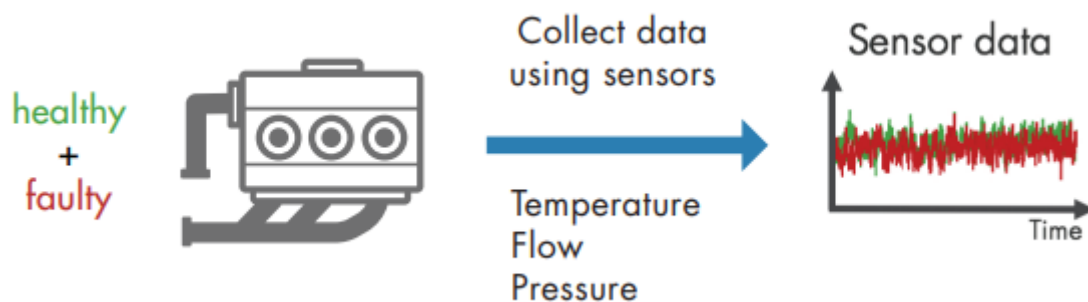


Figure IV:3: Data collection via capteur.

Il est important de collecter ces données dans des conditions de fonctionnement différents.

Par exemple, on peut utiliser le même type de pompes fonctionnant à différents endroits, l'une a Sahara d'Algérie et l'autre au Sibérie (Russie), l'une peut pomper un fluide très visqueux, tandis que l'autre fonctionne avec un fluide peu visqueux. Bien que nous utilisions le même type de pompe, l'une peut tomber en panne plus tôt que l'autre en raison de ces conditions de fonctionnement différentes. La collecte de toutes ces données nous aiderons à développer un algorithme robuste capable de mieux détecter les défauts.

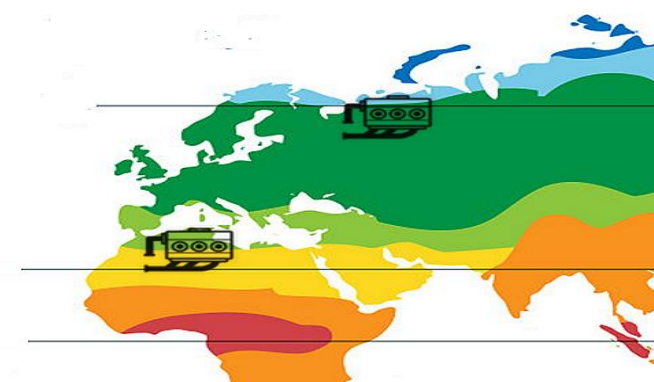


Figure IV:4: Climat monde carte.

➤ **Sur Matlab :**

En ouvrant logiciel MATLAB, puis allons dans « Command Window » et tapons :

```
>> load 'savedpumpdata'
```

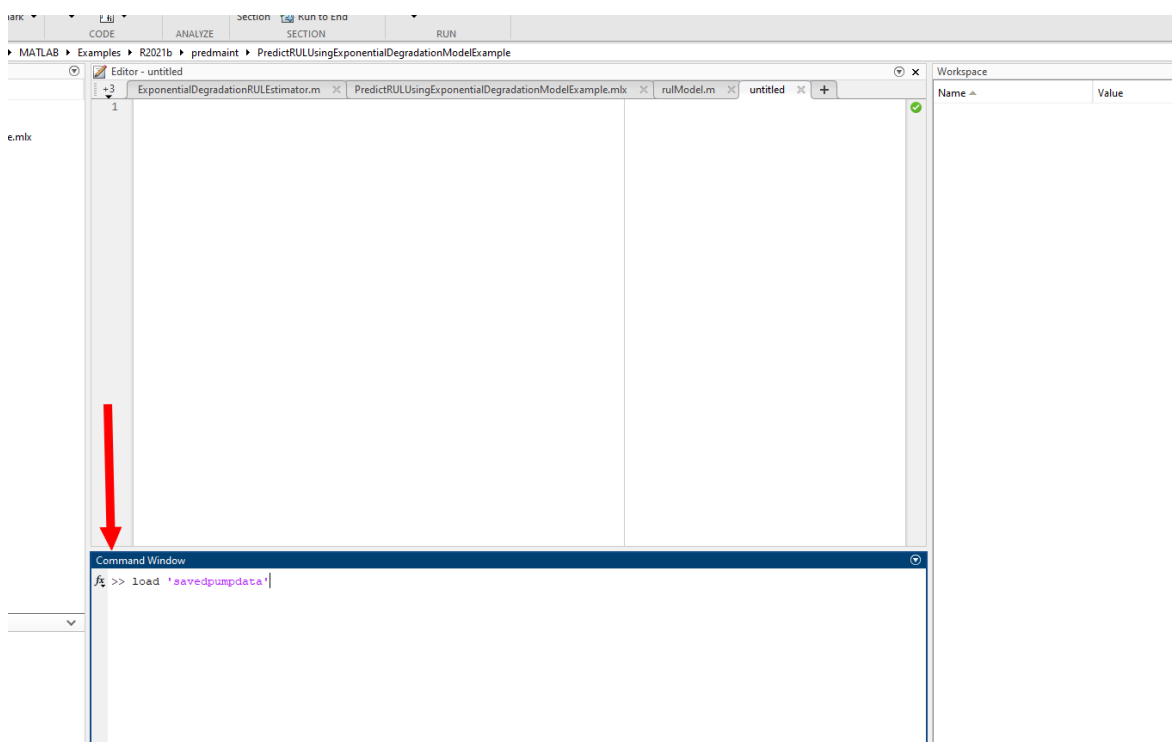


Figure IV:5: Chargement des données de la pompe Triplex sous Matlab.

Après avoir cliqué sur ENTRER, la matrice de données de la pompe apparaîtra dans la fenêtre « Workspace »

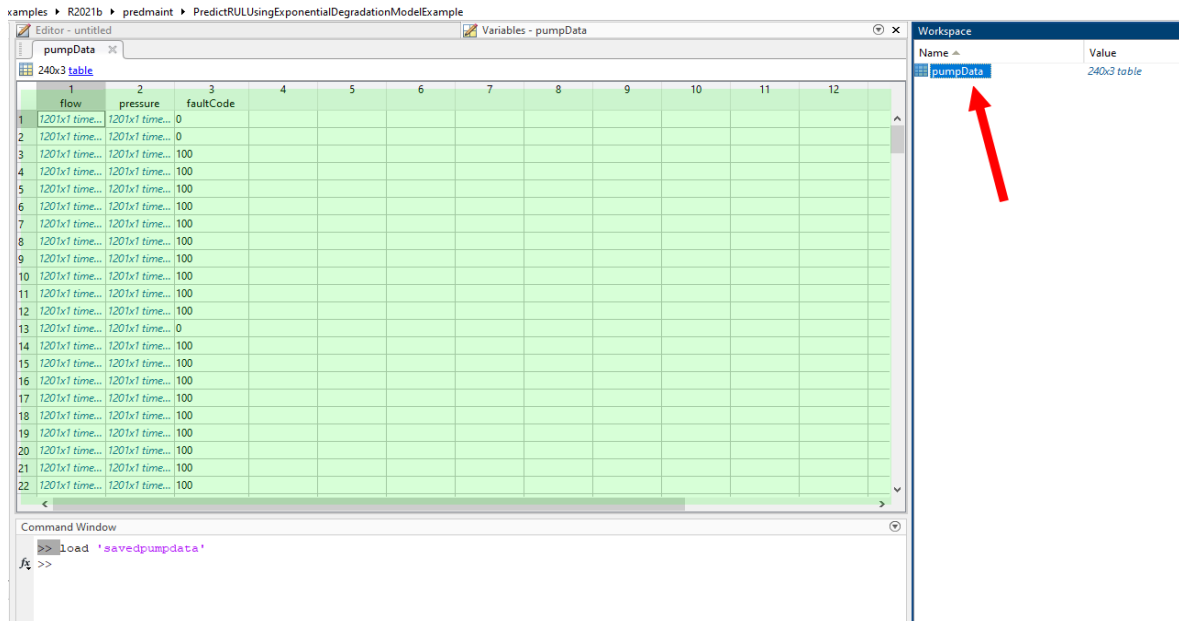


Figure IV:6: Matrice des mesures pression et débit.

Les données de la pompe contiennent 240 mesures de débit et de pression pour différentes conditions de défaut. Il existe trois types de défauts (fuite du cylindre, obstruction de l'admission, augmentation du frottement des paliers).

Les mesures couvrent les situations où aucun défaut, un défaut ou plusieurs défauts sont présents. Les données sont rassemblées dans un tableau où chaque ligne correspond à une mesure différente.

PumpData=240×3 table

debit	pression	faultCode
{1201×1 timetable}	{1201×1 timetable}	0
{1201×1 timetable}	{1201×1 timetable}	0
{1201×1 timetable}	{1201×1 timetable}	100
{1201×1 timetable}	{1201×1 timetable}	100
{1201×1 timetable}	{1201×1 timetable}	100
{1201×1 timetable}	{1201×1 timetable}	100
{1201×1 timetable}	{1201×1 timetable}	100
{1201×1 timetable}	{1201×1 timetable}	100
{1201×1 timetable}	{1201×1 timetable}	100
{1201×1 timetable}	{1201×1 timetable}	100
{1201×1 timetable}	{1201×1 timetable}	100
{1201×1 timetable}	{1201×1 timetable}	0
{1201×1 timetable}	{1201×1 timetable}	100
{1201×1 timetable}	{1201×1 timetable}	100
{1201×1 timetable}	{1201×1 timetable}	100

Et chaque tableau {1201×1 timetable} contient 1201 mesures des grandeurs (débit ou pression) qui représente certaine condition de défaut, par exemple 0 (la ligne bleue en surbrillance) ce qui ne signifie pas de défaut

Temp	débit	Temp	pression
'0.000 sec'	41.3169402788716	'0.000 sec'	7.26798830684604
'0.001 sec'	37.0091692106139	'0.001 sec'	7.27079081246068
'0.002 sec'	35.1915890755483	'0.002 sec'	7.22700617661587
'0.003 sec'	35.1433157591296	'0.003 sec'	7.21117286567583
'0.004 sec'	31.4553679185162	'0.004 sec'	7.18616221507870
'0.005 sec'	32.3916600695816	'0.005 sec'	7.20752366839389
'0.006 sec'	35.9269594688289	'0.006 sec'	7.20373816276391
'0.007 sec'	38.7897713344100	'0.007 sec'	7.24715139023374
'0.008 sec'	40.0606306924732	'0.008 sec'	7.25180570801785
'0.009 sec'	39.6803372864149	'0.009 sec'	7.26411531636448
'0.01 sec'	41.7449850029544	'0.01 sec'	7.27461085297878
'0.011 sec'	41.4830127200990	'0.011 sec'	7.28496523874583
'0.012 sec'	41.6587949035237	'0.012 sec'	7.26038986207557
'0.013 sec'	42.0333530912528	'0.013 sec'	7.27581727743950
'0.014 sec'	40.7433473561893	'0.014 sec'	7.26572470703304
'0.015 sec'	39.0387188437252	'0.015 sec'	7.24427321554789
'0.016 sec'	36.4545399907534	'0.016 sec'	7.23065768559370
'0.017 sec'	41.6464852894682	'0.017 sec'	7.21986955023251
'0.018 sec'	41.7823672575362	'0.018 sec'	7.27811258664515
'0.019 sec'	40.2056469877823	'0.019 sec'	7.26528869272117
'0.02 sec'	41.2051965243684	'0.02 sec'	7.26821857333558

IV.2.2 Traiter les données :

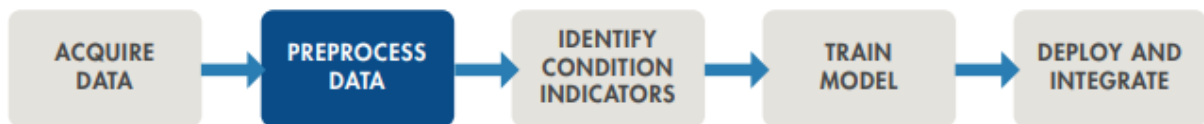


Figure IV:7: Traitement des données.

Une fois les données pertinentes réunies, l'étape suivante consiste à les transformer en un ensemble de caractéristiques représentatives pouvant servir d'indicateurs d'état pour entraîner un algorithme prédictif.

Le traitement implique des techniques comme l'élimination du bruit, des valeurs aberrantes et des données manquantes.

Des étapes supplémentaires peuvent parfois s'avérer nécessaires afin de faire apparaître des informations non visibles dans la forme brute des données, par exemple, cela peut inclure la transformation de données temporelles en données fréquentielles.

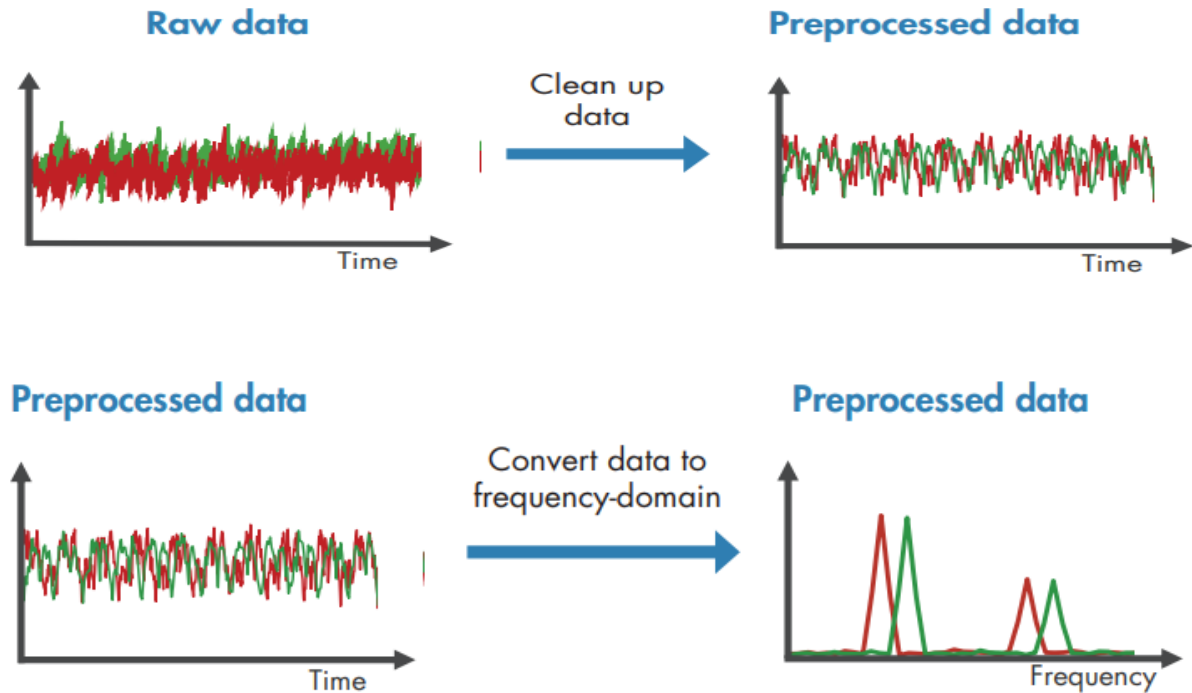


Figure IV:8: Transformation de données temporelles en Données fréquentielles.

Les données traitées incluent toutes les conditions bonnes et défectueuses. Afin d'étudier les différents types de défauts et leurs combinaisons, nous pouvons les tracer individuellement.

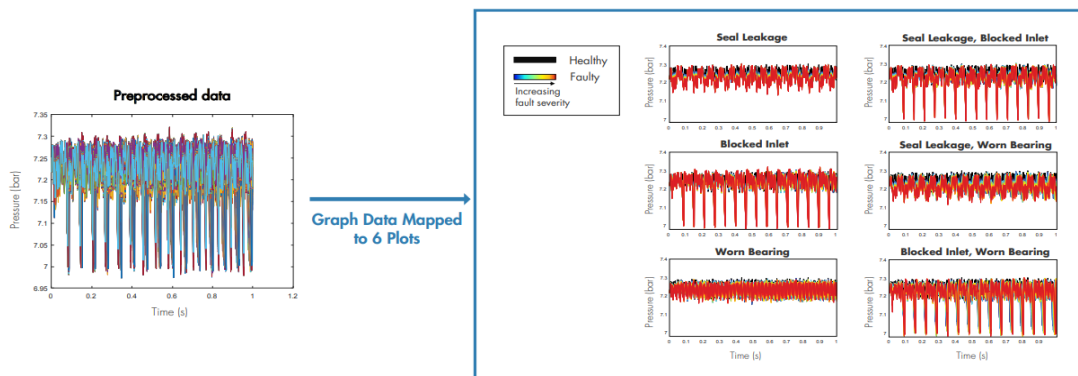


Figure IV:9: Traitement de données.

La première chose à remarquer sur ces tracés est le comportement cyclique du signal de pression temporel. Ensuite, observez un tracé sur une période plus courte à la page suivante pour mieux comprendre le déroulement de chaque cycle.

Ces graphiques offrent un aperçu plus détaillé du signal de pression pour différents types de défauts.

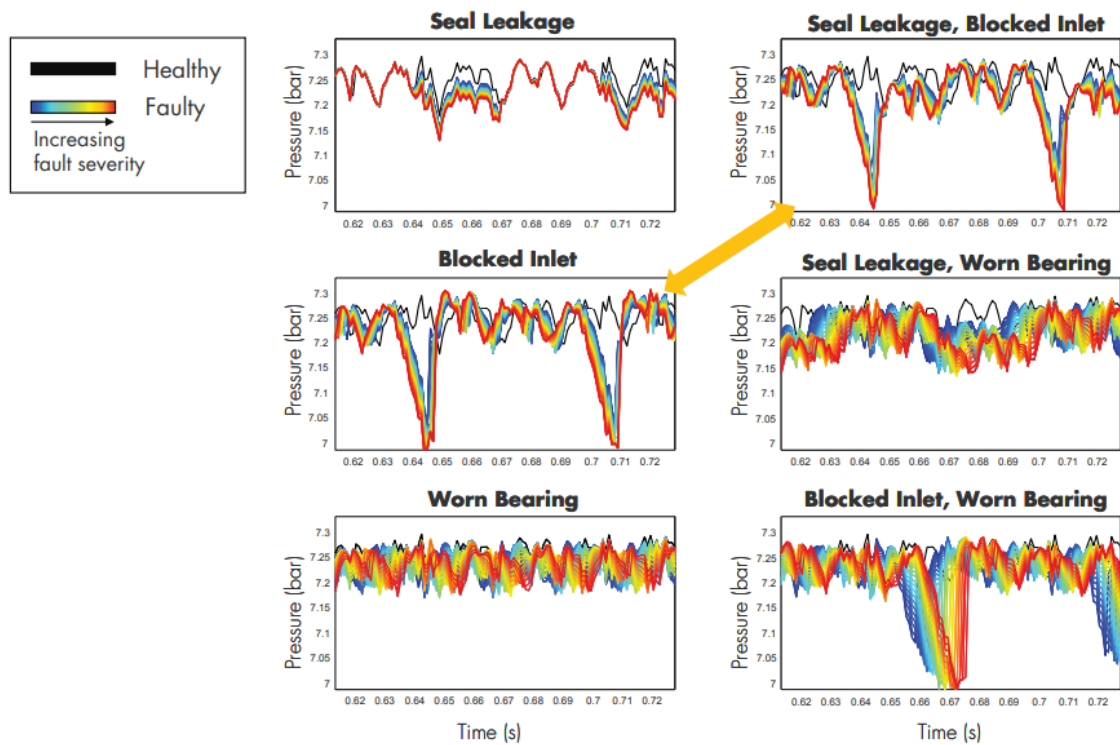


Figure IV:10: Signal de pression pour différents types de défauts.

L'évolution des données de pression à mesure que la pompe se détériore se traduit par des couleurs changeantes, du bleu foncé au rouge, indiquant une gravité croissante du défaut. La question est maintenant : pouvons-nous distinguer la ligne noire, indiquant un fonctionnement correct du reste des données sur chaque graphique ? Et pouvons-nous identifier les différences uniques entre chaque ensemble de lignes colorées ? Remarquez que les données de pression sont très similaires pour les défauts « fuite de joint, entrée bloquée » et « entrée bloquée ».

IV.2.3 Identifier les indicateurs des conditions :



Figure IV:11: Identification des indicateurs de conditions.

L'étape suivante consiste à identifier les indicateurs d'état, c'est-à-dire les caractéristiques dont le comportement change de manière prévisible à mesure que le système se dégrade. Ces caractéristiques permettent de distinguer un fonctionnement sain d'un fonctionnement défectueux.

Une façon de comprendre si ces indicateurs d'état permettent de différencier les types de défauts est de les analyser à l'aide d'un diagramme du boîte (boîte à moustaches). Tout d'abord, tracez une caractéristique unique, telle que la moyenne (mean), pour l'état bon et le défaut d'entrée bloquée.

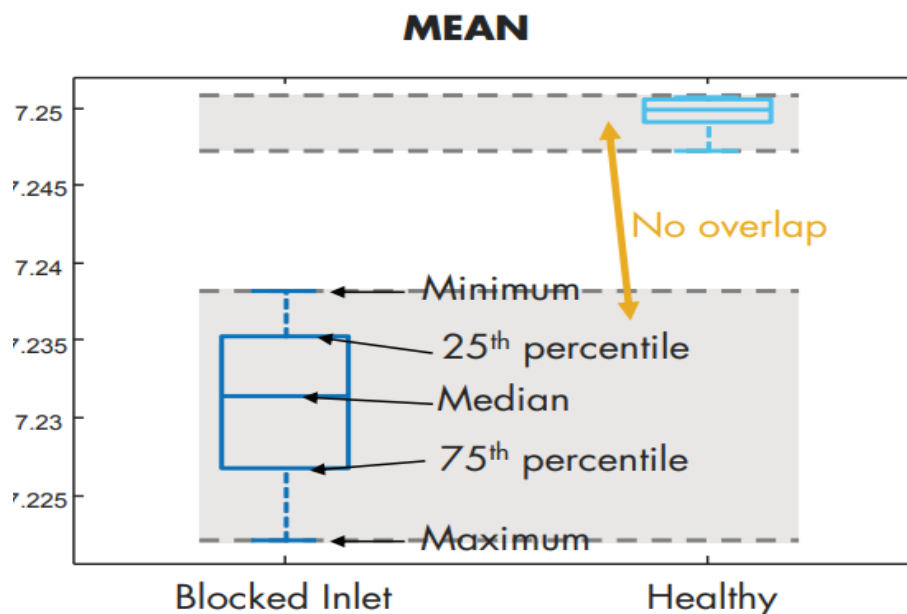


Figure IV:12: Moyenne par diagramme de boîte.

Les deux boîtes ne se croisent pas sur le diagramme, cela signifie qu'il existe une différence entre ces groupes de deux données (bon état et entrée bloquée).

En utilisant la moyenne des données de pression, nous pouvons facilement distinguer un défaut d'entrée bloquée d'un état bon.

La situation change lorsque l'on ajoute les ensembles de données pour d'autres types de défaut. Il est impossible de distinguer tous les types de défauts, car certains se croisent. Du fait de ce chevauchement, la moyenne seule ne suffit pas à distinguer les types de failles.

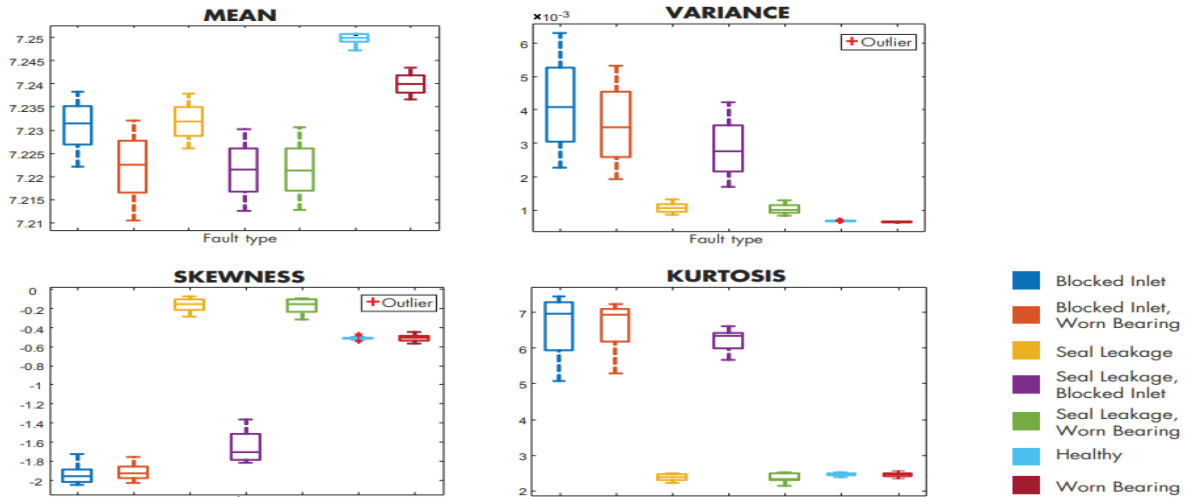


Figure IV:13: Croisement des boîtes sur le diagramme.

Le diagramme de dispersion ci-dessous illustrant une combinaison des caractéristiques suivantes : moyenne, variance et asymétrie. Remarquez à quel point le graphique variance/moyenne distingue clairement les différents types de failles.

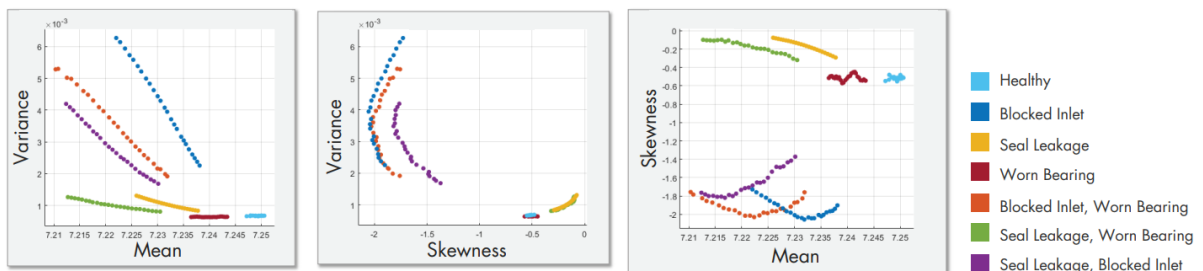


Figure IV:14: Diagrammes de dispersion représentant tous les défauts.

On constatera immédiatement que deux indicateurs d'état sont plus efficaces qu'un seul pour distinguer les différents défauts. Donc on peut tester différentes paires de caractéristiques pour identifier celles qui sont les plus efficaces pour classer les défauts. L'analyse fréquentielle est importante pour analyser les données périodiques et les données acquises à partir d'une machine à composants rotatifs.

Voyons si on peut extraire des caractéristiques supplémentaires en analysant nos données dans le domaine fréquentiel.

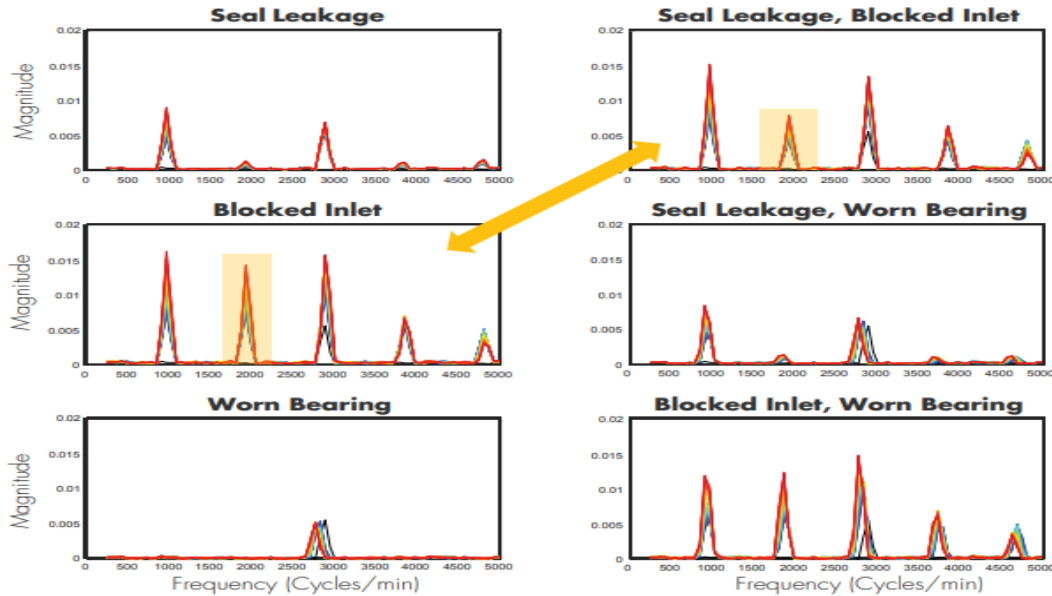


Figure IV:15: Diagramme fréquentiel de différents Code de défauts.

Ces courbes se distinguent par leurs pics et leurs fréquences, qui peuvent servir d'indicateurs d'état. Avec les caractéristiques temporelles, il était difficile de distinguer les défauts « fuite de joint, entrée bloquée » et « entrée bloquée » en raison de la similarité des jeux de données.

En examinant les données dans le domaine fréquentiel, nous constaterons que les valeurs de pic dans la plage de fréquences sélectionnée nous aideront à distinguer ces deux défauts.

En résumé, les caractéristiques à utiliser pour entraîner un modèle de machine learning dans cet exemple incluent :

- Caractéristiques temporelles : moyenne, variance, asymétrie, kurtosis
- Caractéristiques fréquentielles : pics et fréquences des pics

Après avoir sélectionné les caractéristiques fréquentielles, essayez d'effectuer une analyse similaire à celle réalisée pour les caractéristiques temporelles. Le graphique ci-dessous montre les deuxièmes et cinquièmes pics l'un par rapport à l'autre.

Ces caractéristiques séparent efficacement différents groupes, qui sont surlignés en jaune. Cela signifie que les caractéristiques sélectionnées sont distinctes et de bons candidats pour l'entraînement d'un modèle d'apprentissage automatique.

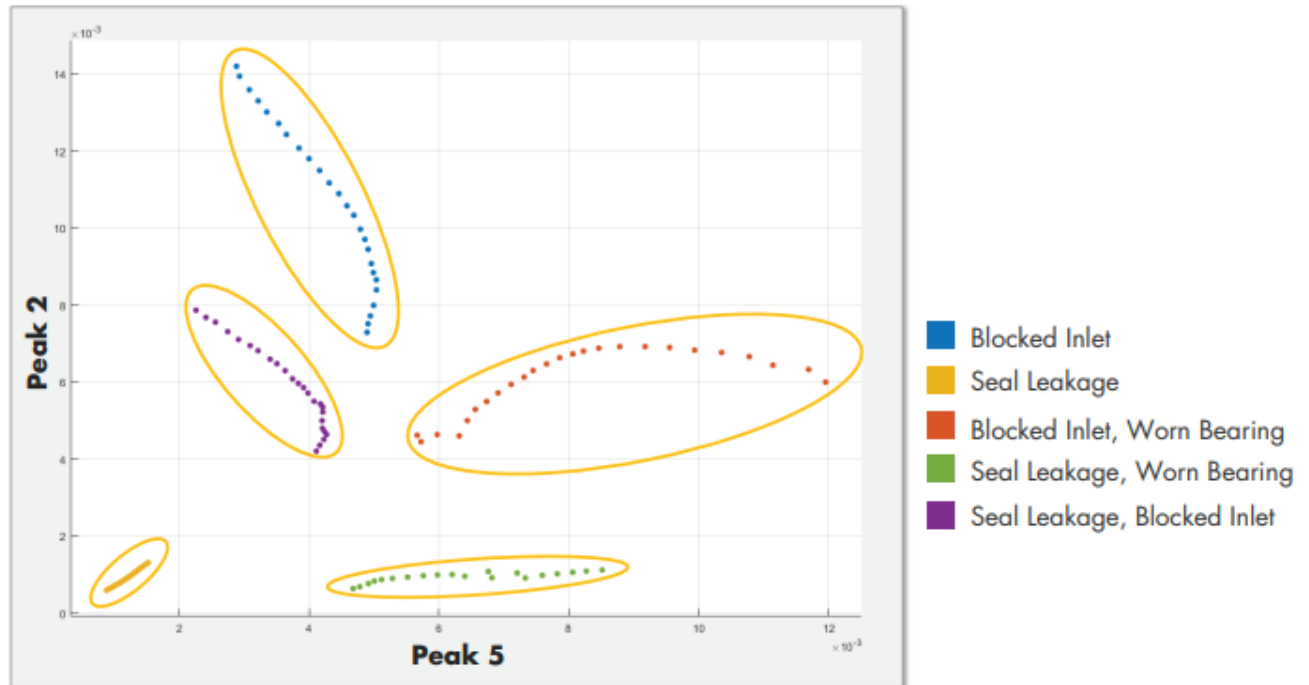


Figure IV:16: Diagramme Peak2/Peak5.

Notez que lorsque nous étudiez ces caractéristiques, nous rechercherons non seulement des groupes différents, mais aussi des groupes plus éloignés les uns des autres. Cela permet aux modèles entraînés d'identifier plus facilement de nouveaux points de données.

La page précédente présente les courbes des pics pour chaque défaut, les défauts étant en couleur et l'état bon en noir. Notez que le tracé « worn bearing » ne contient que le pic 3 pour le roulement usé et l'état bon. C'est pourquoi ces états n'apparaissent pas sur un tracé représentant les pics 2 et 5.

C'est une autre raison pour laquelle nous avons besoin de plusieurs caractéristiques pour séparer efficacement les différents groupes.

➤ Sur Matlab :

Dans la case « Apps » sur l'interface principale qui correspond à une **bibliothèque d'applications interactives** intégrées dans MATLAB, permettent d'exécuter des tâches courantes ou complexes sans avoir à coder.

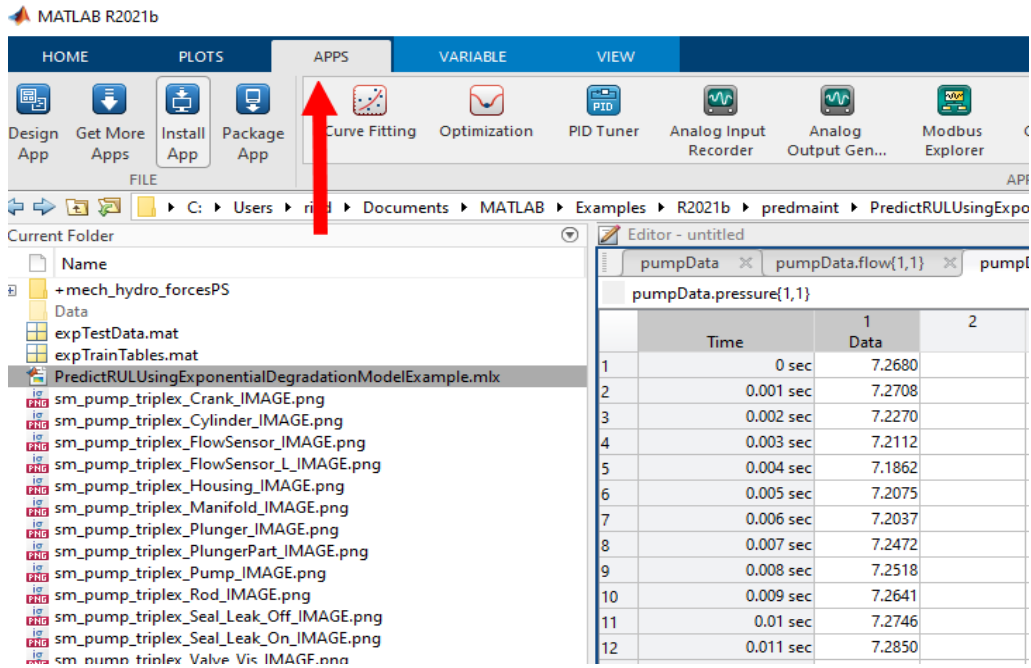


Figure IV:17: Case des application Matlab.

On sélectionne l'application « Diagnostic feature designer » l'outil de création des caractéristiques.

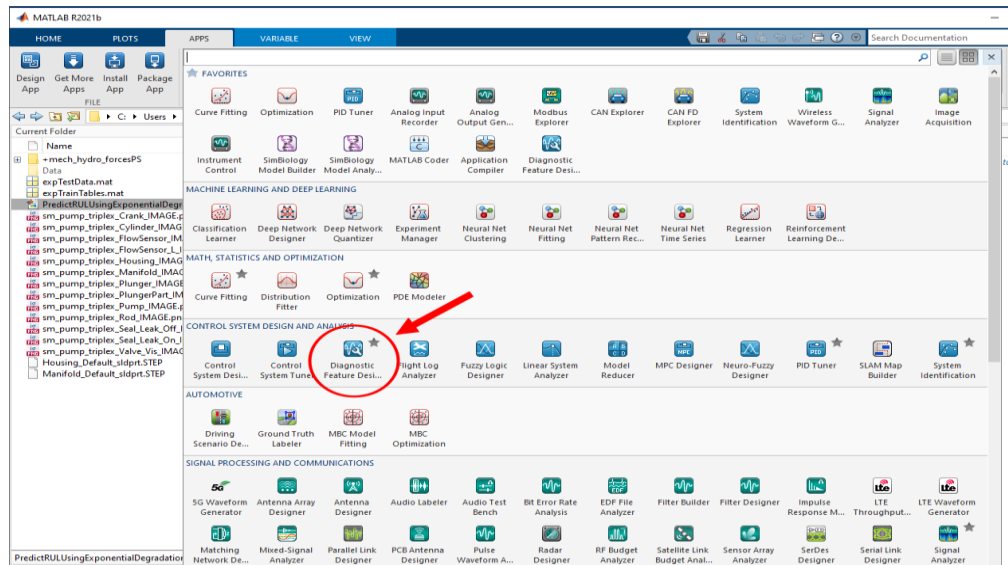


Figure IV:18: Diagnostic Features Designer.

On ouvre une nouvelle session en cliquant sur « New Session », ce qui ouvre une boîte de dialogue pour l'importation de données.

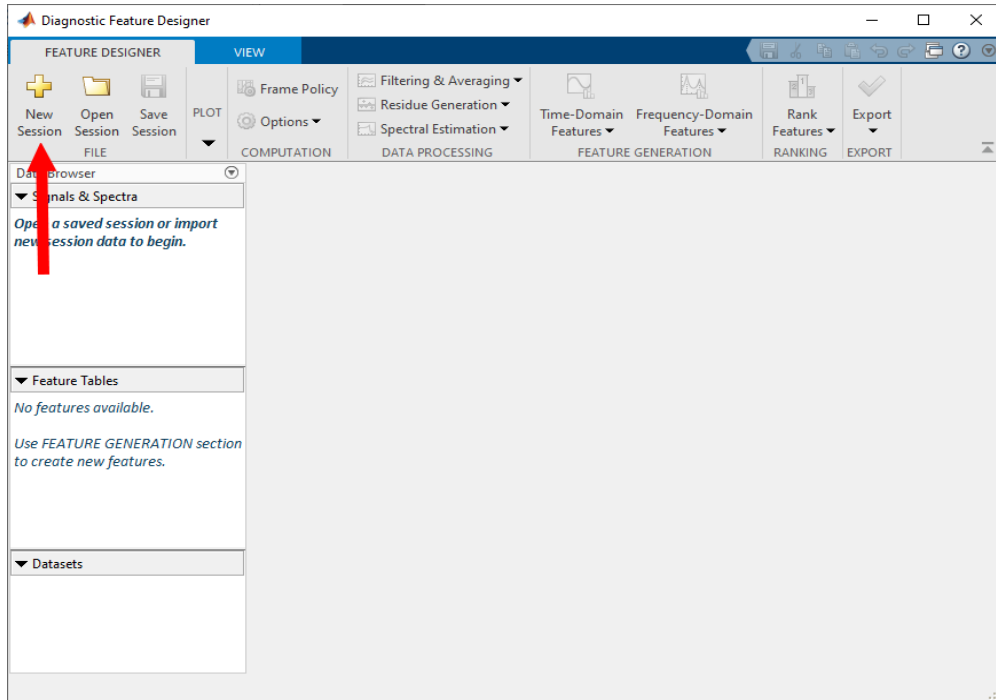


Figure IV:19: Placement du case « Nouveau Session ».

Dans le volet *Select dataset from workspace pane*, on choisit *pumpData* comme source de données. Ensuite, dans le volet *Select source variables*, assurez-vous que les noms des variables correspondent à ceux affichés dans la ligne de commande. Les variables *débit* et *pression* sont des signaux, tandis que *faultCode* est une variable de condition. Les variables de condition servent à indiquer la présence ou l'absence d'un défaut, et sont utilisées par l'application pour effectuer des opérations de regroupement et de classification. Puis on clique sur *import*.

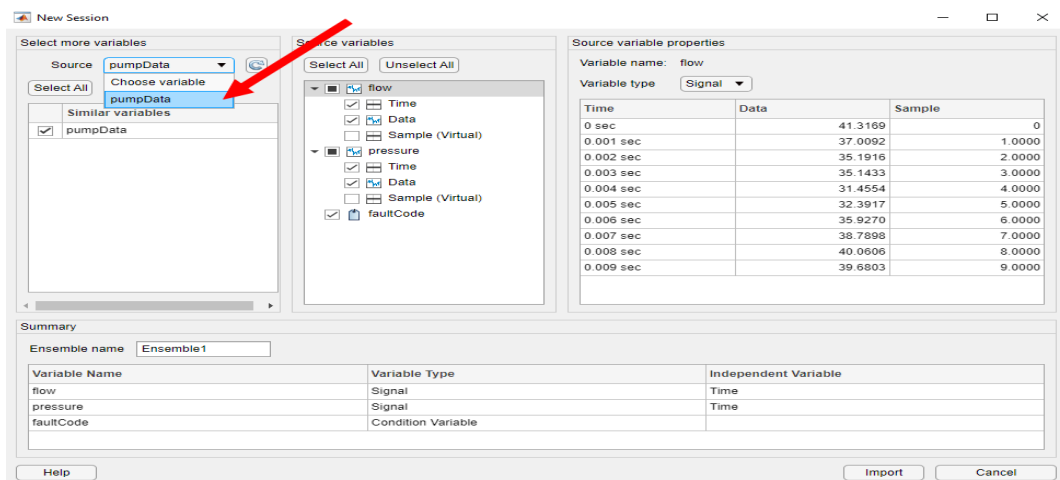


Figure IV:20: Sélection des données.

On peut tracer le signal de débit en sélectionnant *flowdata* dans la section *Signals & Spectra* du navigateur de données, puis en cliquant sur *Signal Trace* dans la galerie de tracés. La même manière avec le signal de la pression.

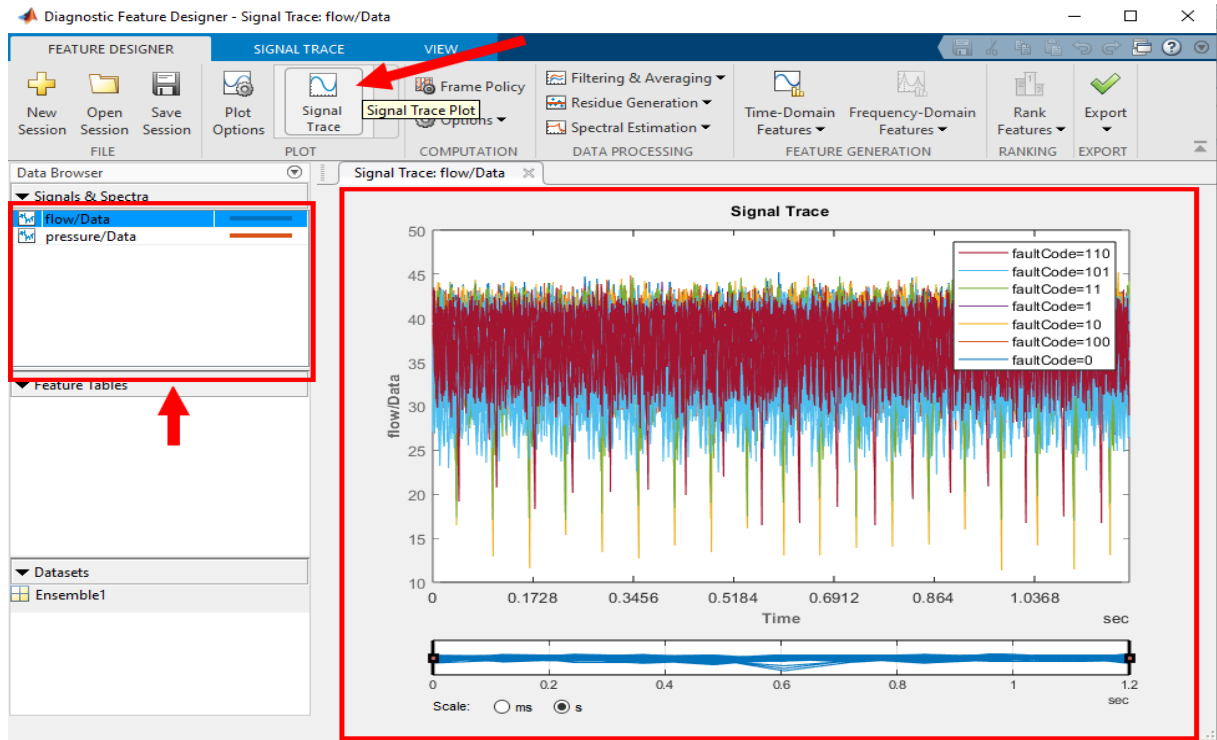


Figure IV:21: Signal du débit.

1. Extraction des caractéristiques temporelles

Comme on peut voir ici, les données sont désordonnées. Il faut les traiter et réduire leur dimensionnalité en extrayant des caractéristiques car ils ne présentent aucune différence selon les conditions de défaut.

L'étape suivante consiste à extraire les caractéristiques temporelles, telles que la moyenne et l'écart type du signal.

Sélectionnant d'abord *flow/data* dans le navigateur de données, ensuite *Time-Domain Features* (caractéristique temporelle), puis *signal features* (Caractéristiques du signal).

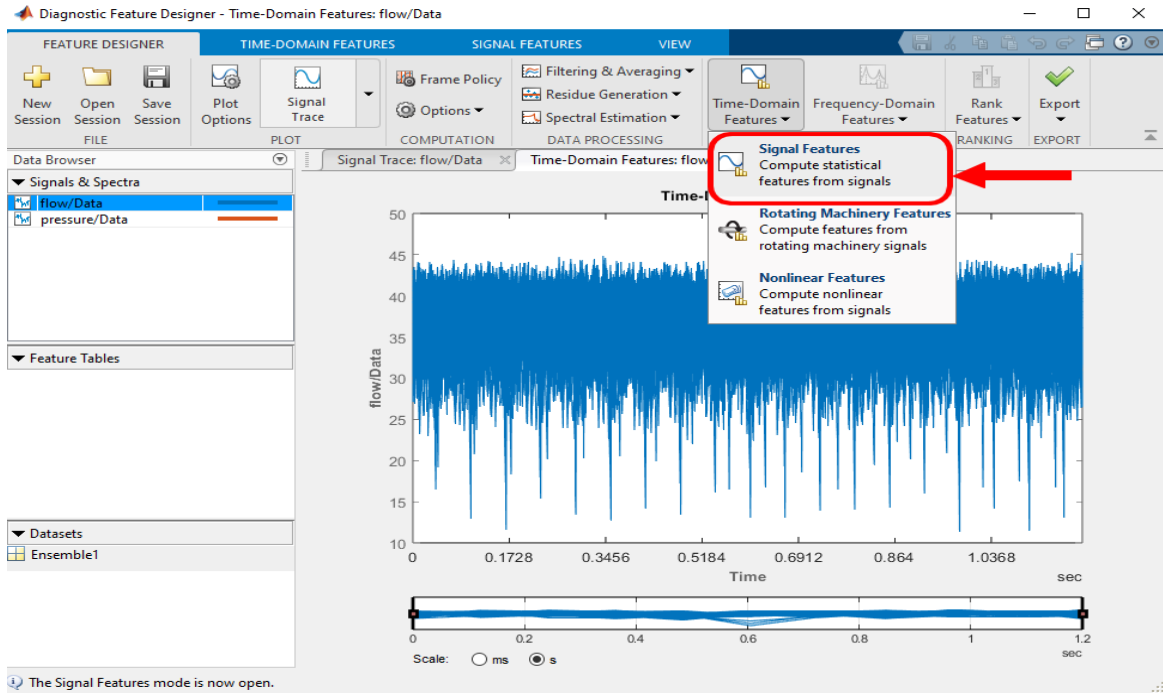


Figure IV:22: Extraction des caractéristiques temporelle.

Deux nouveaux onglets s'ouvrent : *time domain features* (Fonctions de signal) et *signal features* (Fonctions temporelles). Dans cette section, on sélectionner les fonctions à extraire (*mean, RMS, peak value ...etc*) et cliquez sur Appliquer et en décochant la case « Résultats du tracé ». Nous tracerons les résultats ultérieurement pour voir si les fonctions permettent de distinguer les différentes conditions de défaut. On répète cette procédure pour le signal de pression.

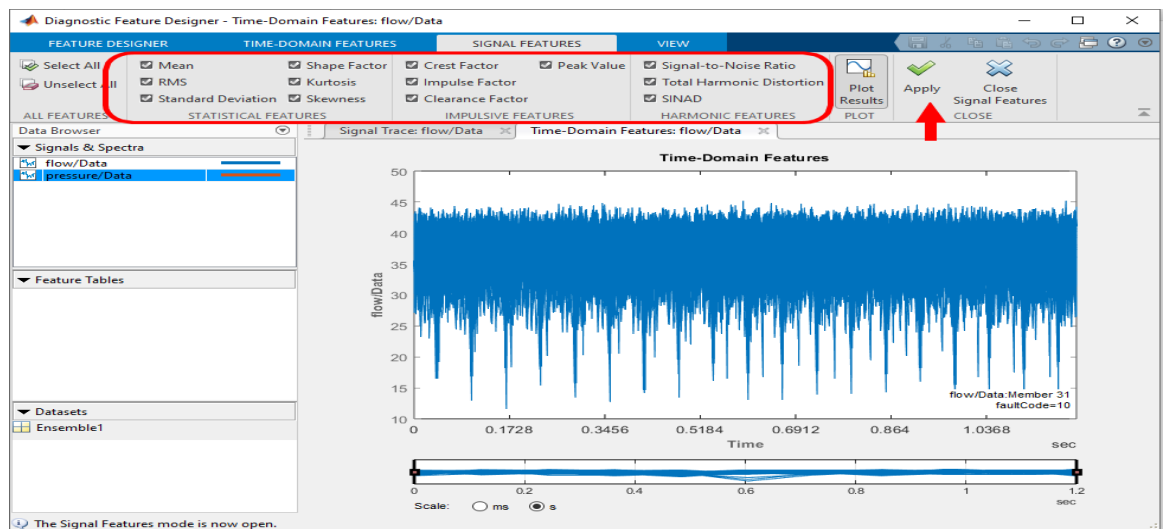


Figure IV:23: Sélection des caractéristiques.

On peut voir le tableau des caractéristiques calculées à gauche, on peut aussi le voir comme un signal

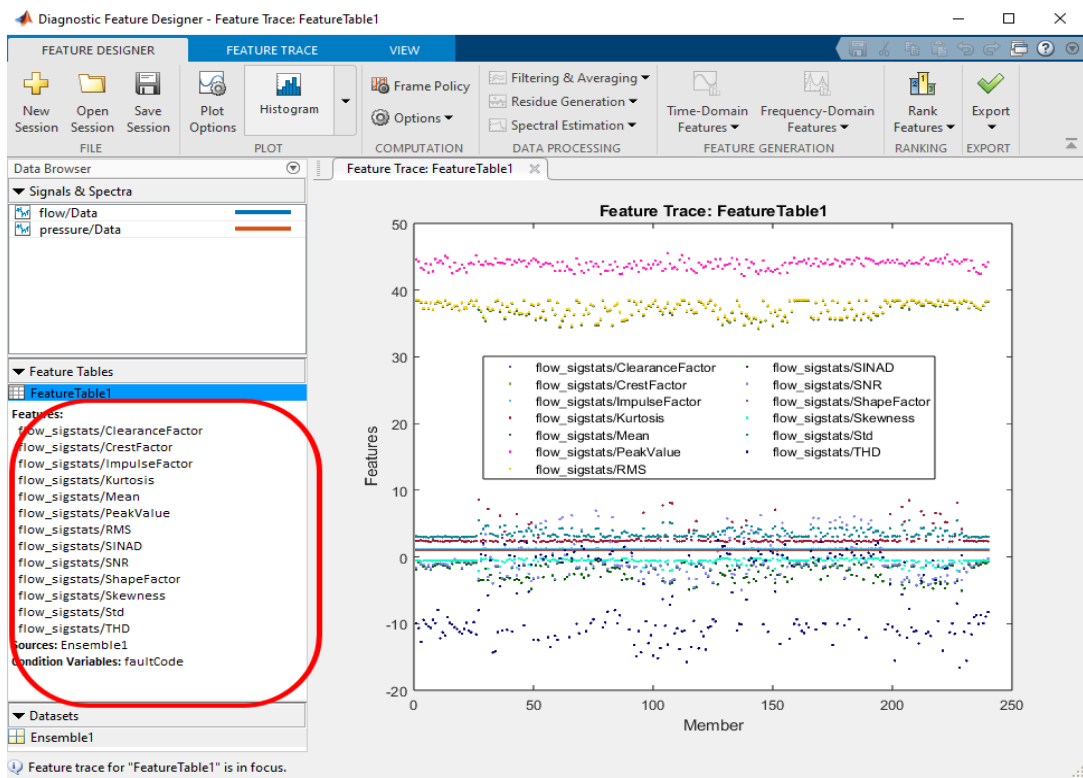


Figure IV:24: Tableau et courbe des caractéristiques calculées.

Lorsqu'on ajoute la pression les données apparaîtront dans le tableau.

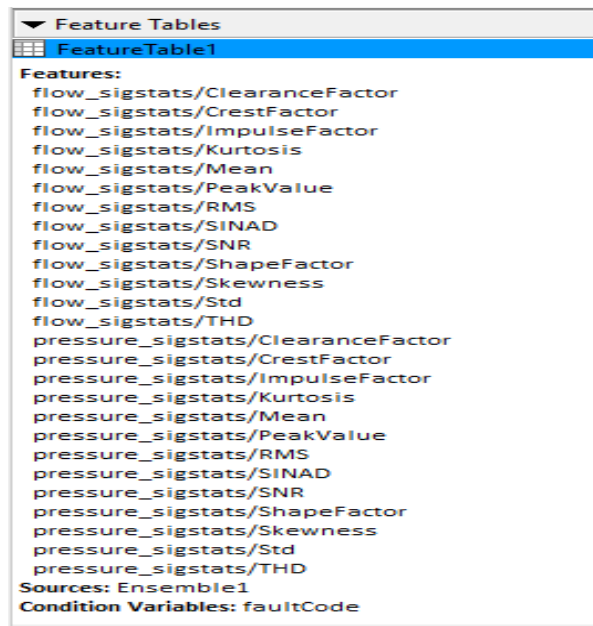


Figure IV:25: Tableau des caractéristiques.

2. Extraction des caractéristiques fréquentielles

Le calcul du spectre de fréquences de l'écoulement mettra en évidence la nature cyclique du signal d'écoulement et pourrait permettre de mieux comprendre son évolution sous différentes conditions de défaut. Estimer les spectres de fréquences à l'aide d'un modèle autorégressif.

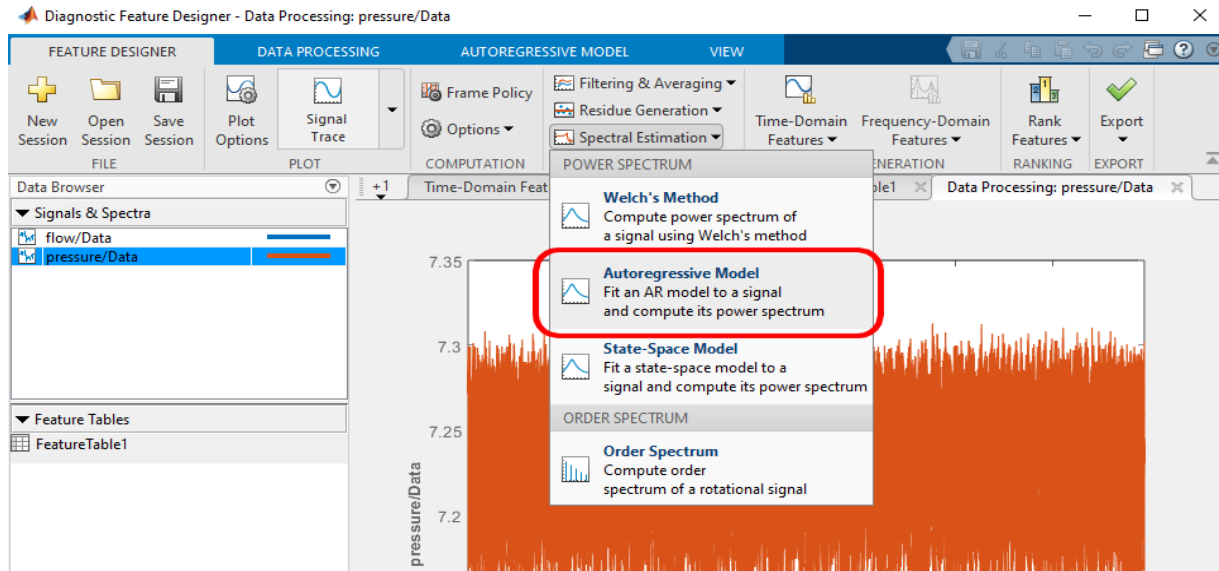


Figure IV:26: Modèle autorégressive.

Le tracé des spectres calculés sur une échelle linéaire met clairement en évidence les pics de résonance. Le regroupement par code de défaut met en évidence l'évolution des spectres selon les conditions de défaut.

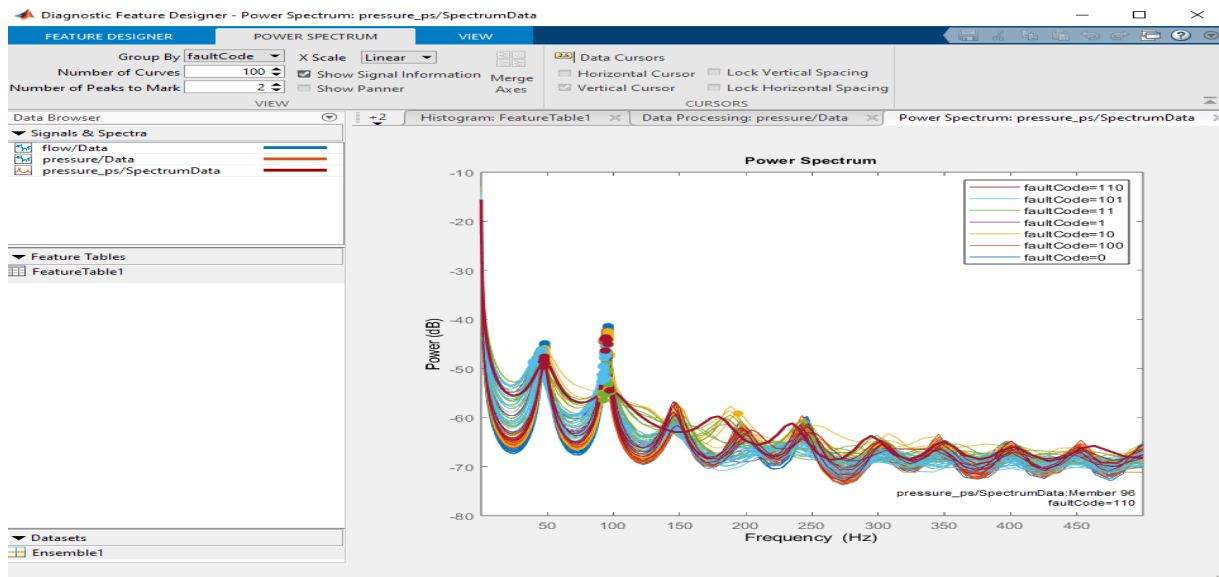


Figure IV:27: Signal fréquentielles.

Pour extraire les *caractéristiques fréquentielles*, on sélectionne les données spectrales puis on clique sur « *frequency-domain features* » et choisit « *spectral features* »

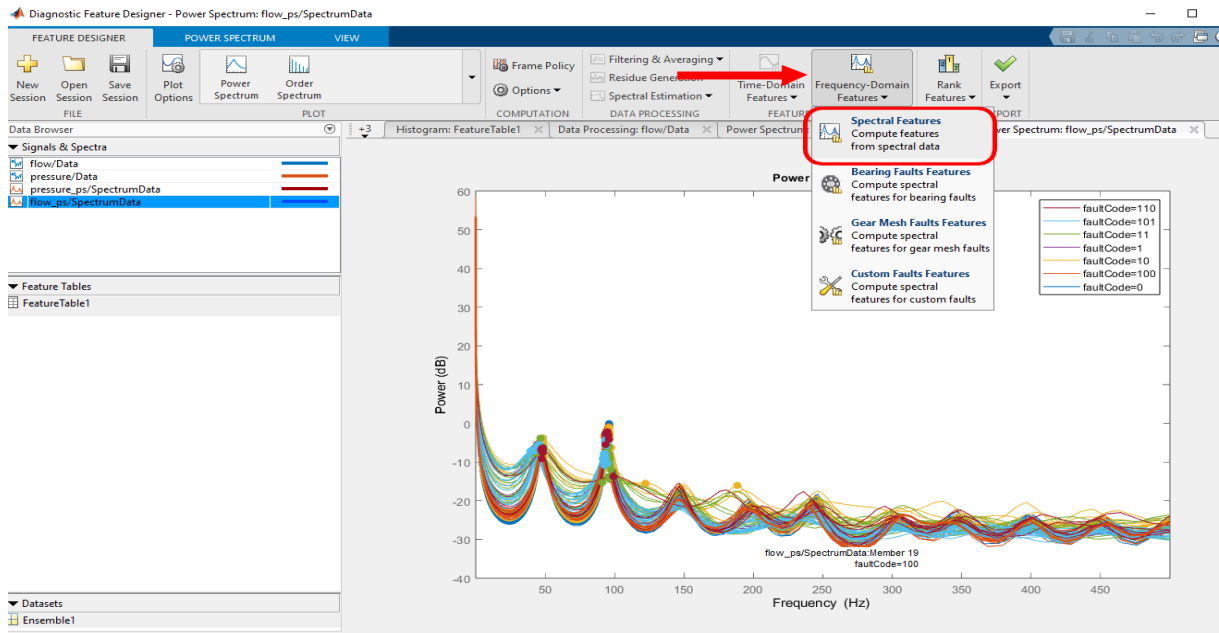


Figure IV:28: Caractéristique spectral.

Nous pouvons désormais calculer des caractéristiques spectrales telles que les pics, les coefficients modaux et la puissance de bande.

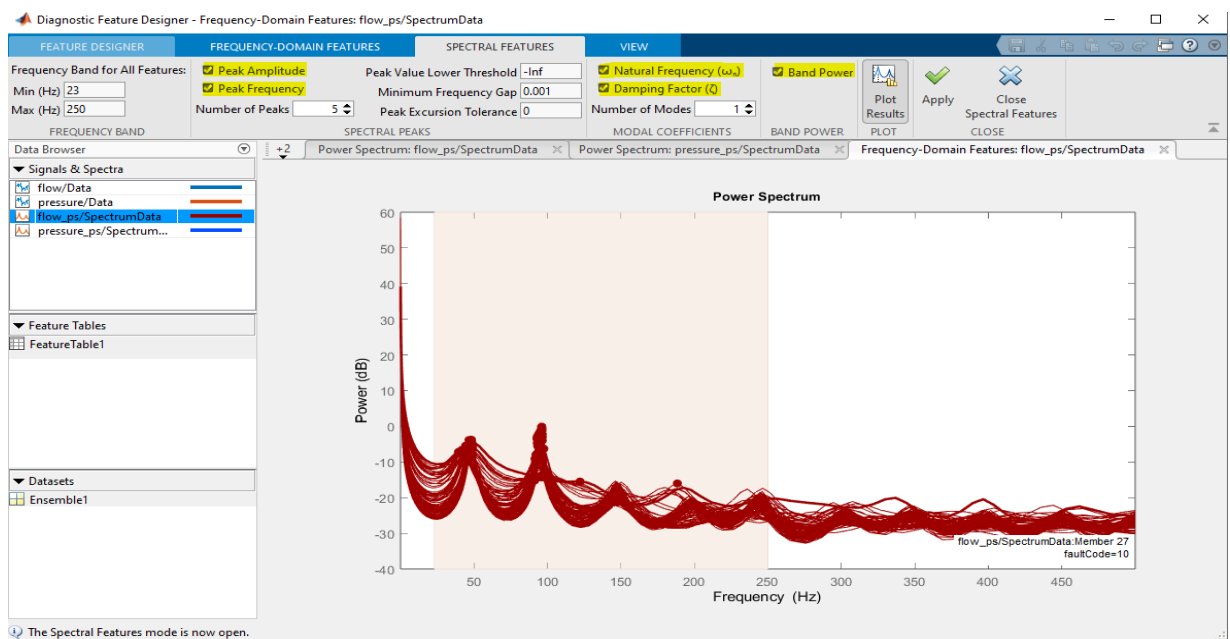


Figure IV:29: Choix des caractéristiques fréquentielles.

Nous pouvons visualiser les distributions des valeurs des caractéristiques pour différentes variables d'état, dans ce cas, les types de défauts, en visualisant le tableau des caractéristiques sous forme d'histogramme.

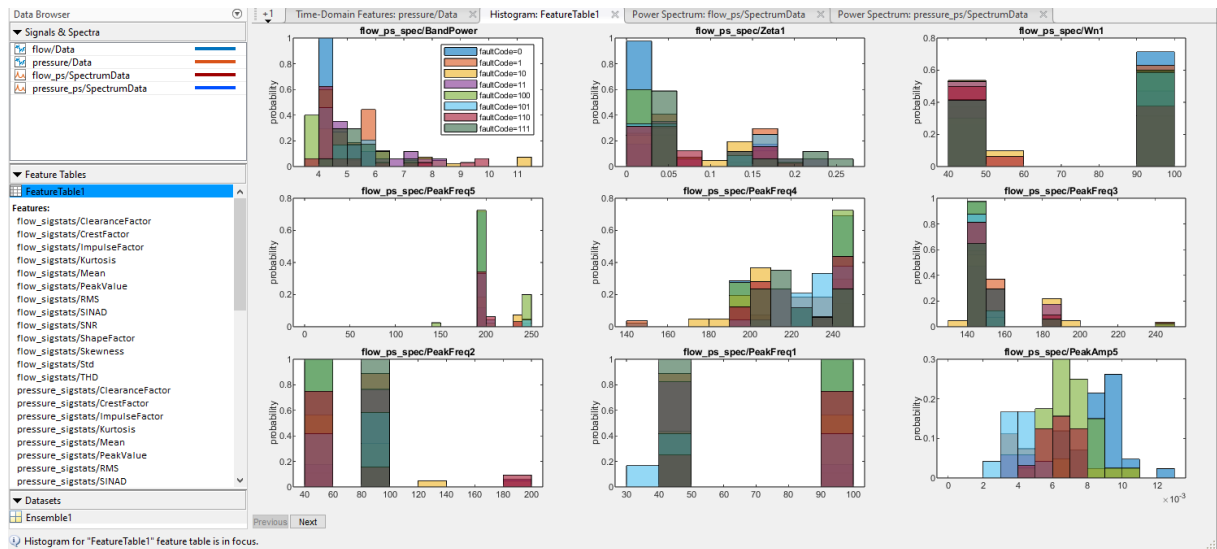


Figure IV:30: Histogramme de toutes les caractéristiques.

On Sélectionne FeatureTable1, puis en cliquant sur Histogramme dans la galerie de tracés pour créer un ensemble d'histogrammes. Il faut utiliser les boutons Suivant et Précédent (Next and Previous) pour afficher les histogrammes des différentes caractéristiques.

Les histogrammes regroupés par code de défaut permettent de déterminer si certaines caractéristiques sont des différenciateurs importants entre les types de défauts. Si elles le sont, leurs distributions seront plus éloignées les unes des autres.

Pour les données de pompe triplex, les distributions des caractéristiques ont tendance à se chevaucher et aucune caractéristique ne permet d'identifier clairement les défauts.

La section suivante examine l'utilisation du classement automatique pour identifier les caractéristiques les plus utiles à la prédiction des défaillances.

3. Classifier et exporter les caractéristiques :

Dans l'onglet « *Ranking* », cliquons sur « *Rank Features* » et sélectionnez FeatureTable1. L'application classe les entités par ordre d'importance en fonction de la valeur de la métrique. Dans ce cas, la valeur RMS du signal de débit et les valeurs RMS et moyennes du signal de pression sont les caractéristiques qui distinguent le plus clairement les différents types de défauts.



Figure IV:31: Classement des caractéristiques.

L'application collecte toutes les données et les classe selon une métrique telle qu'une ANOVA.

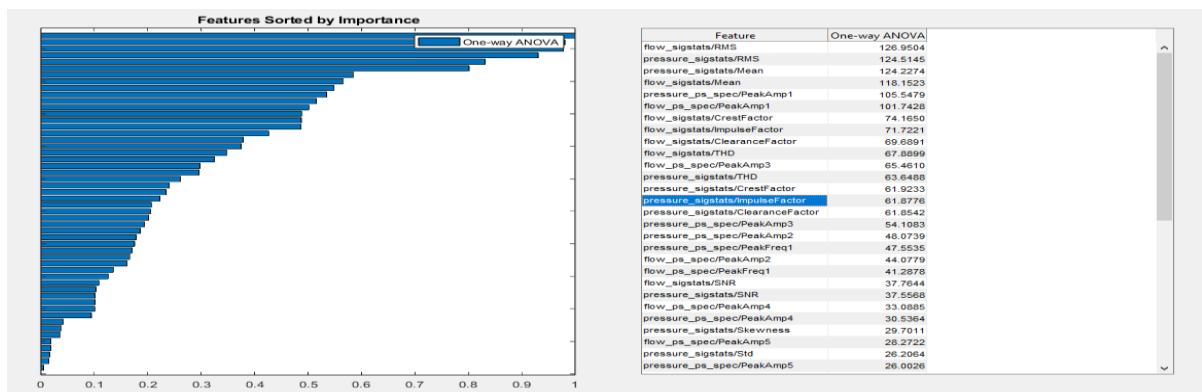


Figure IV:32: Classement des caractéristiques selon la Métrique One Way Anova.

IV.2.4 Entraînement du modèle :



Figure IV:33 : Entraînement du Modèle.

Après le classement par ordre d'importance, l'étape suivante consiste à les exporter afin d'entraîner un modèle de classification basé sur elles.

Cliquons sur « Export », puis « Export features to the Classification Learner » et sélectionnons les entités à utiliser pour la classification.

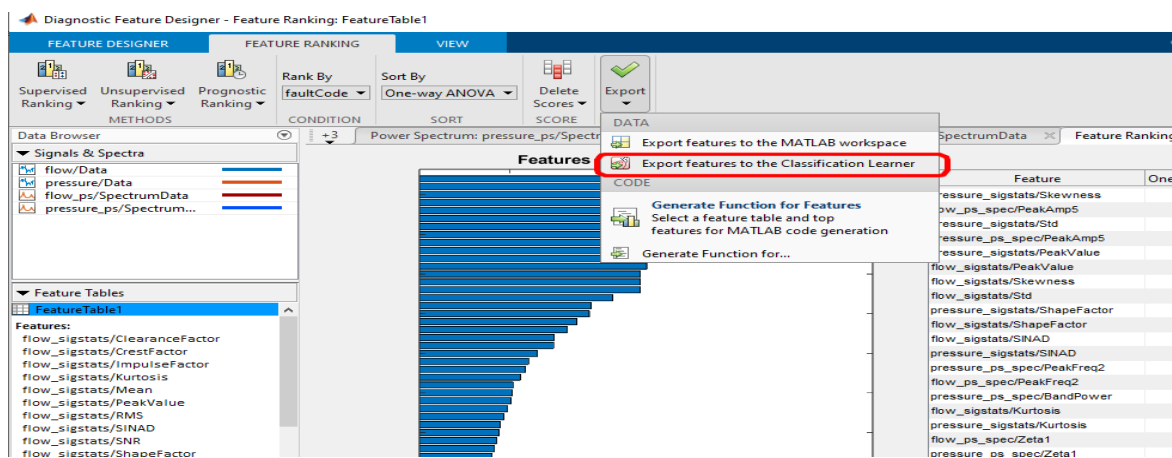


Figure IV:34: Exportation des caractéristiques.

L'application les envoie ensuite à Classification Learner, où elles peuvent être utilisées pour concevoir un classificateur permettant d'identifier les différentes failles.

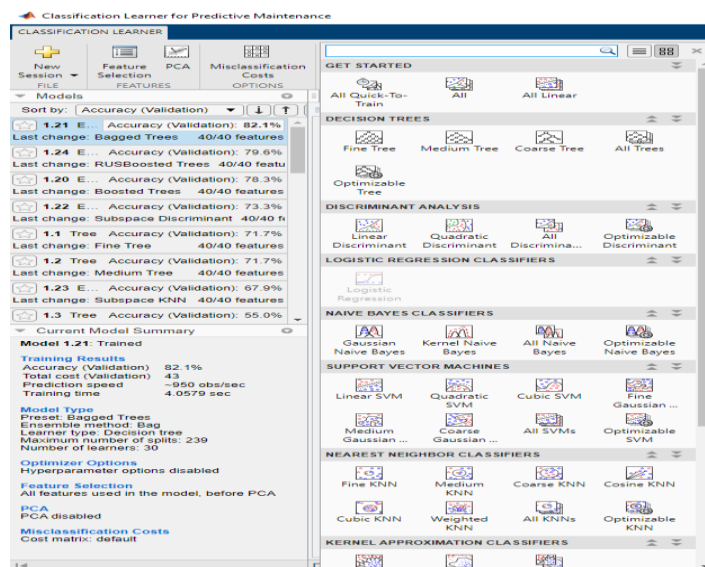


Figure IV:35: Types de Modèles de classification.

Il existe plusieurs types de model de classification, on va choisie tout par cliquent *All* puis on clique sur *train*

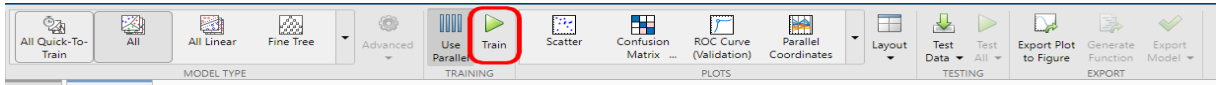


Figure IV.33: Entraînement du Model.

On classe par ordre de précision croissant pour sélectionner le model plus précis.

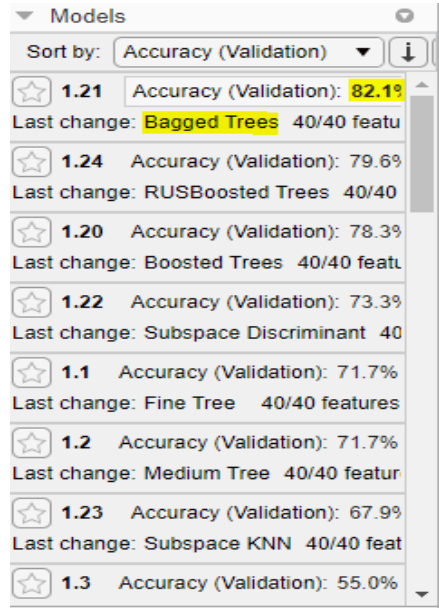


Figure IV:36: Model 'Bagged Trees'.

Le model *bagged trees* offre la plus grande précision de classification, soit environ 82 %. Le processus étant aléatoire, nos résultats peuvent être différents. On Sélection ce modèle et cliquons sur « *confusion matrix* ».

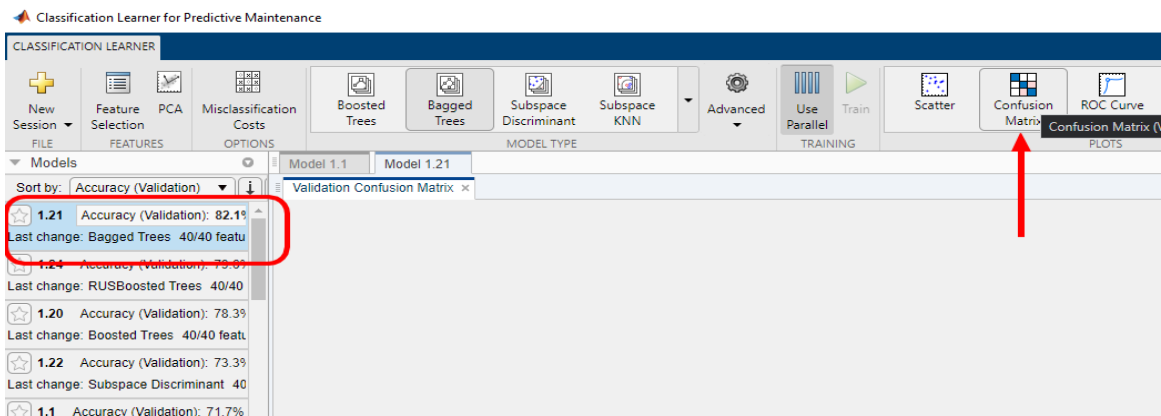


Figure IV:37: Matrice de confusion.

Cette matrice illustre la qualité de classification des modèles par type de faille par cette méthode.

Les entrées sur la diagonale représentent le nombre des défauts correctement classés. Les entrées hors diagonale représentent défauts pour lesquelles les classes prédites et la réalité sont différents.

Pour améliorer la précision, nous pouvons augmenter le nombre de caractéristiques.

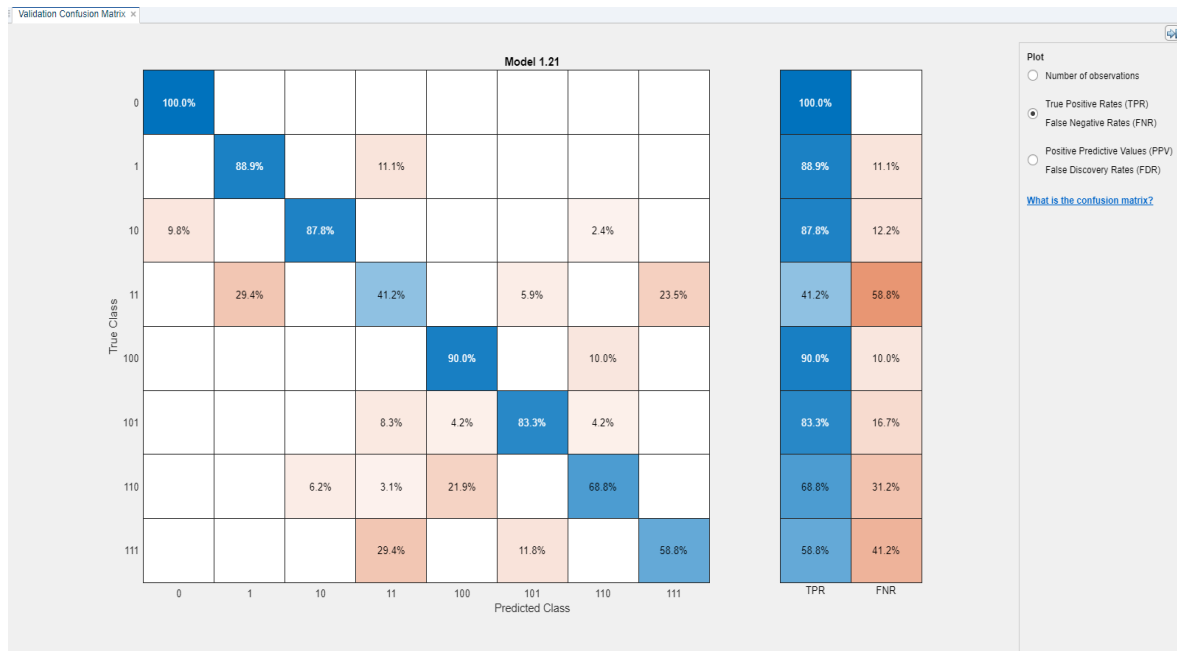


Figure IV:38: Matrice de précision du Model.

L'axe « *True Class* » indique l'état réel de la pompe, tandis que l'axe « *Predicted Class* » indique la précision de la réponse de ce modèle prédictif.

Par exemple : dans cette matrice (Modèle 1.21), l'état 0 de l'axe « *True Class* » croise la colonne 0 de l'axe « *Predicted class* » à 100 %, Cela signifie que le taux d'erreur est complètement nul, la réponse de l'algorithme lorsque la pompe est sans défaut (*code défaut 0*) est 100 % correct.

Plus la diagonale de la matrice est élevée (*proche de 100*), plus le modèle est efficace.

On peut générer le script de la fonction de ce modèle 1.21 :

```
function [trainedClassifier, validationAccuracy] =
trainClassifier(trainingData)
% [trainedClassifier, validationAccuracy] = trainClassifier(trainingData)
% Returns a trained classifier and its accuracy. This code recreates the
% classification model trained in Classification Learner app. Use the
% generated code to automate training the same model with new data, or to
```

```

% learn how to programmatically train models.
%
% Input:
%   trainingData: A table containing the same predictor and response
%   columns as those imported into the app.
%
% Output:
%   trainedClassifier: A struct containing the trained classifier. The
%   struct contains various fields with information about the trained
%   classifier.
%
%   trainedClassifier.predictFcn: A function to make predictions on new
%   data.
%
%   validationAccuracy: A double containing the accuracy as a
%   percentage. In the app, the Models pane displays this overall
%   accuracy score for each model.
%
% Use the code to train the model with new data. To retrain your
% classifier, call the function from the command line with your original
% data or new data as the input argument trainingData.
%
% For example, to retrain a classifier trained with the original data set
% T, enter:
%   [trainedClassifier, validationAccuracy] = trainClassifier(T)
%
% To make predictions with the returned 'trainedClassifier' on new data
% T2,
% use
%   yfit = trainedClassifier.predictFcn(T2)
%
% T2 must be a table containing at least the same predictor columns as
% used
% during training. For details, enter:
%   trainedClassifier.HowToPredict

% Extract predictors and response
% This code processes the data into the right shape for training the
% model.
inputTable = trainingData;
predictorNames = {'flow_sigstats/ClearanceFactor',
'flow_sigstats/CrestFactor', 'flow_sigstats/ImpulseFactor',
'flow_sigstats/Kurtosis', 'flow_sigstats/Mean',
'flow_sigstats/PeakValue', 'flow_sigstats/RMS', 'flow_sigstats/SINAD',
'flow_sigstats/SNR', 'flow_sigstats/ShapeFactor',
'flow_sigstats/Skewness', 'flow_sigstats/Std', 'flow_sigstats/THD',
'pressure_sigstats/ClearanceFactor', 'pressure_sigstats/CrestFactor',
'pressure_sigstats/ImpulseFactor', 'pressure_sigstats/Kurtosis',
'pressure_sigstats/Mean', 'pressure_sigstats/PeakValue',
'pressure_sigstats/RMS', 'pressure_sigstats/SINAD',
'pressure_sigstats/SNR', 'pressure_sigstats/ShapeFactor',

```

```

'pressure_sigstats/Skewness', 'pressure_sigstats/Std',
'pressure_sigstats/THD', 'flow_ps_spec/PeakAmp1',
'flow_ps_spec/PeakAmp2', 'flow_ps_spec/PeakAmp3',
'flow_ps_spec/PeakAmp4', 'flow_ps_spec/PeakAmp5', 'flow_ps_spec/Zeta1',
'pressure_ps_spec/PeakAmp1', 'pressure_ps_spec/PeakAmp2',
'pressure_ps_spec/PeakAmp3', 'pressure_ps_spec/PeakAmp4',
'pressure_ps_spec/PeakAmp5', 'pressure_ps_spec/BandPower',
'flow_ps_spec_1/PeakAmp1', 'flow_ps_spec_1/PeakAmp2',
'flow_ps_spec_1/PeakAmp3', 'flow_ps_spec_1/PeakAmp4',
'flow_ps_spec_1/PeakAmp5', 'flow_ps_spec_1/Zeta1'};
predictors = inputTable(:, predictorNames);
response = inputTable.faultCode;
isCategoricalPredictor = [false, false, false, false, false, false, false,
false, false, false, false, false, false, false, false, false, false,
false, false, false, false, false, false, false, false, false, false,
false, false, false, false, false, false, false, false, false, false,
false, false, false, false, false, false, false];

% Train a classifier
% This code specifies all the classifier options and trains the classifier.
template = templateTree(...
    'MaxNumSplits', 239);
classificationEnsemble = fitcensemble(...
    predictors, ...
    response, ...
    'Method', 'Bag', ...
    'NumLearningCycles', 30, ...
    'Learners', template, ...
    'ClassNames', categorical({'0'; '1'; '10'; '11'; '100'; '101'; '110';
'111'}, {'0' '1' '10' '11' '100' '101' '110' '111'}));

% Create the result struct with predict function
predictorExtractionFcn = @(t) t(:, predictorNames);
ensemblePredictFcn = @(x) predict(classificationEnsemble, x);
trainedClassifier.predictFcn = @ (x)
ensemblePredictFcn(predictorExtractionFcn(x));

% Add additional fields to the result struct
trainedClassifier.RequiredVariables = {'flow_ps_spec/PeakAmp1',
'flow_ps_spec/PeakAmp2', 'flow_ps_spec/PeakAmp3',
'flow_ps_spec/PeakAmp4', 'flow_ps_spec/PeakAmp5', 'flow_ps_spec/Zeta1',
'flow_ps_spec_1/PeakAmp1', 'flow_ps_spec_1/PeakAmp2',
'flow_ps_spec_1/PeakAmp3', 'flow_ps_spec_1/PeakAmp4',
'flow_ps_spec_1/PeakAmp5', 'flow_ps_spec_1/Zeta1',
'flow_sigstats/ClearanceFactor', 'flow_sigstats/CrestFactor',
'flow_sigstats/ImpulseFactor', 'flow_sigstats/Kurtosis',
'flow_sigstats/Mean', 'flow_sigstats/PeakValue', 'flow_sigstats/RMS',
'flow_sigstats/SINAD', 'flow_sigstats/SNR', 'flow_sigstats/ShapeFactor',
'flow_sigstats/Skewness', 'flow_sigstats/Std', 'flow_sigstats/THD',
'pressure_ps_spec/BandPower', 'pressure_ps_spec/PeakAmp1',
'pressure_ps_spec/PeakAmp2', 'pressure_ps_spec/PeakAmp3',
'pressure_ps_spec/PeakAmp4', 'pressure_ps_spec/PeakAmp5',

```

```

'pressure_sigstats/ClearanceFactor',      'pressure_sigstats/CrestFactor',
'pressure_sigstats/ImpulseFactor',        'pressure_sigstats/Kurtosis',
'pressure_sigstats/Mean',                 'pressure_sigstats/PeakValue',
'pressure_sigstats/RMS',                   'pressure_sigstats/SINAD',
'pressure_sigstats/SNR',                   'pressure_sigstats/ShapeFactor',
'pressure_sigstats/Skewness',              'pressure_sigstats/Std',
'pressure_sigstats/THD'];
trainedClassifier.ClassificationEnsemble = classificationEnsemble;
trainedClassifier.About = 'This struct is a trained model exported from
Classification Learner R2021b.';
trainedClassifier.HowToPredict = sprintf('To make predictions on a new
table, T, use: \n yfit = c.predictFcn(T) \nreplacing ''c'' with the name
of the variable that is this struct, e.g. ''trainedModel''. \n \nThe table,
T, must contain the variables returned by: \n  c.RequiredVariables
\nVariable formats (e.g. matrix/vector, datatype) must match the original
training data. \nAdditional variables are ignored. \n \nFor more
information, see <a href="matlab:helpview(fullfile(docroot, ''stats'',
''stats.map''), ''appclassification_exportmodeltoworkspace'')">How to
predict using an exported model</a>.');

% Extract predictors and response
% This code processes the data into the right shape for training the
% model.
inputTable = trainingData;
predictorNames = {'flow_sigstats/ClearanceFactor',
'flow_sigstats/CrestFactor',
'flow_sigstats/Kurtosis',
'flow_sigstats/PeakValue', 'flow_sigstats/RMS', 'flow_sigstats/SINAD',
'flow_sigstats/SNR',
'flow_sigstats/Skewness', 'flow_sigstats/Std', 'flow_sigstats/THD',
'pressure_sigstats/ClearanceFactor', 'pressure_sigstats/CrestFactor',
'pressure_sigstats/ImpulseFactor',
'pressure_sigstats/Kurtosis',
'pressure_sigstats/Mean',
'pressure_sigstats/RMS',
'pressure_sigstats/SNR',
'pressure_sigstats/Skewness',
'pressure_sigstats/THD',
'flow_ps_spec/PeakAmp2',
'flow_ps_spec/PeakAmp4', 'flow_ps_spec/PeakAmp5', 'flow_ps_spec/Zeta1',
'pressure_ps_spec/PeakAmp1',
'pressure_ps_spec/PeakAmp3',
'pressure_ps_spec/PeakAmp5',
'flow_ps_spec_1/PeakAmp1',
'flow_ps_spec_1/PeakAmp3',
'flow_ps_spec_1/PeakAmp5', 'flow_ps_spec_1/Zeta1'};
predictors = inputTable(:, predictorNames);
response = inputTable.faultCode;
isCategoricalPredictor = [false, false, false, false, false, false, false,
false, false, false, false, false, false, false, false, false, false,
false, false, false, false, false, false, false, false, false, false,
false, false, false, false, false, false, false, false, false, false,
false, false, false, false, false, false, false, false];

```

```

% Perform cross-validation
partitionedModel = crossval(trainedClassifier.ClassificationEnsemble,
'KFold', 5);

% Compute validation predictions
[validationPredictions, validationScores] =
kfoldPredict(partitionedModel);

% Compute validation accuracy
validationAccuracy = 1 - kfoldLoss(partitionedModel, 'LossFun',
'ClassifError');

```

Au cours de cette étape, nous classons les données comme saines/erronées, définis des seuils pour les états bon/avertissement/défaillance, et estime la durée de vie restante des composants.

Nous devons dresser une liste exhaustive des scénarios de défaillance à prévoir, choisir des méthodes de classification et simuler des modèles. Les applications proposent des interfaces graphiques pour l'application du Machine Learning qui simplifient la prise en main et la comparaison des résultats obtenus en entraînant de nombreux types différents de modèles.

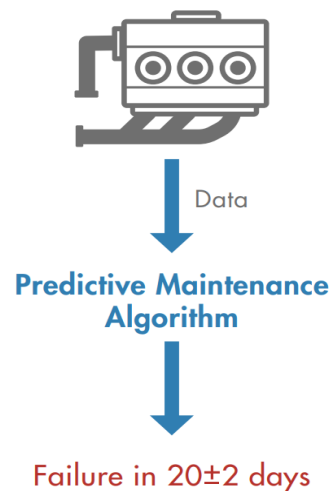


Figure IV:39: Estimation de la durée de vie restante.

IV.2.4.1 C'est quoi la durée de vie utile restante (RUL) ?

La durée de vie utile restante (RUL) (Remaining Usfule Life) est la durée pendant laquelle une machine est susceptible de fonctionner avant de nécessiter une réparation ou un remplacement.

En prenant en compte la RUL, les ingénieurs peuvent planifier la maintenance, optimiser l'efficacité opérationnelle et éviter les temps d'arrêt imprévus. C'est pourquoi l'estimation de la RUL est une priorité absolue dans les programmes de maintenance prédictive.

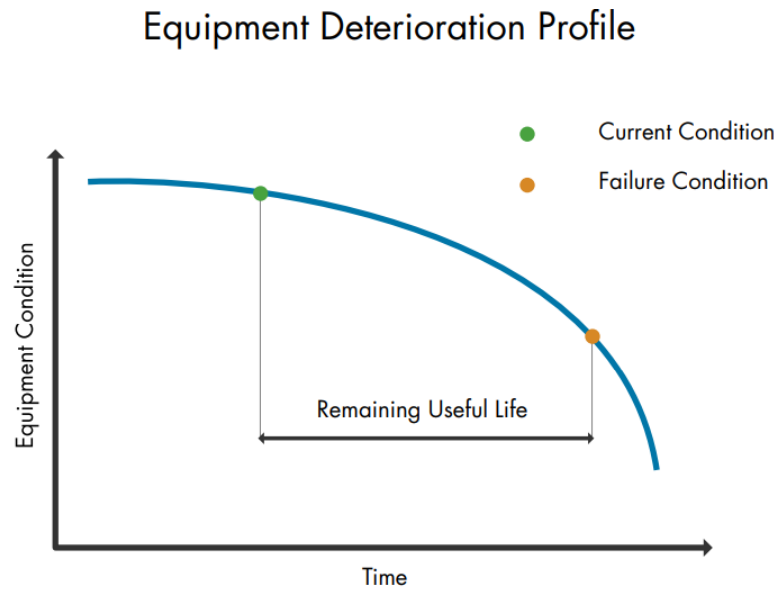


Figure IV:40: La durée de vie utile restante (RUL).

IV.2.4.2 Trois façons d'estimer le RUL :

Predictive Maintenance Toolbox™ inclut des modèles spécialisés conçus pour calculer la durée de vie utile restante (RUL) à partir de différents types de données système mesurées. Ces modèles sont utiles lorsque nous disposons de données historiques et d'informations telles que :

- Historiques de fonctionnement jusqu'à la panne de machines similaires à celle que nous souhaitons diagnostiquer ;
- Valeur seuil connue d'un indicateur d'état indiquant une panne ;
- Données sur le temps ou l'utilisation nécessaire à des machines similaires pour tomber en panne (durée de vie).

Il existe trois familles de modèles d'estimation de la durée de vie utile restante.

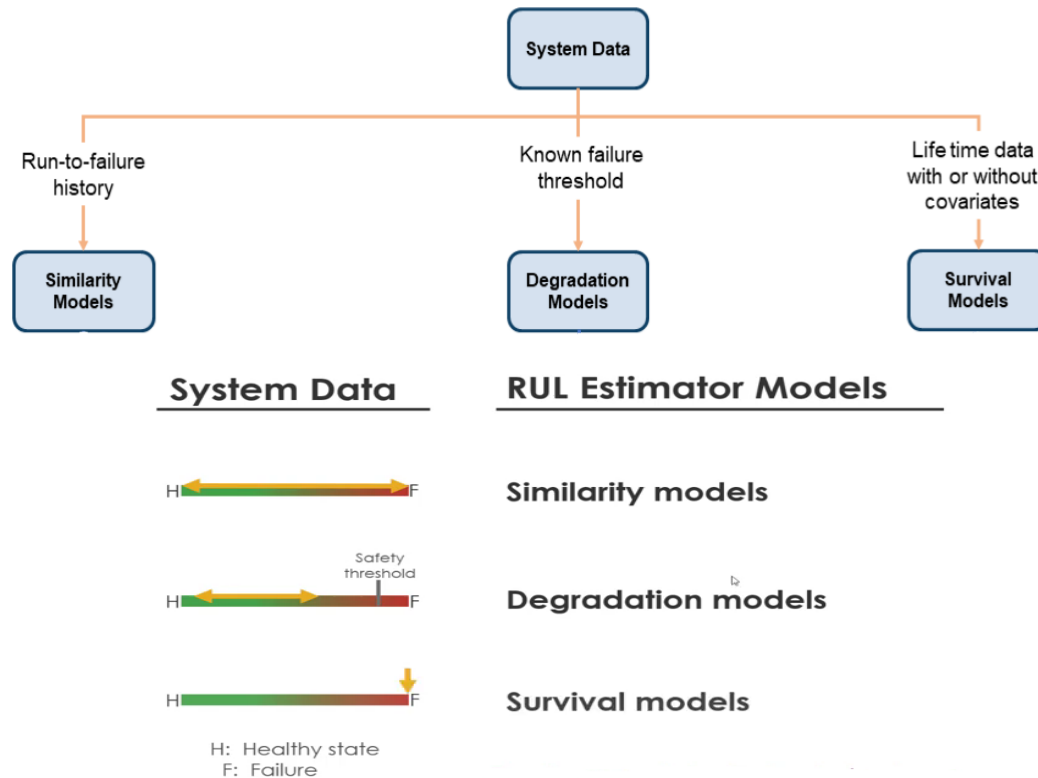


Figure IV:41: Méthodes de prédiction RUL.

A. Modèles de similarité (similarity models) :

Les modèles de similarité basent la prédiction du RUL d'une machine de test sur le comportement connu de machines similaires issues d'une base de données historique. Ces modèles comparent une tendance des données de test ou des valeurs d'indicateurs d'état aux mêmes informations extraites d'autres systèmes similaires.

Les modèles de similarité sont utiles lorsque :

- Nous disposons de données de fonctionnement jusqu'à la défaillance provenant de systèmes (composants) similaires. Ces données commencent en fonctionnement normal et se terminent lorsque la machine est proche de la panne ou de la maintenance.
- Les données de fonctionnement jusqu'à la défaillance présentent des comportements de dégradation similaires. Autrement dit, les données évoluent de manière caractéristique à mesure que le système se dégrade.

Nous pouvons donc utiliser des modèles de similarité lorsque nous pouvons obtenir des profils de dégradation à partir de notre ensemble de données. Ces profils représentent l'évolution d'un ou plusieurs indicateurs d'état pour chaque machine de l'ensemble (chaque composant), lorsque la machine passe d'un état normal à un état défectueux.

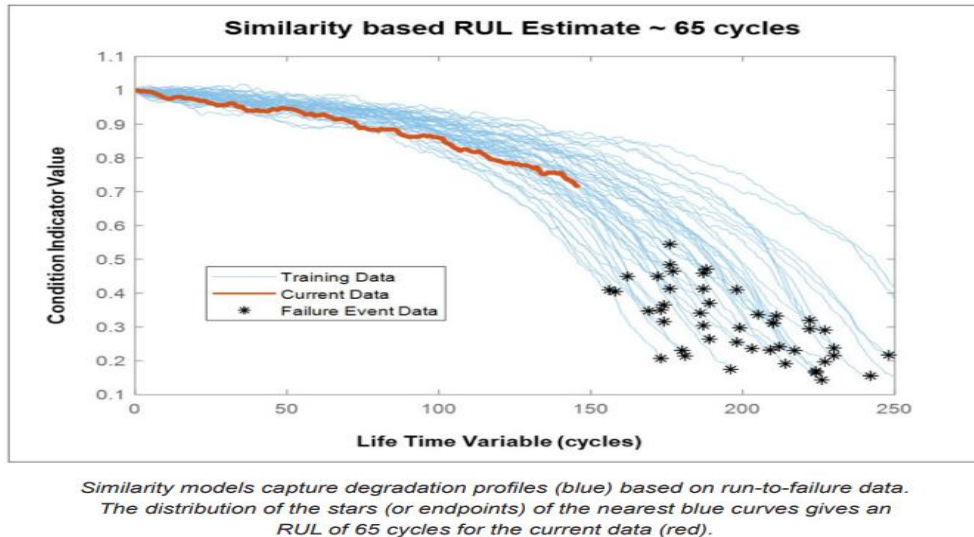
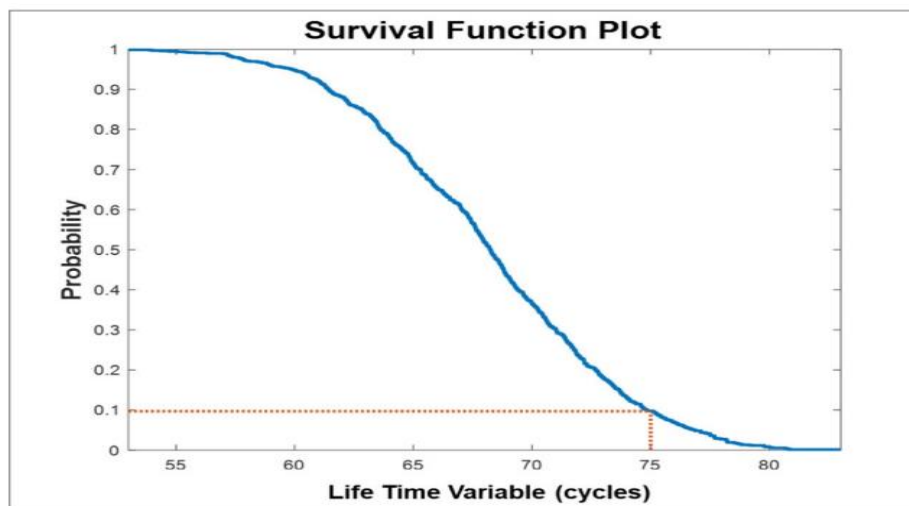


Figure IV:42: Modèles de similarité.

B. Modèles de survie (survival model) :

L'analyse de survie est une méthode statistique utilisée pour modéliser les données de temps jusqu'à l'événement. Elle est utile lorsque nous ne disposons pas d'historiques complets de fonctionnement jusqu'à la panne, mais que nous disposons uniquement de données sur la durée de vie de composants similaires.



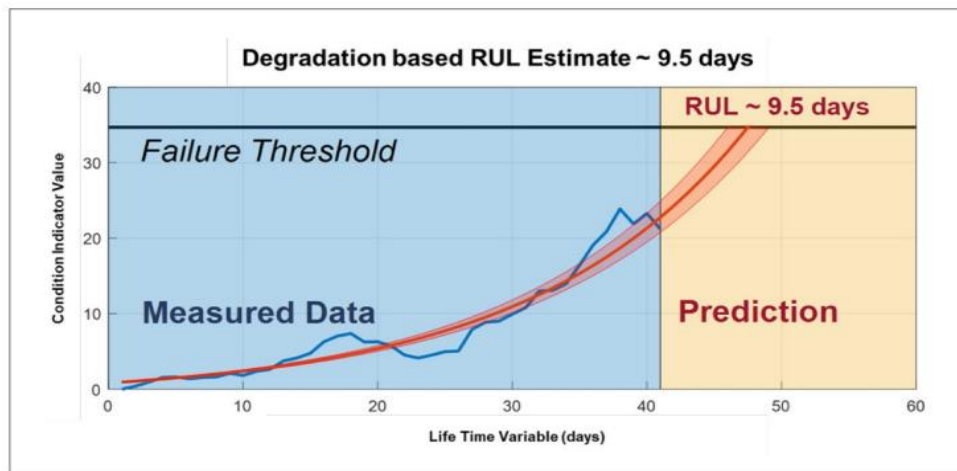
Survival function plot. At the end of 75 cycles, the probability of a battery's continuing to operate is 0.1, or 10%.

Figure IV:43: Modèles de survie.

Par exemple : nous pouvons connaître le kilométrage parcouru par chaque moteur de votre ensemble avant de nécessiter une maintenance, ou le nombre d'heures de fonctionnement de chaque machine de votre ensemble avant la panne.

C. Modèles de dégradation (Degradation Models) :

Les modèles de dégradation extrapolent le comportement passé pour prédire l'état futur. Ce type de calcul de durée de vie utile (RUL) ajuste un modèle linéaire ou exponentiel au profil de dégradation d'un indicateur d'état, en fonction des profils de dégradation de votre ensemble. Il utilise ensuite le profil de dégradation du composant testé pour calculer statistiquement le temps restant avant que l'indicateur n'atteigne un seuil prédéfini. Ces modèles sont particulièrement utiles lorsqu'une valeur connue de votre indicateur d'état indique une défaillance.



Degradation model for a high-speed bearing. The bearing has an estimated RUL of 9.5 days based on its current condition data (blue) and the exponential degradation model (red) fit to this data.

Figure IV:44: Modèles de dégradation.

Parfois, les seules données dont nous disposons concernent des valeurs seuils prescrites.

Par exemple, la température d'un liquide dans une pompe ne peut pas dépasser 71 °C (160 °F) et la pression doit être inférieure à 155 bar (2 200 psi). Grâce à ces informations, nous pouvons adapter des modèles de séries chronologiques aux indicateurs d'état extraits des données des capteurs, tels que la température et la pression, qui augmentent ou diminuent au fil du temps.

Ces modèles de dégradation estiment la durée de vie utile restante (RUL) en prédisant le moment où l'indicateur d'état franchira le seuil. Ils peuvent également être utilisés avec un

indicateur d'état fusionné intégrant les informations de plusieurs indicateurs d'état grâce à des techniques telles que l'analyse en composantes principales.

IV.2.5 Déployer le Modèle:

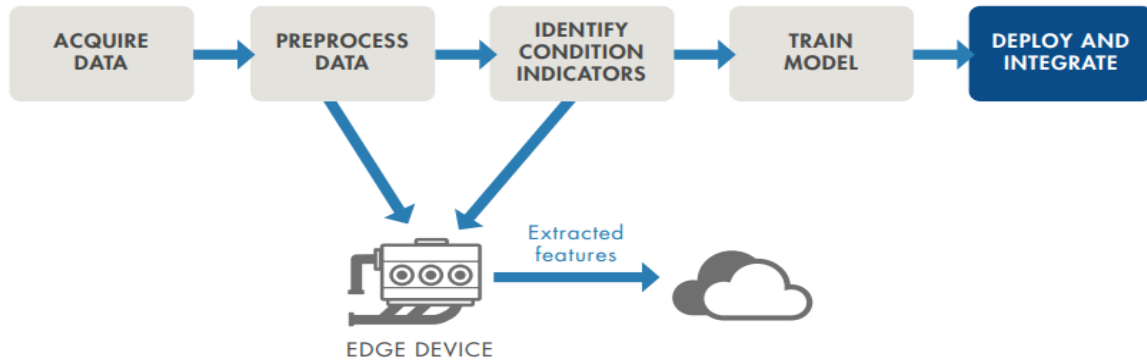


Figure IV:45: Déploiement et Intégration.

Le déploiement implique le transfert de l'algorithme d'un environnement de développement vers un environnement opérationnel réel, où il peut commencer à surveiller les équipements. Cette étape nécessite une planification minutieuse pour garantir une interface fluide entre l'algorithme et les capteurs et systèmes de collecte de données des machines. L'intégration, quant à elle, implique l'intégration de l'algorithme aux flux de travail opérationnels, garantissant ainsi une communication efficace avec les autres systèmes de maintenance et de surveillance. Cela peut inclure la configuration de notifications pour les équipes de maintenance lorsque l'algorithme détecte un problème potentiel ou l'intégration à un tableau de bord affichant des indicateurs de santé des machines en temps réel.

Ways to deploy to any processor or system with zero coding errors

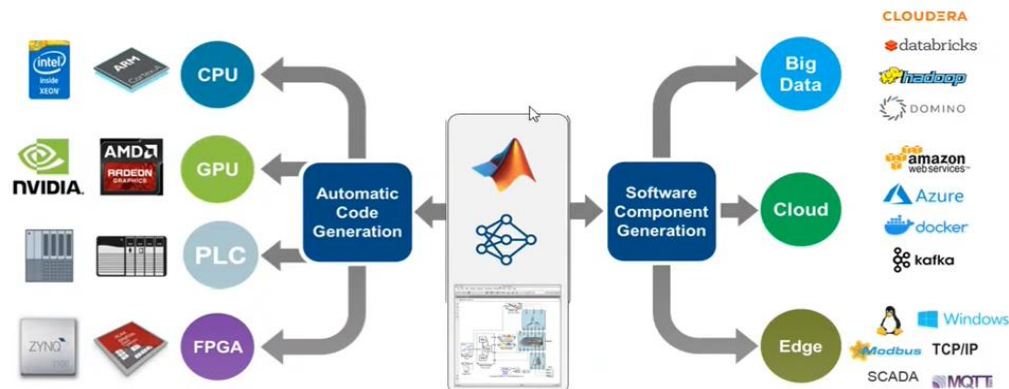


Figure IV:46: Déploiement des Modèles.

Générez du code et déployez des modèles en tant qu'applications sur du hardware. Les modèles peuvent être convertis dans un langage de bas niveau comme le C afin d'être déployés sur des dispositifs embarqués, ou ils peuvent être intégrés à d'autres applications dans un environnement informatique.

Il existe des outils qui permettent d'intégrer automatiquement les modèles à exécuter dans un environnement de production, par exemple MATLAB Compiler™ et MATLAB Production Server™. Les services de conseils peuvent s'avérer particulièrement utiles lorsque nous essayons d'intégrer ces applications dans des systèmes informatiques.

IV.3 Simulation d'une pompe triplex CAT 1051 par Simulink Simscape :

Cet exemple modélise une pompe triplex avec un algorithme de maintenance prédictive qui peut détecter quelles pièces de la pompe sont défaillantes simplement en surveillant la pression de sortie de la pompe.

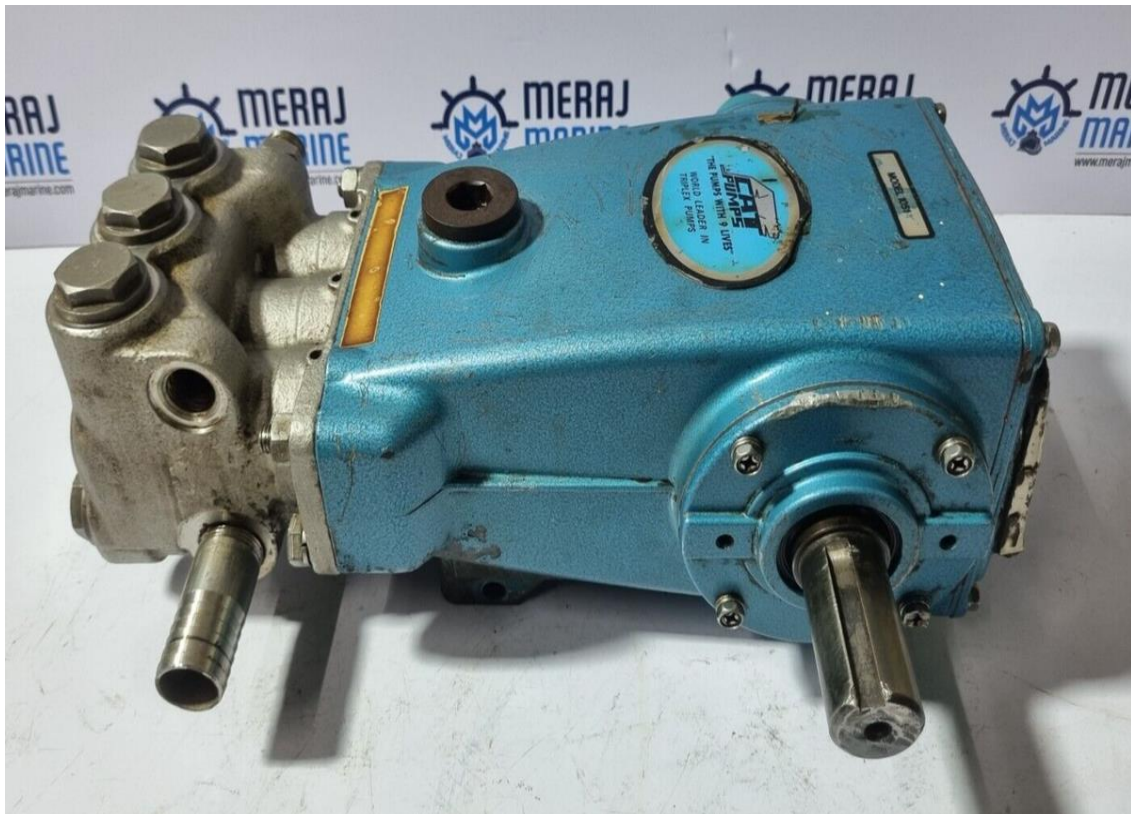


Figure IV:47: Pompe Triplex 1051.

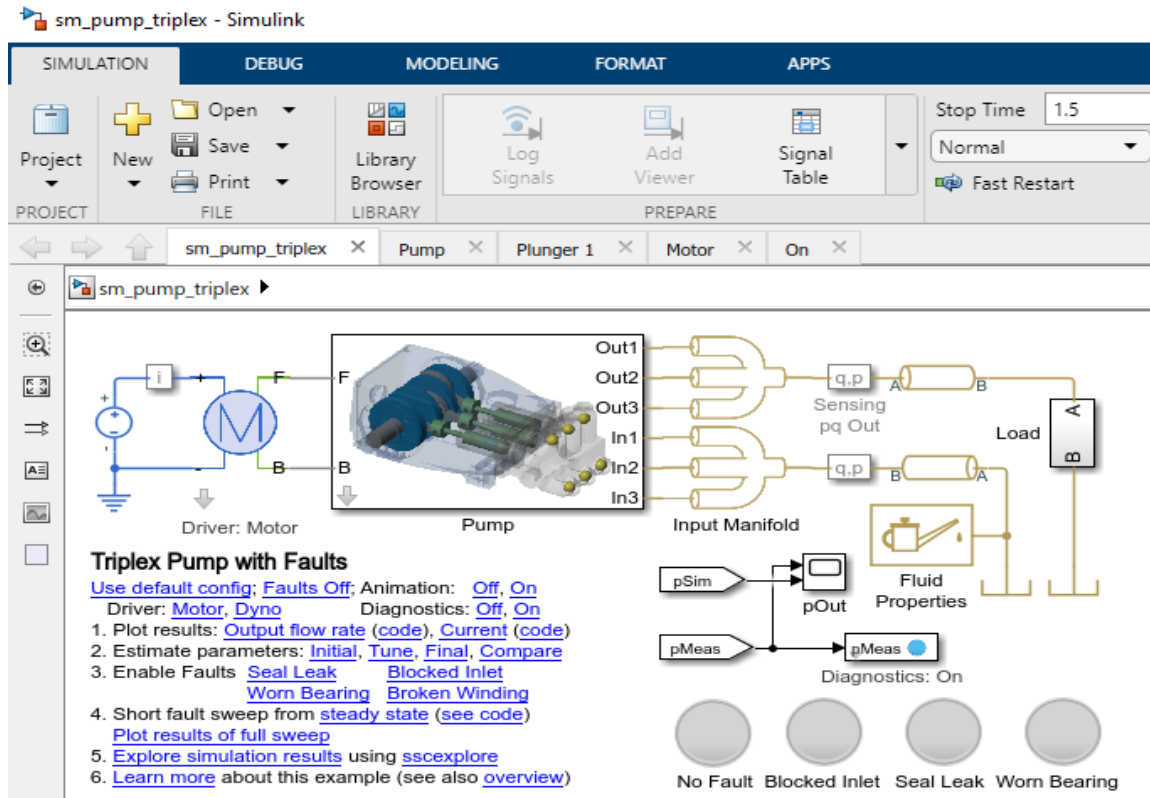


Figure IV:48: Simulation de la pompe par Simulink.

IV.3.1 Composants de la pompe :

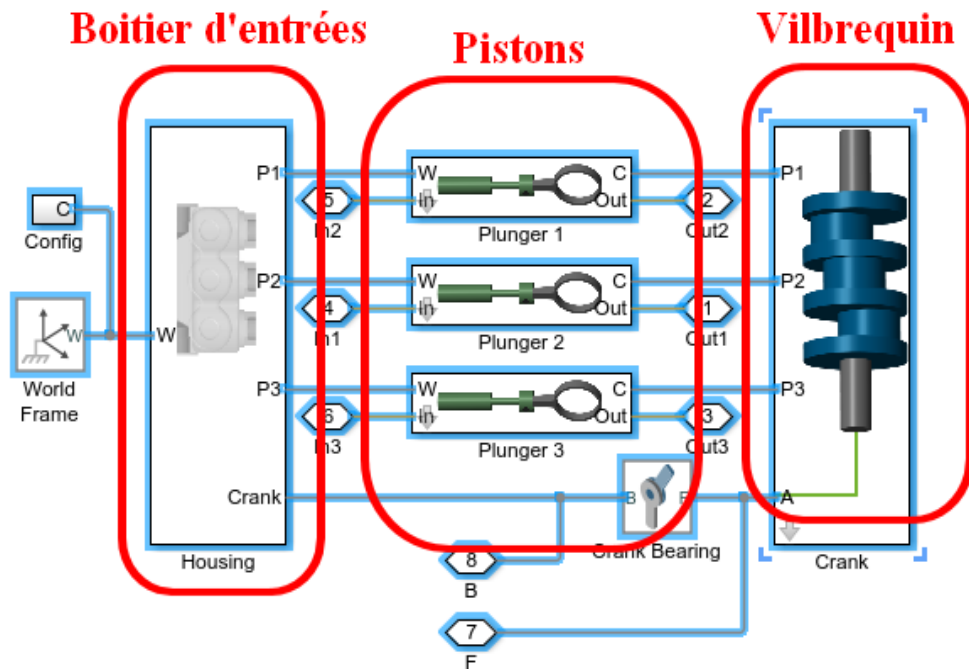


Figure IV:49: L'intérieur de la pompe.

Et chaque composant a ses propres composants, comme le piston ci-dessous

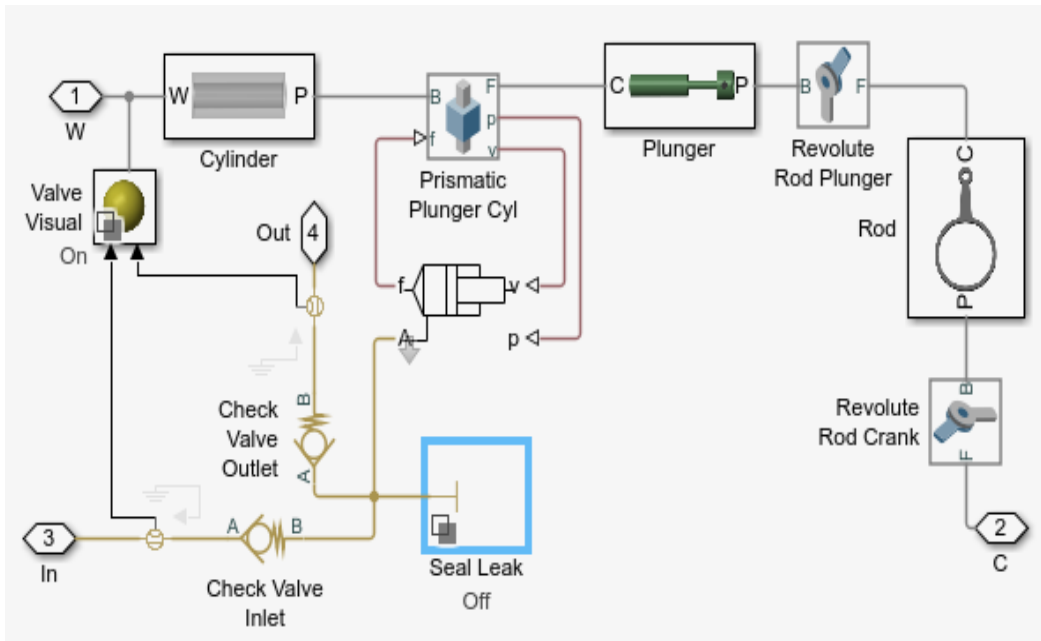


Figure IV:50: Composants du piston.

Aussi le vilebrequin :

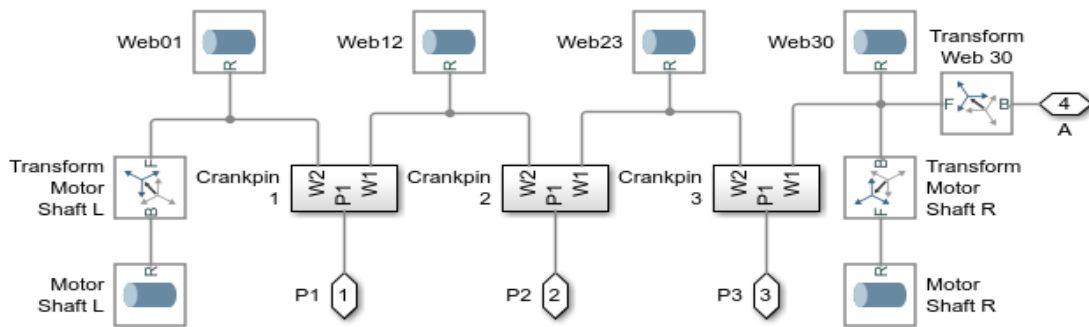


Figure IV:51: Composants du vilebrequin.

IV.3.2 Début de simulation :

➤ En cas de 0 défaut :

Le modèle Simscape de la pompe peut être configuré pour modéliser un comportement dégradé dû à des fuites de joints, des entrées bloquées, l'usure des roulements .

Les défauts dont nous avons parlé précédemment seront injectés dans la pompe et nous verrons comment la pompe réagit dans cette simulation.

Premièrement on va voir l'état initial de la pompe avec aucun défaut

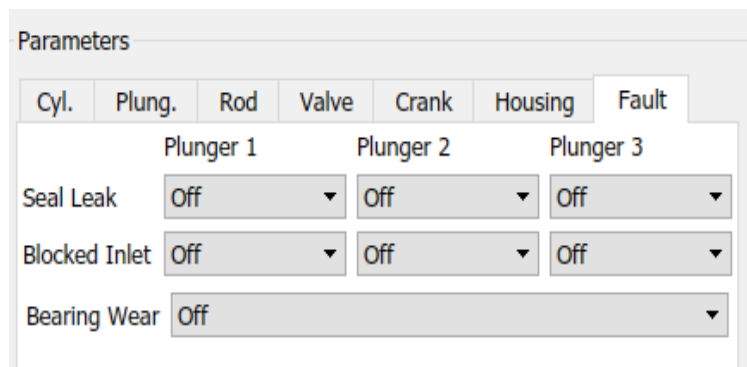


Figure IV:52: Désactivation de toutes les paramètres 'OFF'.

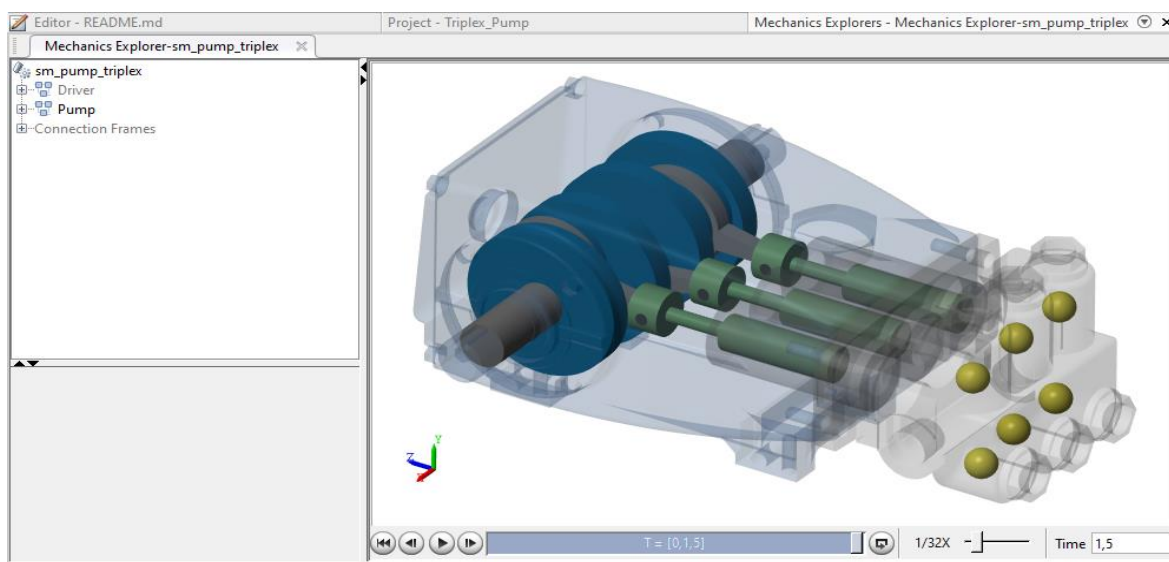


Figure IV:53: Animation 3D de la pompe avec 0 défaut.

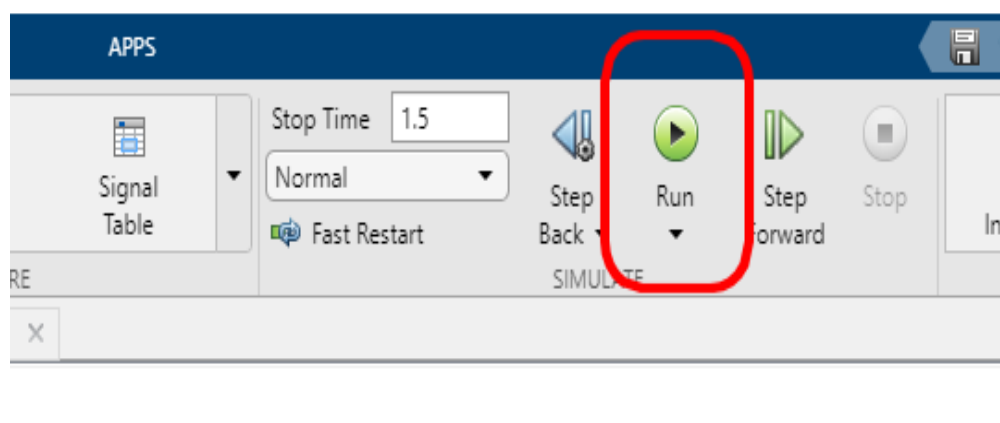


Figure IV:54: Démarrage de simulation 'Run'.

Après avoir cliqué sur « Run », la simulation démarrera et nous obtiendrons alors le résultat dans l'image ci-dessous.

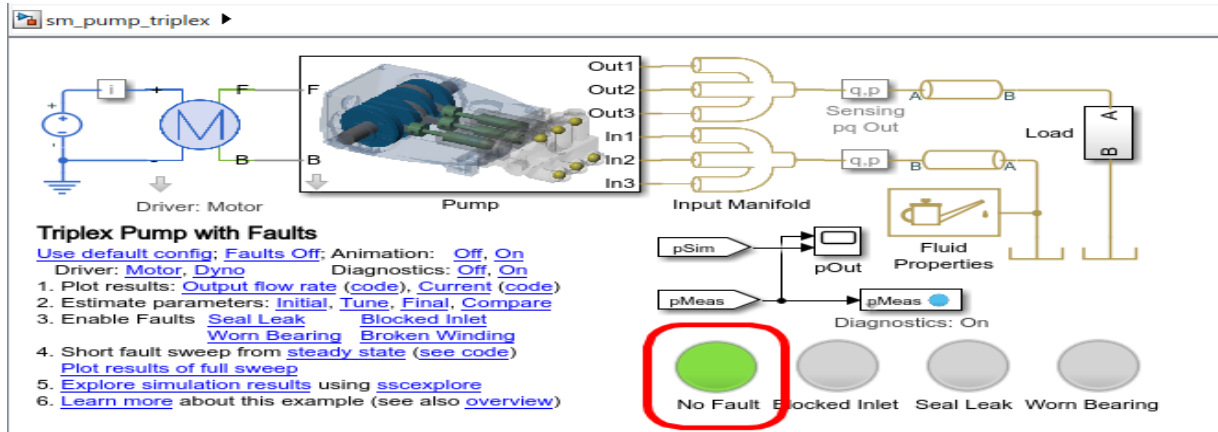


Figure IV:55: Résultat de simulation avec 0 défaut.

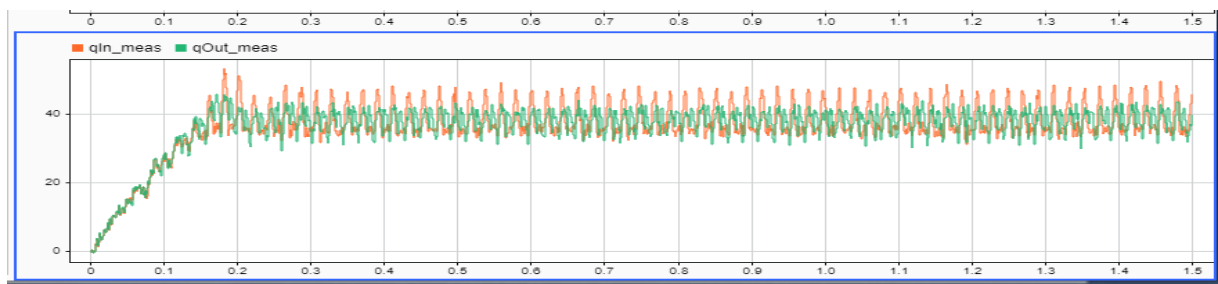


Figure IV:56: Résultat du débit avec 0 défaut.

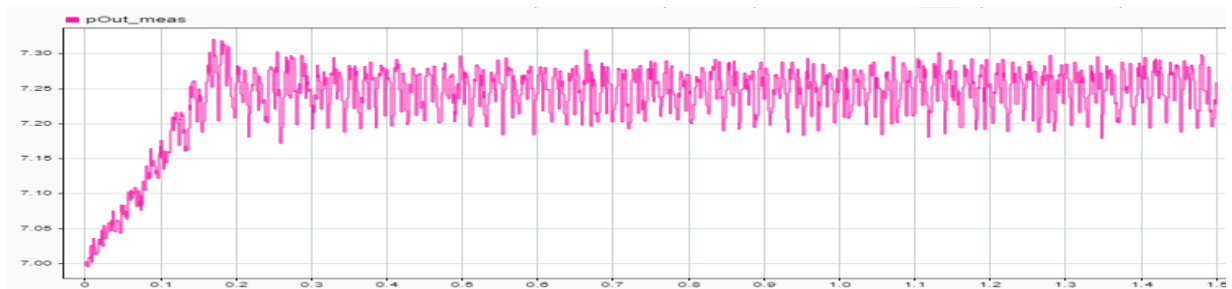


Figure IV:57: Résultat de la pression avec 0 défaut.

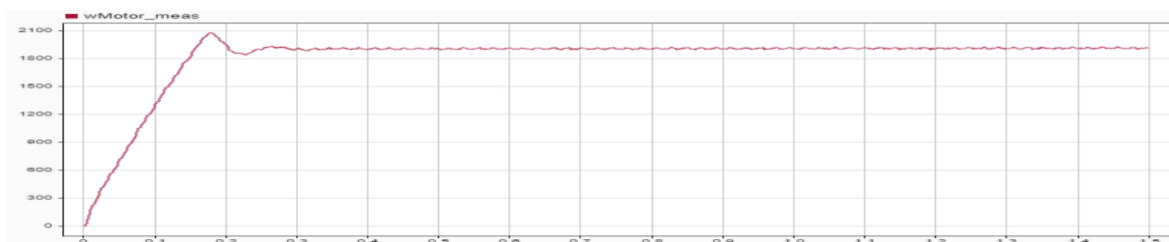


Figure IV:58: Résultat de la vitesse avec 0 défaut.

Nous comparerons les graphiques avec d'autres graphiques qui présentent les 3 défauts.

➤ En cas de fuite de joint :

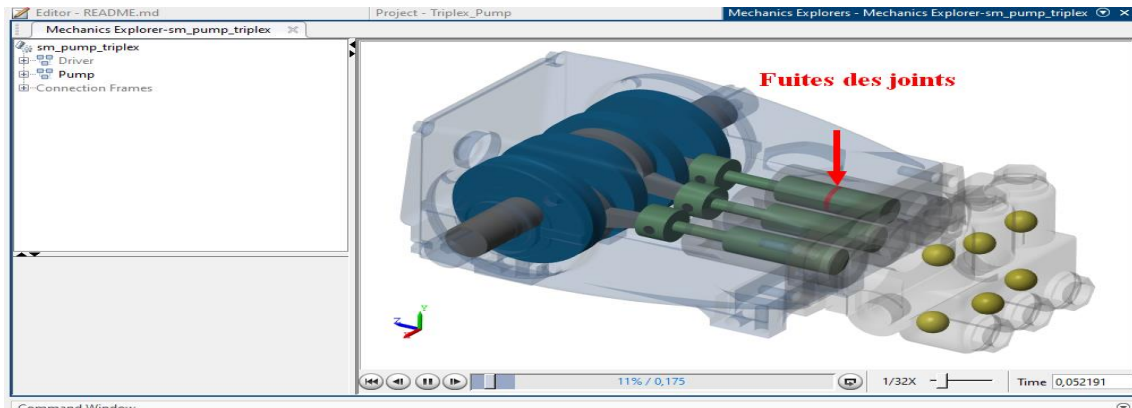


Figure IV:59: Animation 3D de la pompe avec fuite des joints.

Après avoir cliqué sur « Run »

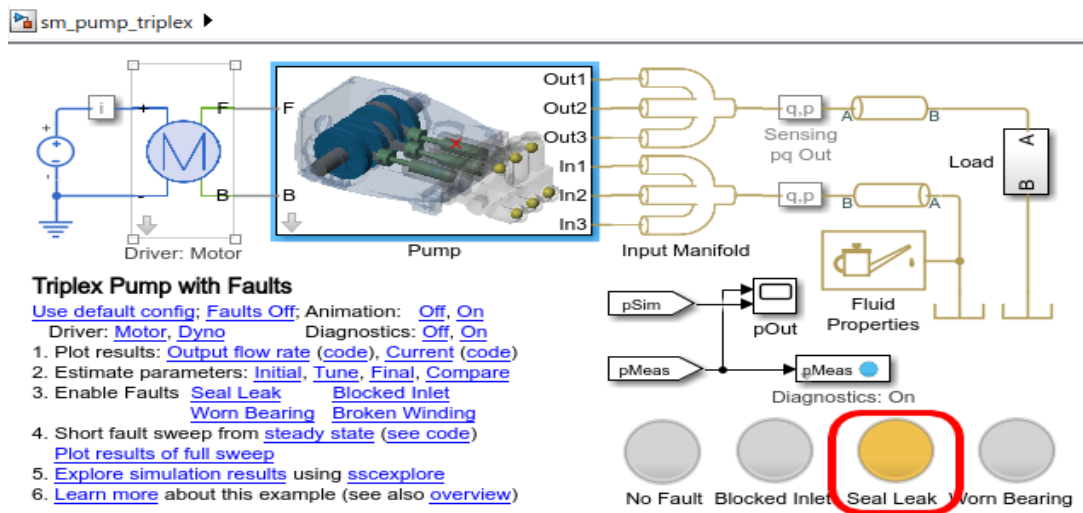


Figure IV:60: Résultat de simulation avec fuite des joints.

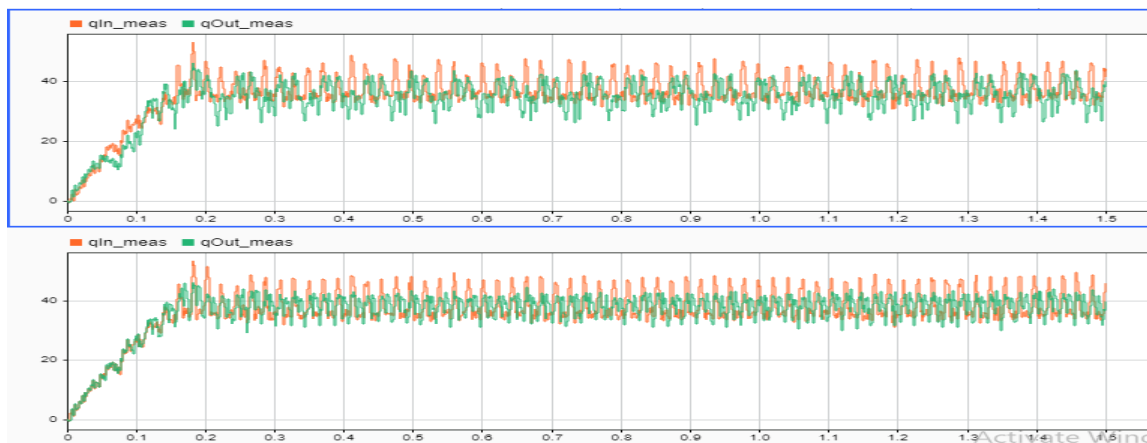


Figure IV:61: Résultat de comparaison du débit en cas de fuite des joints et en cas sain.

On voit clairement la différence entre les deux courbes.

Ainsi que la pression :

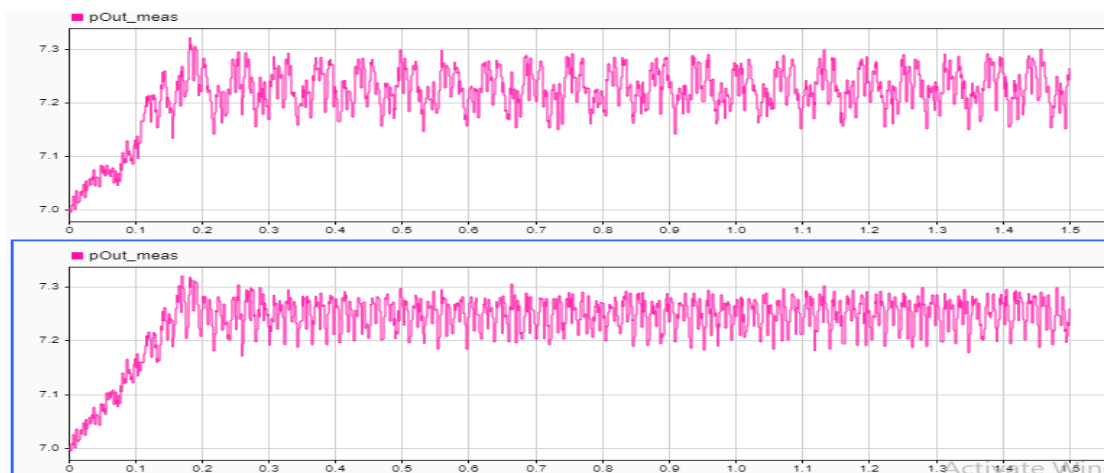


Figure IV:62 : Résultat de comparaison entre la pression en cas de fuite des joints et en cas sain.

Ces constats convergent vers une conclusion claire : la pompe en état dégradé présente une défaillance multiparamétrique détectable à travers une surveillance conjointe du débit, de la pression.

Et la vitesse :

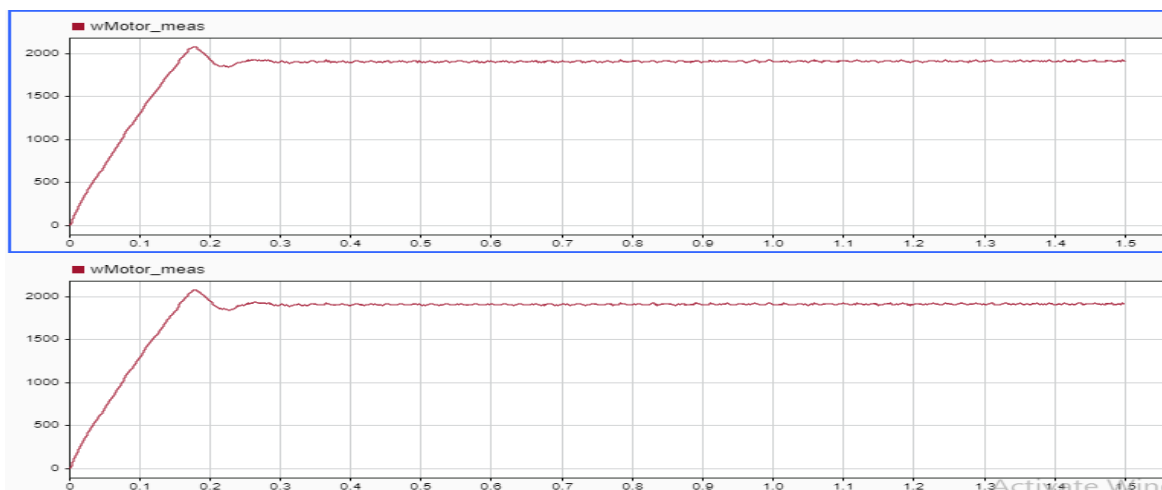


Figure IV:63 : Résultat de comparaison entre la vitesse en cas de fuite des joints et en cas sain.

➤ En cas d'usure roulement :

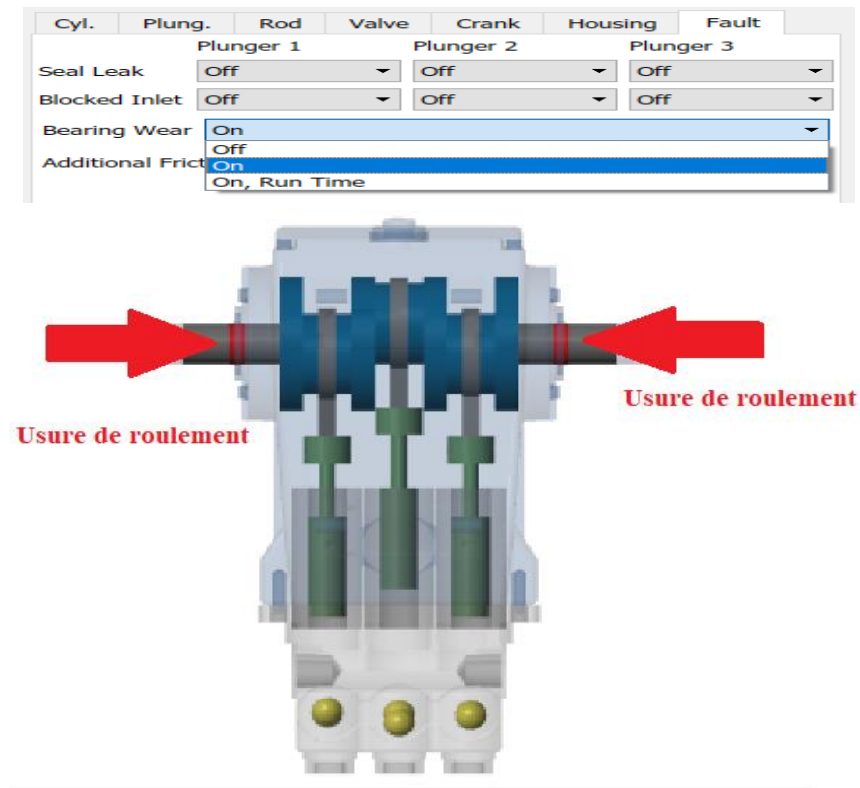


Figure IV:64 : Animation 3D en cas d'usure roulement.

Après avoir cliqué sur « Run »

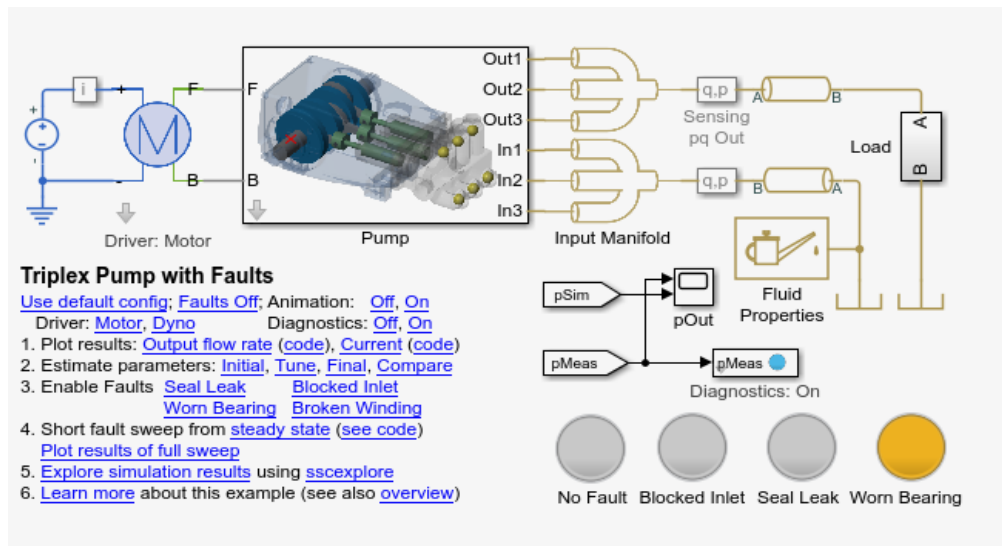


Figure IV:65 : Résultat de simulation avec usure de roulements.

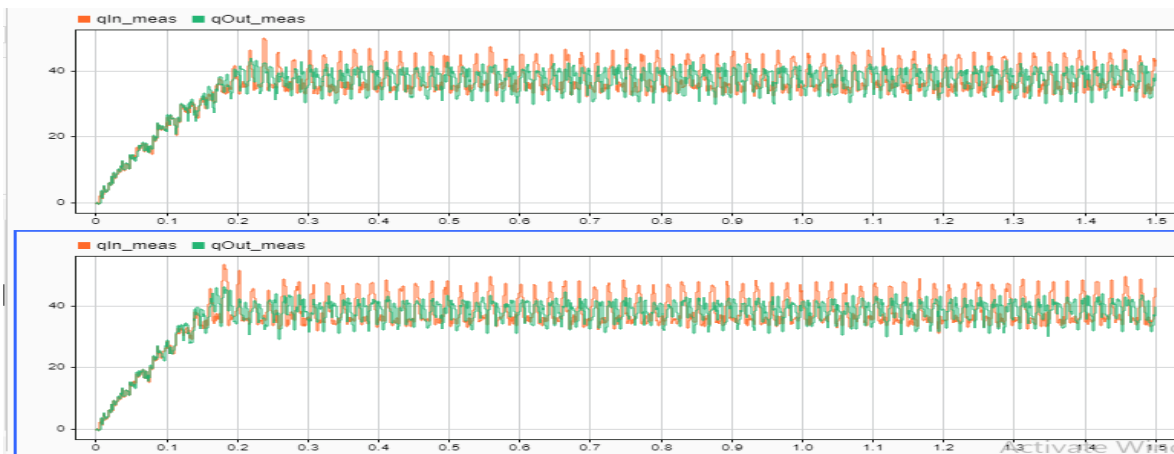


Figure IV:66 : Résultat de comparaison entre le débit en cas d'usure roulements et en cas sain.

Ainsi que la pression :

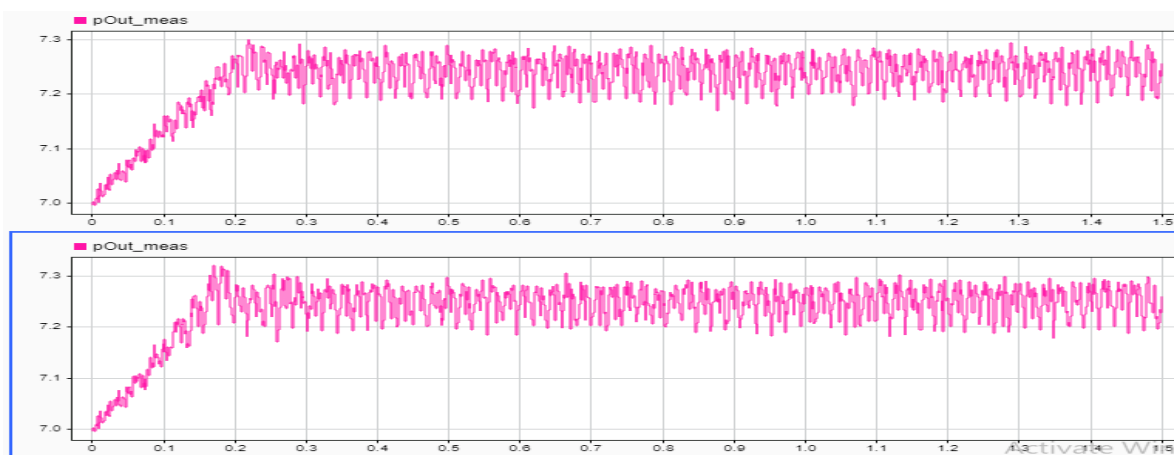


Figure IV:67 : Résultat de comparaison entre la pression avec usure des roulements et en cas sain.

Et la vitesse :

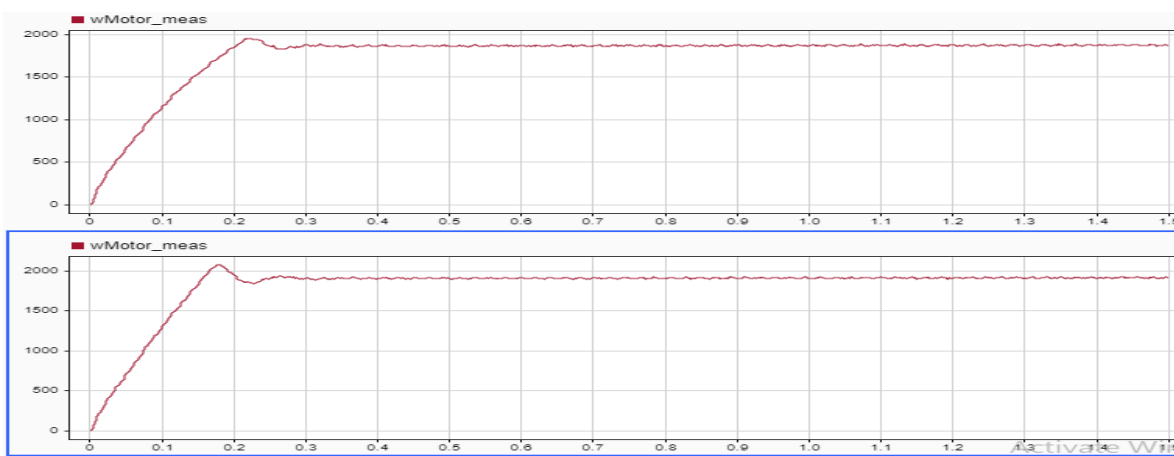


Figure IV:68 : Résultat de comparaison entre la vitesse en cas d'usure des roulements et en cas sain.

➤ En cas d'entrée bloquée :

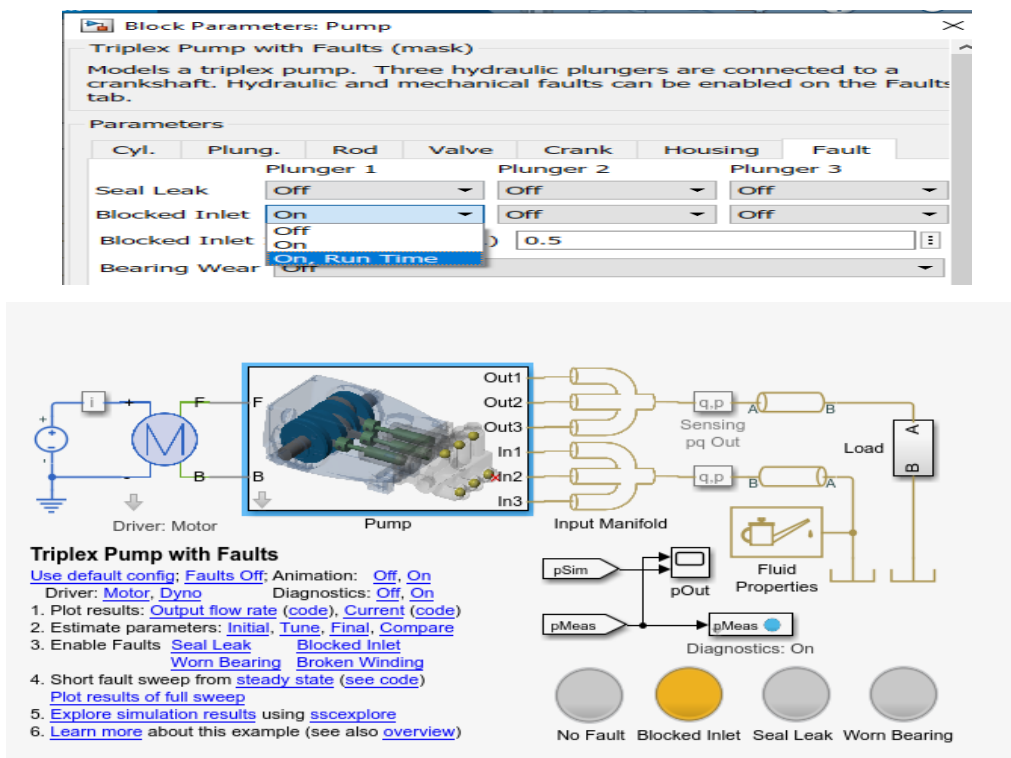


Figure IV:69 : Résultat de simulation avec entrée bloquée.



Figure IV:70 : Animation 3D en cas d'entrée bloquée

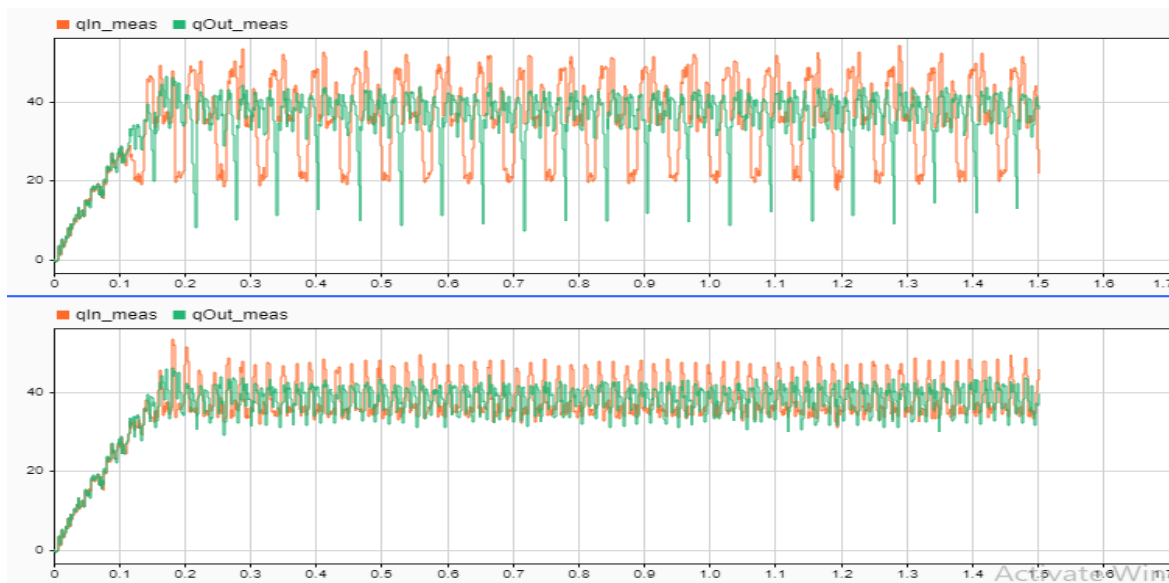


Figure IV:71: Résultat de comparaison le débit en cas d'entrée bloquée et en cas sain.

Les graphes débit ici agit d'une manière alternative qui pourrait provoquer de la cavitation et des vibrations et cela peut conduire à la perte de composants.

Ainsi que la pression :

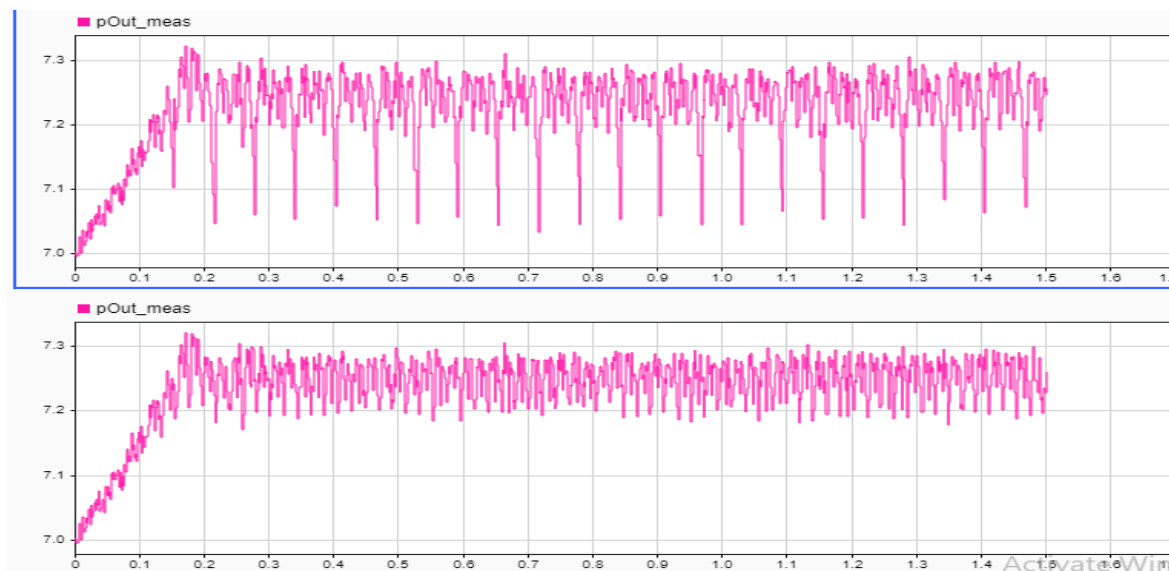


Figure IV:72: Résultat de comparaison de la pression en cas d'entrée bloquée et en cas sain.

Les fluctuations de pression provoquent aussi une cavitation, car les chutes de pression soudaines du côté aspiration provoquent la formation et l'effondrement de bulles de vapeur, ce qui entraîne un débit erratique et des pics de pression.

Et la vitesse :

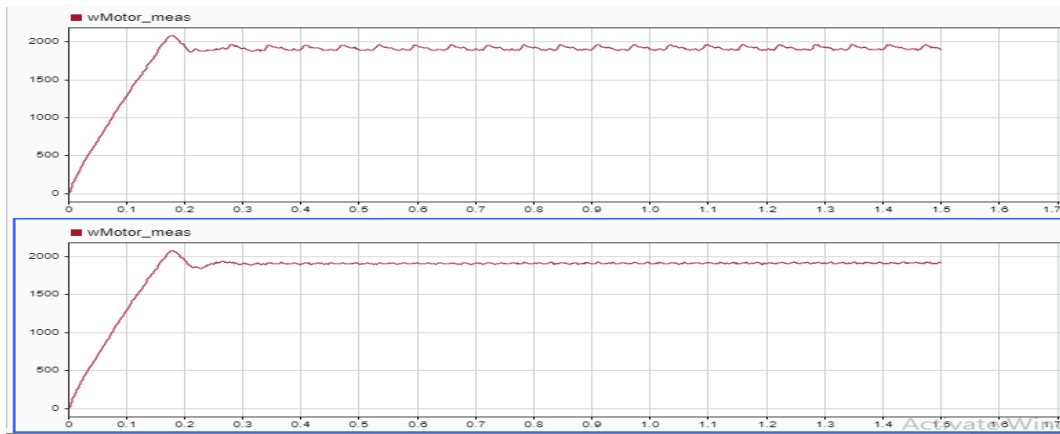


Figure IV:73: Résultat de la comparaison entre la vitesse en cas d'entrée bloquée et en cas sain.

➤ En cas de usure roulements et entrée bloquée :

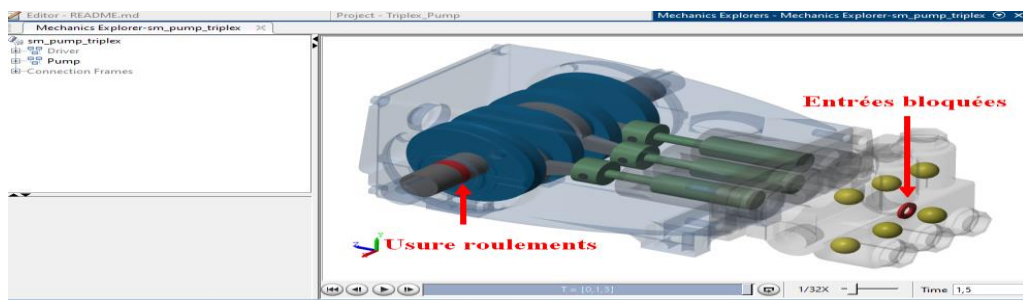


Figure IV:74: Animation 3D de la pompe avec usure roulements et entrée bloquée.

Le voyant LED s'allume, ce qui indique naturellement un roulement défectueux et entrer bloquée.

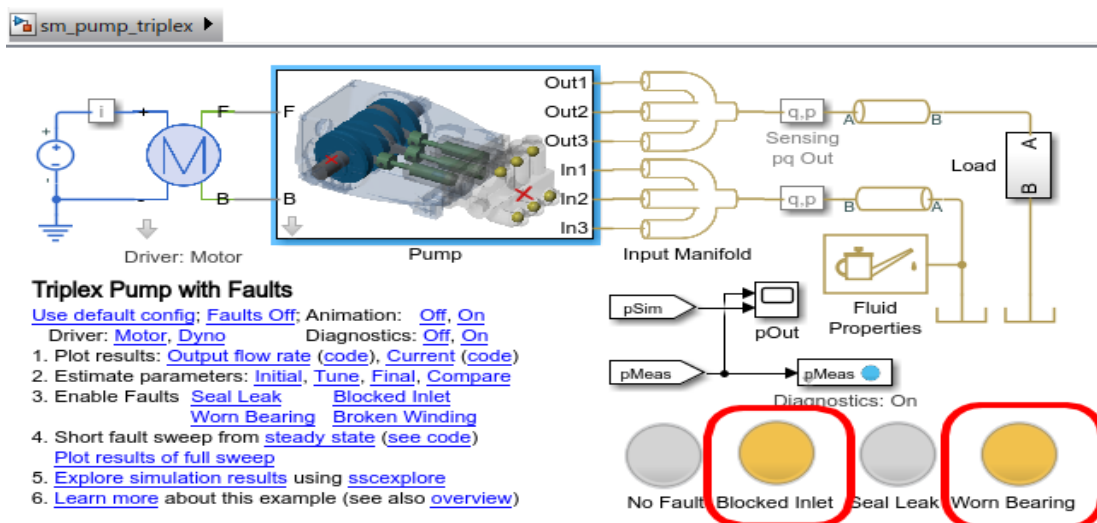


Figure IV:75: Résultat de simulation avec usure roulements et entrée bloquée.

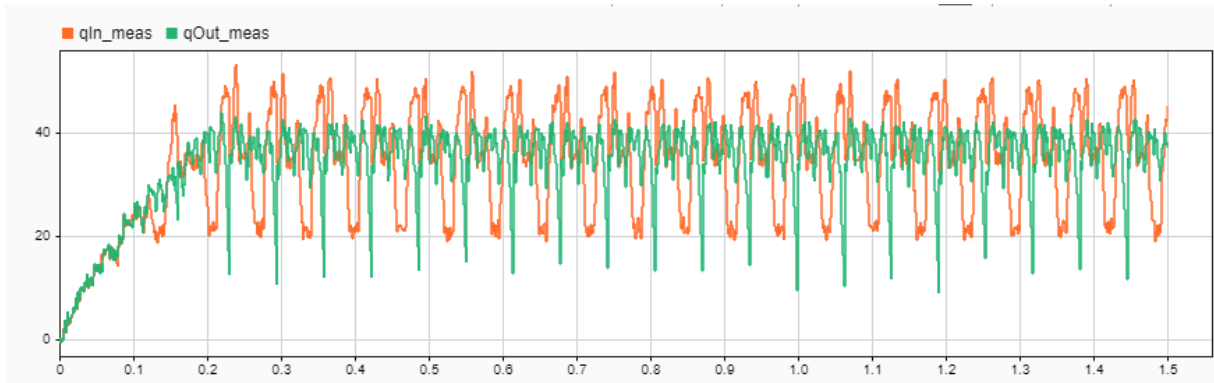


Figure IV:76: Résultat du débit avec usure roulements et entrées bloquées.

Après avoir mis les deux parcelles sur le tracé

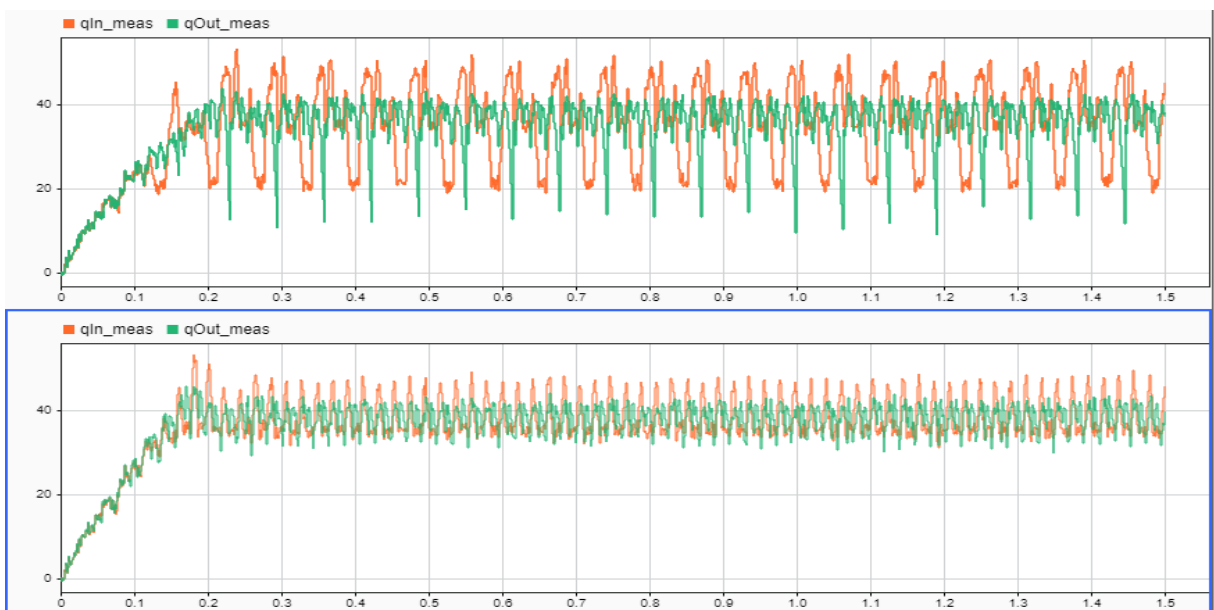


Figure IV:77: comparaison avec courbe du bon état.

Ici, le graph augmente considérablement en cas de survenue simultanée de deux types de défauts au même temps.

IV.4 Discussion et remarques des résultats :

L'analyse comparative des trois paramètres mesurés à savoir le débit, la pression et la vitesse de rotation met en évidence des différences significatives entre l'état de fonctionnement normal de la pompe triplex et son état dégradé. D'un point de vue hydrodynamique, le débit dans l'état sain présente une synchronisation claire entre le flux entrant (q_{In}) et le flux sortant (q_{Out}), avec des oscillations régulières correspondant au cycle des trois pistons. En revanche, dans l'état défaillant, un décalage persistant entre q_{In} et q_{Out}

est observé, accompagné de fluctuations irrégulières, ce qui suggère fortement une fuite interne ou une anomalie au niveau des soupapes.

Sur le plan de la pression, les courbes montrent qu'en fonctionnement nominal, la pression monte rapidement pour ensuite se stabiliser autour d'une valeur constante avec de légères ondulations périodiques, typiques du cycle de compression. À l'inverse, l'état dégradé est caractérisé par des fluctuations erratiques de la pression, indiquant un déséquilibre dans le système hydraulique, potentiellement causé par une défaillance mécanique dans les composants internes de la pompe (soupapes, clapets ou pistons).

Concernant la vitesse de rotation du moteur, les résultats confirment une stabilité remarquable dans le cas sain, avec une montée fluide suivie d'un régime constant. Cependant, en présence de défauts, de légères oscillations sont observées, pouvant résulter d'un déséquilibre mécanique ou d'un couple résistant variable induit par les irrégularités internes de la pompe.

Ces constats convergent vers une conclusion claire : la pompe en état dégradé présente une défaillance multiparamétrique détectable à travers une surveillance conjointe du débit, de la pression et de la vitesse. Cela souligne l'importance d'une stratégie de maintenance prédictive intégrée, basée sur des outils d'analyse de signaux sous MATLAB et l'utilisation d'indicateurs avancés (FFT, RMS, kurtosis, etc.). Une telle approche permet non-seulement d'anticiper les pannes critiques, mais aussi d'optimiser la durée de vie des composants et de réduire les coûts d'exploitation.

IV.5 Conclusion :

Les données simulées peuvent nous donner une longueur d'avance sur le développement d'un flux de travail de maintenance prédictive si nous ne disposons pas de suffisamment de données sur le terrain.

Dans notre étude nous avons soumis une pompe triplex à 3 defaults que nous avons simulé, après avoir lancé le programme de maintenance nous avons recueillis les résultats suivants en fonction des defaults soumis :

1. Fuite de joint : nous constatant une perturbation au niveau du débit volumique, un léger changement dans l'évolution de la pression et une conservation de la vitesse.
2. Entrées bloquées : nous constatant une légère perturbation au niveau du débit volumique, une pression fluctuante de manière importante et une conservation de la vitesse.
3. Roulement usé : nous constatent que le débit volumique est resté le même, une pression similaire à l'état initial et une vitesse sous forme de courbe.

Après que notre programme ait détecté ces défauts et traité leur origine il envoie un signal au tableau de contrôle où s'allume des jauges en fonction du problème détecté.

Conclusion générale

Conclusion Générale :

Il est indéniable que l'industrie des temps modernes puisse rencontrer des dommages du côté mécanique surtout dans le domaine du forage où les outils et machines sont soumis à rude épreuve de par la dureté de leur utilisation.

Maintenant le **machine learning** joue aujourd'hui un rôle stratégique dans la transformation numérique de l'industrie, en particulier dans le contexte de l'Industrie 4.0. Il permet d'améliorer l'efficacité, la qualité et la sécurité des processus industriels grâce à une exploitation intelligente des données.

L'une des principales applications est la **maintenance prédictive**, qui consiste à anticiper les défaillances des équipements avant qu'elles ne se produisent. En analysant en continu des données issues de capteurs (comme les vibrations ou la température), les modèles prédictifs peuvent estimer la durée de vie restante d'un composant et éviter les arrêts de production imprévus. Cette approche permet non seulement de réduire les coûts de maintenance, mais aussi d'augmenter la disponibilité des machines.

En résumé, le machine learning renforce l'intelligence des systèmes industriels en automatisant des tâches complexes, en anticipant les problèmes et en contribuant à une production plus efficace et plus sûre. Il s'impose ainsi comme un levier clé de l'industrie.

On envisage dans nos futurs travaux de faire une étude sur la maintenance prédictive d'une autre machine en service (exemple : compresseur) utilisant les données historiques de celle-ci puis de comparer les résultats avec la simulation.

Annexe



15 Frame Pompe à plongeur

Acier inoxydable 1051

Acier inoxydable - rinçage ext.

1051C

Acier inoxydable duplex

1051D

Bronze nickel aluminium

1057

Caractéristiques (*)

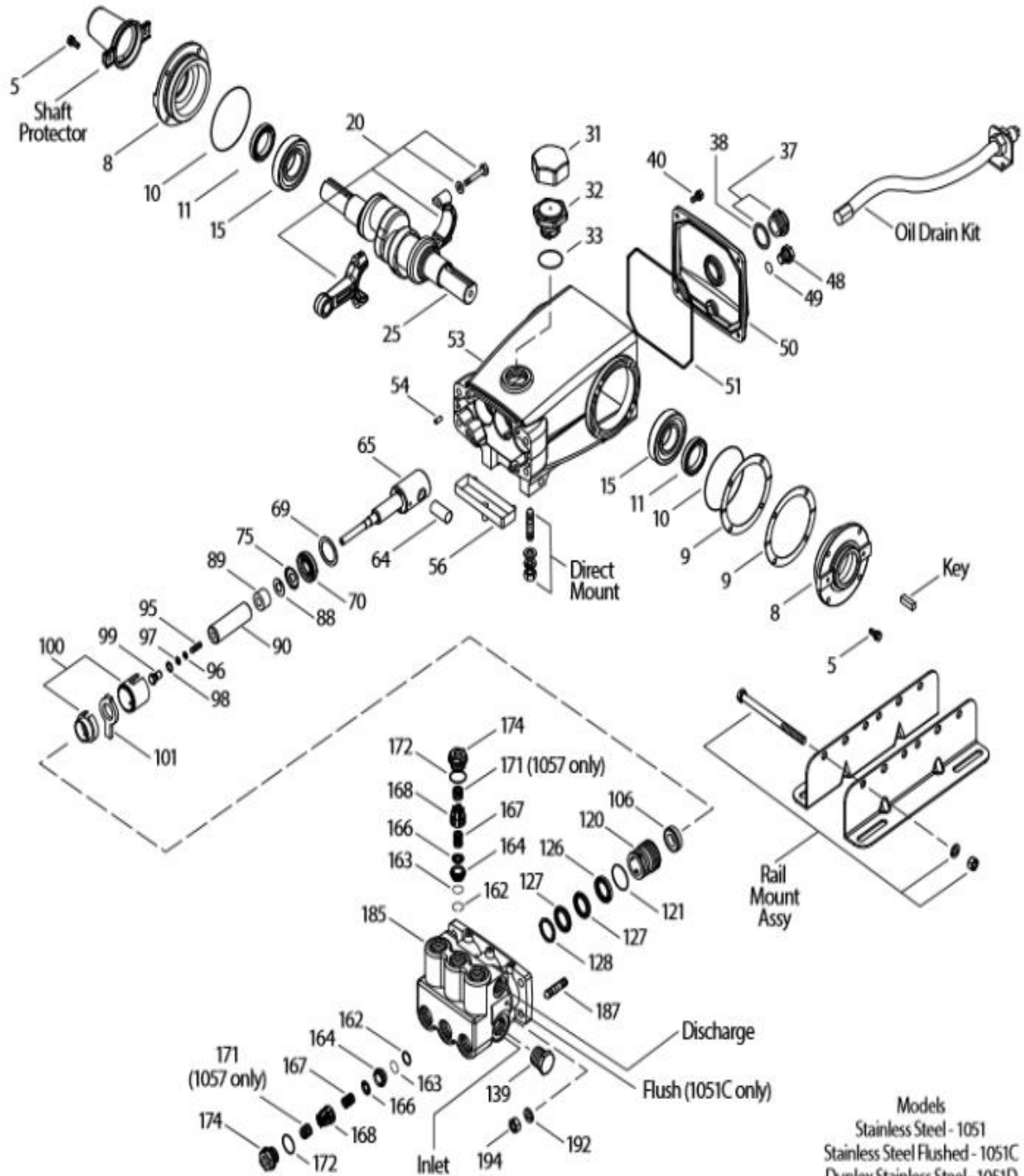
Modèle 1051-1051C-1051D-1057

Débit	39.5 L/min Plage de
Pression	7 \diamond 150 bar
Tours par minute	1000 TPM

Caractéristiques générales

Forage	24 mm
Coup	30 mm
Plage de pression d'entrée	-0,35 \diamond 4 bar
Capacité du carter	1,26 L
Température maximale du liquide	70° C
Connexions d'aspiration	(2) 3/4" NPTF
Connexions de rinçage	(2) 1/8" NPTF
Connexions de décharge	(2) 1/2" NPTF
Diamètre de l'arbre	30 mm
Poids	20 kg
Dimensions	414 x 330 x 164 mm

Vue éclatée



Models
 Stainless Steel - 1051
 Stainless Steel Flushed - 1051C
 Duplex Stainless Steel - 1051D
 Nickel Aluminum Bronze - 1057
 August 2018

Liste des pièces détachées

Pc	Num. 1051/C/D	Mat.	Num. 1057	Mat.	Description	Qt
5	92538	S	92538	S	Vis avec rondelles (M6x16)	8
8	43496	AL	43496	AL	Couvercle de roulement (voir TB 118)	2
9	815281	FBR	815281	FBR	Rondelle butée, couvercle de roulement, 2pcs	2/4
	814800	S	814800	S	Rondelle butée, couvercle de roulement, 2pcs	0/4
10	11340	NBR	11340	NBR	Joint torique, couvercle de roulement – 70D	2
11	43495	NBR	43495	NBR	Joint d'étanchéité, huile, vilebrequin – 70D	2
15	39060	STL	39060	STL	Roulement à rouleaux	2
20	48600	TNM	48600	TNM	Bielle complète {10/01}	3
25	43494	FCM	43494	FCM	Vilebrequin, deux sorties	1
31	828710	PE	828710	PE	Protecteur avec joints en mousse	1
32	43211	ABS	43211	ABS	Bouchon d'huile	1
33	14177	NBR	14177	NBR	Joint torique, bouchon d'huile – 70D	1
37	92241	-	92241	-	Jauge d'huile – 80D	1
38	44428	NBR	44428	NBR	Joint plat, jauge d'huile – 80D	1
40	92542	S	92542	S	Vis avec rondelles (M6x20)	4
48	25625	STCP	25625	STCP	Bouchon de vidange (1/4" x 19 BSP)	1
49	23170	NBR	23170	NBR	Joint torique, bouchon de vidange – 70D	1
50	43491	AL	43491	AL	Couvercle arrière (voir TB 118)	1
51	44834	NBR	44834	NBR	Joint torique, couvercle arrière – 70D	1
53	115471	AL	115471	AL	Carter avec axe de guidage (voir TB 118)	1
54	27488	S	27488	S	Axe de guidage	2
56	44664	POP	44664	POP	Récipient d'huile	1
64	43507	CM	43507	CM	Axe, croisillon	3
65	48892	SSHB	45258	SSZZ	Tige de plongeur	3
69	126592	STCP R	126592	STCP R	Rondelle	3
70	43500	NBR	43500	NBR	Joint d'étanchéité d'huile, carter – 80D	3
75	43506	S	43506	S	Déflexeur	3
88	45675	S	45675	S	Rondelle ouverte	3
89	45879	SS	45879	SS	Entretoise	3
90	43552	CC	43552	CC	Plongeur (M24x77)	3
95	89651	SS	89651	SS	Goujon, fixation de plongeur (M6x70)	3
96	43235	PTFE	43235	PTFE	Bague d'anti-extrusion, fixation de plongeur	3
97	17399	NBR	17399	NBR	Joint torique, fixation de plongeur – 80D	3
98	44041	SS	44041	SS	Rondelle, fixation de plongeur	3
99	44031	SS	44031	SS	Fixation de plongeur (M6)	3
100	855001	POP	855001	POP	Entretoise, 2 pcs {07/05} (voir TB 098)	3
101	43554	-	43554	-	Feutre, longue mèche	3
106	44035	NBR	44035	NBR	Joint basse pression avec ressort acier inox	3
120	49286	SSNP	49286	SSNP	Boîtier de joints {07/05}	3
121	14762	NBR	14762	NBR	Joint torique, boîtier de joint – 70D	3
126	48389	D	48389	D	Adapteur, femelle (voir TB 087)	3
	45073	SS	45073	SS	Adapteur, femelle	3
127	103692	STG	103692	STG	Garniture-V	6
128	45074	SS	45074	SS	Adapteur, mâle	3
139	44382	SS	44562	NAB	Bouchon, entrée (3/4" NPTF)	1
162	43248	PTFE	43248	PTFE	Bague anti-extrusion, siège de clapet	6
163	43249	NBR	43249	NBR	Joint torique, siège – 80D	6
164	44037	SS	44037	SS	Siège	6
166	48793	SS	48793	SS	Clapet	6
167	44039	SS	44039	SS	Ressort de clapet	6
168	44564	PVDF	44564	PVDF	Boîtier, ressort	6
171	-	-	44832	S	Ressort, bouchon de clapet	6
172	17617	NBR	17617	NBR	Joint torique, bouchon de clapet – 90D	6
174	49293	SS	44831	NAB	Bouchon de clapet	6
185	134823	SS	46706	NAB	Collecteur {08/18}	1
	49188	SS	-	-	Collecteur avec rinçage externe (1051C)	1
	134824	SSD	-	-	Collecteur (1051D) {08/18}	1
187	44005	S	44005	S	Boulon, collecteur (M10x45)	4
192	15847	S	15847	S	Rondelle (M10)	4
194	81258	S	81258	S	Ecrou (M10)	4

ANNEXE

Codes des matériaux:

ABS	Plastique ABS	HT	Haute Température	SSD	316 acier Inox duplex
AL	Aluminium	IPFE	I-Perfluoroelastomère	SSNP	316 acier inox
ALE	Aluminium Epoxy	NAB	Nickel aluminium bronze	SSHB	316 acier inox / haute resist. laiton
CC	Céramique	NBR	Caoutchouc nitrile acrylique	SSZZ	316 acier inox / zamac
CM	Chrome-molybdène	PE	Polyéthylène	STCP	Acier chromé
D	Acétalique	POP	Polypropylène	STG	Mélange spécial PTFE blanc
EPDM	Ethylène Propylène Diène Monomère	PTFE	Polytétrafluoréthylène pure	STHT	PTFE spécial haute température
FBR	Fibre	PVDF	Polyfluorure	STL	Acier
FCM	Chrome molybdène forgé	S	304 acier inoxydable	TNM	Haute résistance spéciale
FPM	Fluorocarbone	SS	316 acier inoxydable		

KIT DE JOINTS - 1 kit de joints requis par pompe

Modèle de pompe	NBR (standard)	FPM (0.0110)	EPDM (0.0220) #	IPFE (0.0770)	HTST (0.3400)		
1051/C/D/1057	33916	30986	33913	76913	76062		
Pièces incl.						Description	Qté
97	17399	14160	46204	701715	17399	Joint torique, support de plongeur	3
100	855001	855001	855001	855001	855001	Support de joint, 2 pcs	3
106	44035	44388	46208	703243	76035	Joint basse pression a/ressort inox	3
121	14762	11737	46205	701851	14762	Joint torique, boîtier de joints	3
127	103692	103692	103692	103692	103692	Garniture-V	6

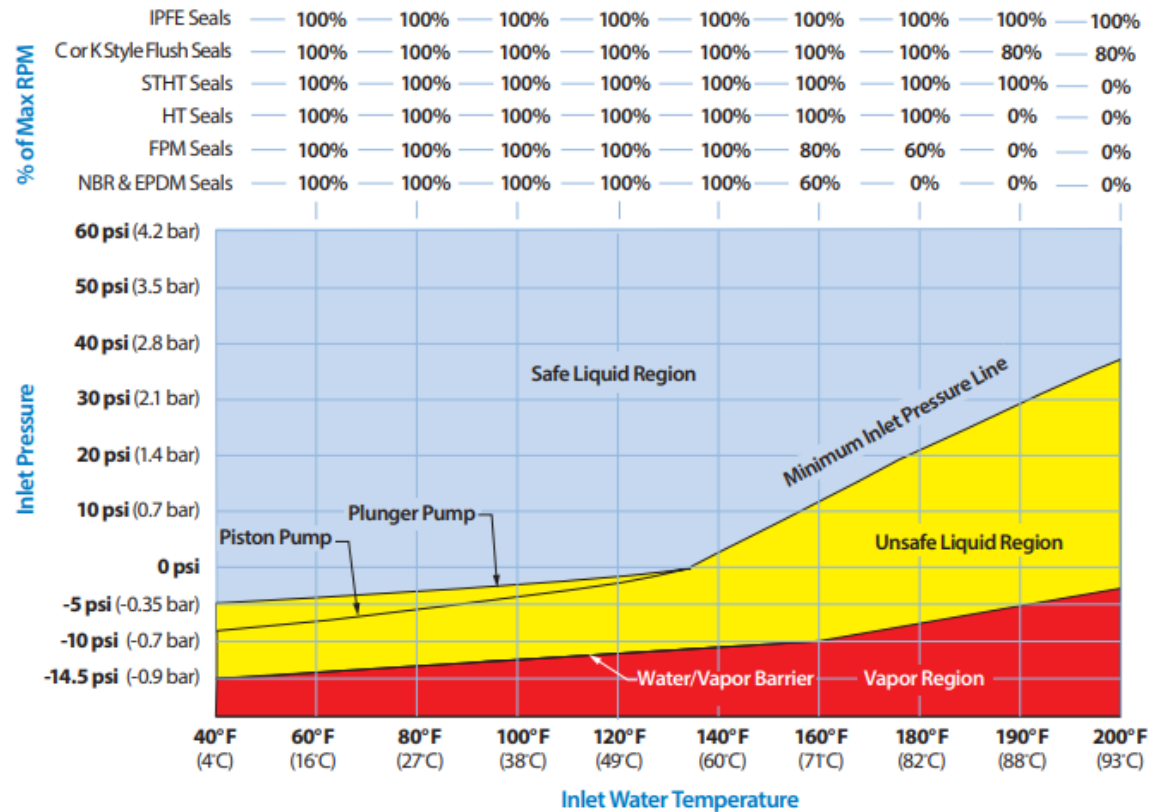
Huile silicone / graisse nécessaire

KIT DE CLAPETS - 2 kits de clapets requis par pompe

Modèle de pompe	NBR (standard)	FPM (0.0110)	EPDM (0.0220) #	IPFE (0.0770)	HTST (0.3400)		
1051/C/D/1057	34387	30987	31258	76385	34387		
Pièces incl.						Description	Qté
162	43248	43248	43248	43248	43248	Bague anti-extrusion, siege	3
163	43249	44383	46206	701852	43249	Joint torique, siege	3
164	44037	44037	44037	44037	44037	Siège	3
166	48793	48793	48793	48793	48793	Clapet	3
167	44039	44039	44039	44039	44039	Ressort	3
168	44564	44564	44564	44564	44564	Support de ressort	3
172	17617	11691	46207	701853	17617	Joint torique, bouchon de clapet	3

Huile silicone / graisse nécessaire

Maximum Pump Speed vs. Water Temperature



SPECIFICATIONS	U.S.	Metric
Flow	10 gpm	38 lpm
Pressure Range	100–2200 psi	6.9–152 bar
Pump RPM*	958 rpm	958 rpm
Inlet Pressure Range	-5–60 psi	-0.35–4.1 bar
Max. Liquid Temp. (NBR)	160° F	71° C

*Pump minimum is 100 RPM.

Alternative seals available for higher temperatures up to 200° F

COMMON SPECIFICATIONS	U.S.	Metric
Bore	0.945"	24 mm
Stroke	1.181"	30 mm
Crankcase Capacity	42 oz	1.26 l
Inlet Ports (2)	¾" NPT(F)	¾" NPT (F)
Flush Ports (2) (1051C)	⅛" NPT (F)	⅛" NPT (F)
Discharge Ports (2)	½" NPT (F)	½" NPT (F)
Pulley Mounting	Either Side	Either Side
Shaft Diameter	1.181"	30 mm
Weight	44 lbs	20 kg
Dimensions (1051,1051C,1051D)	16.30 x 12.99 x 6.45"	414 x 330 x 164 mm
Dimensions (1057)	16.25 x 12.99 x 6.45"	413 x 330 x 164 mm

Références

Bibliographiques

- [1] AFNOR (2001). *NF EN 13306 – Maintenance – Terminologie de la maintenance*. Association Française de Normalisation.
- [2] BAKHTIL, A., & BELGHANEM, B. (2022). *Analyse dysfonctionnelle d'une transmission par courroie pour une machine industrielle* (Doctoral dissertation, Université Ibn Khaldoun-Tiaret-).
- [3] AFNOR (2010). *Maintenance – Terminologie et principes généraux*. Norme NF EN 13306. Association Française de Normalisation.
- [4] Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de MASTER ; Thème : Etude et Maintenance des pompes centrifuges industrielles – Présenté par : MOUMENE SALAH EDDINE Université de BADJI MOKHTAR- ANNABA – Faculté de Sciences de L'Ingénierat Département : Électromécanique Spécialité : MAINTENANCE INDUSTRIELLE
- [5] YAGOUB, Ali, and Houari OTMANE. Surveillance et diagnostic d'un moteur électrique asynchrone triphasé dans le cadre d'une maintenance conditionnelle. Diss. Université Ibn Khaldoun-Tiaret-, 2021.
- [6] Achouch, Mounia, et al. "On predictive maintenance in industry 4.0: Overview, models, and challenges." *Applied Sciences* 12.16 (2022): 8081.
- [7] Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master en Hydraulique Thème : Etude de système de refoulement TAFNA-DZIOUA Présenté par : HAMMAD Mhammed Yehya - MADOUNI Choukri UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID Faculté de Technologie Département d'hydraulique Option : Eau Sol et Aménagement
- [8] Mobley, R. K. (2002). *An Introduction to Predictive Maintenance* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- [9] Delgado, A., Surveillance vibratoire des machines tournantes, Techniques de l'Ingénieur, Réf. BM5310, 2004.
- [10] Predictive maintenance with matlab ebook. "MATLAB® & Simulink® " R2021a, 1994-2025 The MathWorks, Inc. <https://www.mathworks.com>
- [11] Stepanoff, A. J. (1993). *Centrifugal and Axial Flow Pumps: Theory, Design, and Application*. Krieger.
- [12] Karassik, I. J., Messina, J. P., Cooper, P., & Heald, C. C. (2001). *Pump Handbook*, McGraw-Hill.
- [13] Karassik, I. J. et al. (2001). *Pump Handbook*, McGraw-Hill.