



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

Département de maintenance en instrumentation

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie industriel

Spécialité : Maintenance industrielle et instrumentation

Thème

**Optimisation de la planification de la maintenance
préventive à l'aide de la décision multicritère**

Présenté et soutenu publiquement par :

BENAHMED MARWA

BELGUENDOUZ YACINE

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
METAHRI Dhiyaeddine	MCA	Université d'Oran 2 MBA	Président
BOUCHAALA Mohammed Abdelghani	MCB	Université d'Oran 2 MBA	Encadreur
TITAH Mawloud	MCA	Université d'Oran 2 MBA	Examineur

Année 2025/2026

Optimisation de la planification de la maintenance préventive à l'aide de la décision multicritère

Résumé

La maintenance industrielle joue un rôle essentiel dans l'amélioration de la fiabilité, de la disponibilité et des performances des équipements de production. Ce mémoire porte sur l'optimisation de la périodicité de maintenance préventive à travers une approche combinant l'analyse de la fiabilité et les méthodes multicritères d'aide à la décision. La loi de Weibull est utilisée pour modéliser le comportement des équipements et évaluer, pour différentes périodicités de remplacement, les indicateurs de fiabilité, de disponibilité ainsi que les coûts de maintenance corrective et préventive. Les périodicités étudiées sont ensuite évaluées à l'aide d'une approche hybride associant l'AHP (Analytic Hierarchy Process) pour la pondération des critères et le TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) pour le classement des alternatives. Les résultats montrent que la démarche proposée permet d'identifier une périodicité optimale offrant un compromis équilibré entre coût, fiabilité et disponibilité. Ce résultat est validé par une comparaison avec une approche purement économique, contribuant ainsi à une gestion plus efficace de la maintenance industrielle.

Mots-clés : maintenance préventive, intervalle optimal, loi de Weibull, AHP, TOPSIS, décision multicritère

Optimizing Preventive Maintenance Scheduling Using Multi-Criteria Decision-Making

Abstract

Industrial maintenance plays a crucial role in improving the reliability, availability, and performance of production equipment. This thesis focuses on optimizing preventive maintenance intervals through an approach combining reliability analysis and multi-criteria decision-making methods. The Weibull distribution is used to model equipment behavior and to evaluate, for different replacement intervals, reliability and availability indicators as well as corrective and preventive maintenance costs. The studied intervals are then assessed using a hybrid approach combining AHP (Analytic Hierarchy Process) for criteria weighting and TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) for ranking the alternatives. The results show that the proposed approach identifies an optimal maintenance interval that provides a balanced trade-off between cost, reliability, and availability. This finding is validated through comparison with a purely economic approach, thereby contributing to more effective industrial maintenance management.

Keywords: preventive maintenance, optimal interval, Weibull distribution, AHP, TOPSIS, multi-criteria decision

تخطيط تحسين الصيانة الوقائية باستخدام المساعدة متعددة المعايير في اتخاذ القرار

الملخص

تلعب الصيانة الصناعية دوراً أساسياً في تحسين موثوقية وتوفر وأداء معدات الإنتاج. يركز هذا البحث على تحسين فترة الصيانة الوقائية من خلال مقارنة تجمع بين تحليل الموثوقية وطرق دعم اتخاذ القرار متعددة المعايير. يتم استخدام توزيع ويبل لنمذجة سلوك المعدات وتقييم مؤشرات الموثوقية والتوفر، بالإضافة إلى تكاليف الصيانة التصحيحية والوقائية، وذلك لمختلف فترات الاستبدال. يتم بعد ذلك تقييم الفترات المدروسة باستخدام مقارنة هجينة تجمع بين AHP (التحليل الهرمي للعملية) لتحديد أوزان المعايير و TOPSIS (تقنية الترتيب حسب القرب من الحل المثالي) لترتيب البدائل. تُظهر النتائج أن المنهجية المقترحة تسمح بتحديد فترة صيانة مثلى تحقق توازناً بين التكلفة والموثوقية والتوفر. وقد تم التحقق من هذه النتيجة من خلال مقارنتها مع مقارنة اقتصادية بحتة، مما يساهم في تحسين فعالية تسيير الصيانة الصناعية.

الكلمات المفتاحية: الصيانة الوقائية، الفترة المثلى، الموثوقية، التوفر، توزيع ويبل، التحليل الهرمي للعملية، تقنية TOPSIS، اتخاذ القرار متعدد المعايير.

Dédicace

Avant tout, je remercie Dieu le Tout-Puissant de m'avoir accordé la santé, la force, la patience et la volonté nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je dédie ce mémoire à ma très chère mère (CHAOUI Fatima), pour son amour infini, son soutien constant, ses sacrifices et ses encouragements qui m'ont accompagnée tout au long de mon parcours. Qu'elle trouve dans ce travail l'expression de ma profonde gratitude et de mon immense affection.

À mon cher père (BENAHMED Djamel), pour ses conseils, sa confiance et tous les efforts qu'il a fournis afin de me voir réussir. Que ce travail soit une source de fierté pour lui.

À mes amis, pour leur présence, leur soutien moral et tous les moments de motivation et d'entraide partagés durant cette période.

À toute l'équipe de stage, pour leur accueil, leur accompagnement, leurs conseils précieux et l'expérience enrichissante qu'ils m'ont permis d'acquérir.

Enfin, à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

BENAHMED MARWA

Je dédie ce modeste travail : Avant toute chose, je rends grâce à Dieu le Tout-Puissant qui m'a donné la force, la détermination et la patience nécessaires pour mener ce travail à son terme.

À mes très chers parents, pour leur amour, leur soutien indéfectible, leurs sacrifices et leurs encouragements tout au long de mon parcours. Qu'ils trouvent dans ce travail l'expression de ma profonde gratitude et de mon immense respect.

À mes frères et sœurs, pour leur présence, leur affection et leur soutien constant.

À toute ma famille, qui m'a toujours encouragé à persévérer et à donner le meilleur de moi-même.

À mes amis, pour leur amitié sincère, leur aide et les moments de partage qui ont rendu ce parcours plus agréable.

À toute l'équipe de stage, pour son accueil, son encadrement, ses précieux conseils et les connaissances qu'elle m'a permis d'acquérir durant cette expérience enrichissante.

Enfin, à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

BELGUENDOUZ YACINE.

Remerciements

« Le succès n'est pas final, l'échec n'est pas fatal : c'est le courage de continuer qui compte. »

Avant tout, nous remercions Allah le Tout-Puissant de nous avoir accordé la santé, la volonté et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadreur,
Monsieur BOUCHAALA Mohammed Abdelghani,
pour son accompagnement précieux, ses conseils avisés, sa disponibilité et son soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nous adressons également nos sincères remerciements à Monsieur KEMOUN Hamid chef du service maintenance durant notre stage à SONATRACH CP1/Z, et monsieur HATTAB Mohammed pour ses efforts à nous aider de comprendre la partie pratique ainsi qu'à toute l'équipe de travail, pour leur accueil chaleureux, leur aide et les connaissances professionnelles qu'ils nous ont transmises durant notre stage.

Nos remerciements les plus respectueux vont aussi à tous nos enseignants qui ont contribué à notre formation universitaire, pour leurs efforts, leur patience et leur dévouement durant toutes nos années d'études.

Nous remercions également les honorables membres du jury pour l'intérêt qu'ils portent à notre travail et pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à nos familles, pour leur soutien moral, leurs encouragements permanents et tous les sacrifices consentis afin de nous voir réussir.

Sommaire

Dédicace.....	i
Remerciements.....	ii
Sommaire.....	iii
Liste des figures	vi
Liste des tableaux.....	vii
Abréviations et notations.....	viii
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 : NOTIONS DE BASE DE LA MAINTENANCE INDUSTRIELLE.....	3
1.1 INTRODUCTION A LA MAINTENANCE INDUSTRIELLE.....	3
1.1.1 Définition normalisée de la maintenance industrielle (NF EN 13306).....	3
1.1.2 Objectifs et rôle de la maintenance dans la performance industrielle	4
1.1.3 Place de la maintenance dans le système de production.....	4
1.2 TYPES DE MAINTENANCE	5
1.2.1 Maintenance corrective.....	6
1.2.2 Objectif de la maintenance corrective	6
1.2.3 Maintenance préventive	7
1.2.3.1 Maintenance préventive systématique	7
1.2.3.2 Maintenance préventive conditionnelle	7
1.2.3.3 Maintenance prédictive.....	8
1.2.4 Niveaux de maintenance	8
1.2.5 Les activités connexes de la maintenance	9
1.3 CONCEPTS FMDS.....	10
1.3.1 Définition de la fiabilité.....	11
1.3.2 Définition de la maintenabilité	13
1.3.3 Définition de la disponibilité	14
1.3.4 Définition de la sécurité.....	16
1.4 ANALYSE DES DEFAILLANCES DES EQUIPEMENTS.....	17
1.5 CONCLUSION	22
CHAPITRE 2 : L'AIDE A LA DECISION MULTICRITERE APPLIQUEE A LA MAINTENANCE INDUSTRIELLE	23
2.1 PRISE DE DECISION EN MAINTENANCE INDUSTRIELLE	23
2.1.1 Définition et processus de décision	23
2.1.2 Spécificités de la décision en maintenance industrielle.....	24
2.1.3 Complexité et conflits entre critères décisionnels	24
2.2 PLANIFICATION ET OPTIMISATION DES INTERVENTIONS DE MAINTENANCE	24
2.2.1 Planification des interventions préventives	25
2.2.2 Ordonnancement des opérations de maintenance	25
2.3 FONDEMENTS DE L'AIDE MULTICRITERE A LA DECISION	26
2.3.1 Concepts et principes de l'analyse multicritère	26
2.3.1.1 Décision	26
2.3.1.2 Décision dans la fonction maintenance	27

2.3.1.3 Aide à la décision.....	28
2.3.1.4 Aide à la décision multicritère	29
2.3.1.5 Système d'aide à la décision.....	30
2.3.2 Problématiques de l'aide à la décision.....	31
2.3.4 La pondération des critères	34
2.4 APERÇU DE QUELQUES METHODES MULTICRITERES	35
2.4.1 Méthodes d'agrégation totale.....	36
2.4.1.1 Méthode AHP	36
2.4.1.2 méthode TOPSIS	39
2.4.2 Méthodes d'agrégation partielle :	42
2.4.2.1 Méthode ELECTRE :	42
2.4.2.2 Méthode PROMETHEE	43
2.4.3 Méthodes d'agrégation locale	43
2.4.3.1 Méthode MILP.....	43
2.4.3.2 Méthode GP	44
2.4.3.3 Méthode CP	45
2.5 APPLICATIONS INDUSTRIELLES DES METHODES MULTICRITERES EN MAINTENANCE.....	46
2.5.1 Sélection des politiques de maintenance.....	46
2.5.2 Évaluation de la criticité des équipements.....	46
2.5.3 Priorisation des interventions de maintenance.....	46
2.5.4 Optimisation des intervalles de maintenance préventive.....	46
2.6 SYNTHÈSE DES APPROCHES ÉTUDIÉES.....	47
2.7 CONCLUSION DU CHAPITRE	48
CHAPITRE 3 : OPTIMISATION DE LA PLANIFICATION PREVENTIVE A L'AIDE DU PARADIGME MULTICRITERE.....	49
3.1 INTRODUCTION.....	49
3.1.1 Présentation Du Travail Cible.....	49
3.1.2 Contexte	50
3.1.3 Motivations	50
3.1.4 Objectifs.....	51
3.1.5 Défis.....	52
3.2 PRESENTATION DU SUPPORT D'ÉTUDE	53
3.2.1 Identification du scénario d'étude : Site et unité	53
3.2.2 Description de l'équipement.....	54
3.2.3 Composant faisant l'objet du remplacement périodique	54
3.3 METHODOLOGIE PROPOSÉE	55
3.3.1 Données et paramètres requis	56
3.3.2 Modélisation de la fiabilité	57
3.3.2.1 Modèle de Weibull à deux paramètres	57
3.3.2.2 Validation du modèle.....	57
3.3.3 Évaluation des performances pour différentes périodicités	58
3.3.4 Détermination de l'optimum économique	58
3.3.5 Détermination de l'optimum multicritère.....	59
3.3.5.1 Définition du domaine admissible	59
3.3.5.2 Pondération des critères par la méthode AHP	59
3.3.5.3 Classement des solutions par TOPSIS.....	59
3.3.6 Analyse des résultats et aide à la décision	60
3.3.7 Validation de la décision par comparaison	60

3.4 IMPÉMENTATION ET RÉSULTATS	61
3.4.1 Collecte et structuration des données.....	61
3.4.2 Estimation des paramètres Weibull par MLE.....	61
3.4.3 Construction de la grille d'évaluation	63
3.4.4 Optimisation économique	63
3.4.5 Pondération des critères par la méthode AHP	64
3.4.6 Optimisation multicritère par la méthode TOPSIS.....	65
3.4.7 Recommandations finales et plan de maintenance	66
3.5 CONCLUSION	67
CONCLUSION GÉNÉRALE	69
PERSPECTIVES.....	70
BIBLIOGRAPHIE	71

Liste des figures

Figure 1.1 : Place de la maintenance dans le secteur industriel	5
Figure 1.2 : Les types de maintenance industrielle (Razafindrazato, 2010)	5
Figure 1.3 : Les activités de maintenance industrielle et des exemples (Faigner, 2022)	10
Figure 1.4 : Les Concepts FMDS.....	11
Figure 1.5 : Les causes de défaillance (Auberville, 2004).....	18
Figure 1.6 : Courbe en baignoire (Benard et al., 2002)	19
Figure 1.7 : Papier de Weibull	21
Figure 2.1 : Architecture d'un SAD (Bendib, s.d).....	31
Figure 2.2 : Représentation du processus de décision (Lamouri & Abdelkani, 2020).....	33
Figure 2.3 : Les méthodes multicritères (Roy, 1996 ; Vincke, 1992 ; Saaty, 1980)	36
Figure 2.4 : Modèle hiérarchique AHP (Bouchaala, 2021)	37
Figure 2.5 : Principe de la méthode TOPSIS (Bouchaala, 2021)	40
Figure 3.1 : Méthodologie d'optimisation multicritère de la périodicité de maintenance préventive	56
Figure 3.2 : Validation Weibull : ECDF empirique vs modèle MLE et densité $f(t)$	62
Figure 3.3 : Score TOPSIS en fonction de θ — maximum à $\theta = 5\,670$ h.....	65
Figure 3.4 : Histogramme des écarts TOPSIS/Éco — critères favorables et défavorables	65
Figure 3.5 : Espace des critères C2/C1 vs $R(\theta)$ — nuage de score TOPSIS avec $\theta_{\text{éco}}$ et θ_{TOPSIS}	67

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Les niveaux de la maintenance selon NF X 60-010 (AFNOR, 1994)	8
Tableau 1.2 : Différents types de disponibilité (Bellaouar, 2013)	15
Tableau 2.1 : Les différentes problématiques de décision (Belaribi, 2021)).....	32
Tableau 2.2 : Echelle d'évaluation de la méthode AHP — échelle de Saaty (Bouchaala, 2021).....	38
Tableau 2.3 : Comparaison entre les différentes applications industrielles	47
Tableau 2.4 : Récapitulatif des méthodes étudiées	47
Tableau 3.1 : Les caractéristiques de la pompe P-101.....	54
Tableau 3.2 : La décomposition du TTR.....	55
Tableau 3.3 : Données TBF et TTR collectées (22 observations).....	61
Tableau 3.4 : Paramètres Weibull estimés par MLE	62
Tableau 3.5 : Évaluation des critères sur la grille θ (extrait)	63
Tableau 3.6 : Résultats de l'optimum économique.....	63
Tableau 3.7 : Matrice de comparaison AHP — Critères [C2, R, D].....	64
Tableau 3.8 : Résultats AHP — Poids et vérification de cohérence	64
Tableau 3.9 : Comparaison des deux optimums : économique vs multicritère TOPSIS	66

Abréviations et notations

Abréviations

ABC	Analyse de classification de Pareto
AFNOR	Association Française de Normalisation
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
AMDEC	Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité
CBM	<i>Condition Based Maintenance</i>
CDU	<i>Crude Distillation Unit</i> (Unité de distillation atmosphérique)
CMU	Coût moyen unitaire
CP	<i>Constraint Programming</i>
CP1/Z	Complexe de Compression 1/Z
CPM	<i>Critical Path Method</i>
CR	<i>Consistency Ratio</i> (Ratio de cohérence)
DSS	<i>Decision Support System</i>
ECDF	<i>Empirical Cumulative Distribution Function</i> (Fonction de répartition empirique)
ELECTRE	<i>ELimination Et Choix Traduisant la REalité</i>
FMDS	Fiabilité – Maintenabilité – Disponibilité – Sécurité
GMAO	Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur
HSE	<i>Health, Safety and Environment</i> (Hygiène, Sécurité et Environnement)
LCC	<i>Life Cycle Cost</i>
MCDA	<i>Multi-Criteria Decision Analysis</i>
MDT	<i>Mean Down Time</i>
MLE	<i>Maximum Likelihood Estimation</i> (Estimation par maximum de vraisemblance)
MILP	<i>Mixed Integer Linear Programming</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i> (Temps moyen entre défaillances)
MTTF	<i>Mean Time To Failure</i> (Temps moyen avant défaillance)
MTTR	<i>Mean Time To Repair</i> (Temps moyen de réparation)
MTTRp	<i>Mean Time To Preventive Repair</i> (Temps moyen de réparation préventive)
NCM	Nombre annuel d'interventions correctives
NF	Norme Française
NPM	Nombre annuel de remplacements préventifs
PERT	<i>Program Evaluation and Review Technique</i>
PROMETHEE	<i>Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation</i>
RCM	<i>Reliability Centered Maintenance</i>
RMD	Fiabilité – Maintenabilité – Disponibilité
ROI	<i>Return On Investment</i>
SAD	Système d'aide à la décision
TBF	<i>Time Between Failures</i> (Temps entre deux défaillances)

Abréviations

TCBF	Temps cumulé de bon fonctionnement
TCI	Temps cumulé d'indisponibilité
TOPSIS	<i>Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution</i>
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i>
TTR	<i>Time To Repair</i>

Notations

A	Ensemble des alternatives (MCDA) ; matrice de comparaison par paires (AHP)
A⁺	Solution idéale positive (TOPSIS)
A⁻	Solution idéale négative (TOPSIS)
α	Facteur de contrainte économique
β	Paramètre de forme de la loi de Weibull
C	Criticité ou ensemble des critères (selon le contexte)
C₁	Coût moyen de la politique corrective
C₂(θ)	Coût moyen de la politique de remplacement préventif
C_c	Coût des consommables
C_d	Coût de défaillance
C_f	Frais généraux
CI	Indice de cohérence
C_i	Coût d'indisponibilité
C_{ma}	Coût moyen annuel
C_{mc}	Coût de maintenance corrective
C_{mf}	Coût moyen de fonctionnement
C_{mp}	Coût de maintenance préventive
C_{mps}	Coût de maintenance préventive systématique
C_{mo}	Coût de main-d'œuvre
C_p	Coût de perte de production
CTR	Coût total de remise en état
CTS	Coût total de surveillance
D	Disponibilité
D(θ)	Disponibilité moyenne
D_i	Disponibilité intrinsèque
D_o	Disponibilité moyenne (ou opérationnelle)
D_{min}	Disponibilité minimale exigée
d⁺(θ)	Distance à la solution idéale positive
d⁻(θ)	Distance à la solution idéale négative
η	Paramètre d'échelle de la loi de Weibull
f(t)	Fonction de densité de probabilité
F	Fréquence

Notations

F(t)	Fonction de répartition
G	Gravité
$\Gamma(.)$	Fonction Gamma
γ	Paramètre de position
H	Horizon annuel de fonctionnement
L(β, η)	Fonction de vraisemblance
λ	Taux de défaillance
$\lambda_{\max}$	Valeur propre maximale de la matrice AHP
M	Matrice de décision
M(t)	Fonction de maintenabilité
m(θ)	Durée moyenne de fonctionnement entre deux remplacements préventifs
N	Nombre d'observations, de critères ou de périodicités évaluées (selon le contexte)
P	Probabilité ou coût d'une défaillance non planifiée (selon le contexte)
Pα	Problématique de choix
Pβ	Problématique de tri
Pγ	Problématique de rangement
Pλ	Problématique de description
π	Coût d'indisponibilité lié au remplacement préventif
R(t)	Fonction de fiabilité
RV	Valeur de revente
ΣCD	Somme des coûts de défaillance
t	Temps de fonctionnement
T	Variable aléatoire représentant le temps jusqu'à la défaillance
θ	Périodicité de maintenance préventive
$\theta_{\text{éco}}$	Périodicité optimale économique
θ_{TOPSIS}	Périodicité optimale obtenue par TOPSIS
VA	Valeur d'acquisition
A	Ensemble des alternatives (MCDA) ; matrice de comparaison par paires (AHP)
A⁺	Solution idéale positive (TOPSIS)
A⁻	Solution idéale négative (TOPSIS)

INTRODUCTION GENERALE

Dans un contexte industriel marqué par une concurrence croissante, une automatisation avancée et des exigences élevées en matière de performance, la maintenance industrielle est devenue un levier stratégique pour assurer la continuité de production, la fiabilité des équipements et la maîtrise des coûts d'exploitation. Les entreprises industrielles cherchent aujourd'hui à améliorer la disponibilité de leurs installations tout en réduisant les dépenses liées aux défaillances et aux arrêts non planifiés.

Parmi les différentes politiques de maintenance, la maintenance préventive occupe une place importante puisqu'elle permet d'anticiper les pannes et de limiter leurs conséquences sur le processus de production. Toutefois, la détermination des intervalles optimaux de maintenance préventive demeure une problématique complexe. Une fréquence d'intervention trop élevée engendre des coûts de maintenance importants, tandis qu'une fréquence insuffisante augmente le risque de défaillance et les pertes associées.

Face à cette problématique, les méthodes traditionnelles basées sur un seul critère montrent certaines limites, car les décisions de maintenance doivent prendre en considération plusieurs facteurs simultanément, notamment la fiabilité, la disponibilité, la sécurité, la criticité des équipements et les coûts. L'aide multicritère à la décision apparaît alors comme une approche pertinente permettant d'intégrer ces différents critères afin de proposer des solutions plus adaptées aux besoins industriels. L'objectif principal de ce mémoire est de développer une méthodologie d'optimisation des intervalles de maintenance préventive en combinant les approches de fiabilité avec les méthodes multicritères d'aide à la décision. Cette démarche vise à identifier la périodicité de maintenance offrant le meilleur compromis entre les exigences techniques et économiques.

Pour atteindre cet objectif, ce travail est structuré en trois chapitres. Le premier chapitre présente les notions fondamentales de la maintenance industrielle, les concepts de fiabilité, maintenabilité, disponibilité et sécurité ainsi que l'aspect « économique. Le deuxième chapitre est consacré à la présentation et l'étude des méthodes d'aide multicritère à la décision, notamment celles largement utilisées dans le domaine de la maintenance industrielle, comme étant l'outil pilote de notre étude. Enfin, le troisième chapitre présente la méthodologie

proposée et sa mise en œuvre en s'articulant sur un cas d'étude industriel, depuis la modélisation de la fiabilité jusqu'à la détermination de l'intervalle optimal de maintenance préventive.

Les résultats obtenus permettront de démontrer l'intérêt de l'approche multicritère dans l'amélioration de la prise de décision en maintenance et dans l'optimisation de la performance globale des systèmes industriels

CHAPITRE 1 : NOTIONS DE BASE DE LA MAINTENANCE INDUSTRIELLE

1.1 INTRODUCTION A LA MAINTENANCE INDUSTRIELLE

La maintenance industrielle constitue un levier fondamental pour assurer la continuité et la performance des systèmes de production modernes. Elle englobe l'ensemble des actions techniques, organisationnelles et de gestion visant à maintenir ou à rétablir les équipements dans un état leur permettant d'assurer les fonctions requises. Dans un contexte industriel caractérisé par une automatisation croissante, des technologies de plus en plus complexes et des exigences élevées en matière de qualité et de disponibilité, la maintenance s'impose comme une fonction stratégique. Elle permet de prévenir les défaillances, de limiter les arrêts de production, d'améliorer la fiabilité des installations et d'optimiser l'utilisation des ressources.

Une gestion efficace de la maintenance contribue également à la réduction des coûts d'exploitation, à l'augmentation de la productivité, à la maîtrise des risques liés aux pannes et au maintien d'un niveau élevé de qualité des produits. De ce fait, la maintenance industrielle ne se limite plus à une simple activité de réparation, mais constitue un véritable facteur de compétitivité, participant directement à la performance globale, à la rentabilité et à la pérennité des entreprises.

1.1.1 Définition normalisée de la maintenance industrielle (NF EN 13306)

La notion de maintenance est définie de manière officielle par la norme européenne **NF EN 13306**, qui constitue une référence internationale en matière de terminologie de la maintenance.

Selon cette norme :

« La maintenance est 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. » (*Renault, 2004*).

Cette définition souligne que la maintenance englobe plusieurs types d'activités, notamment les interventions techniques sur les équipements, les activités de planification et de

gestion, ainsi que les actions de management permettant d'organiser et d'optimiser les opérations de la maintenance. Elle met également en évidence que la maintenance intervient tout au long du cycle de vie d'un équipement, depuis sa mise en service jusqu'à son remplacement.

Ainsi, la maintenance industrielle vise non seulement à corriger les défaillances des équipements, mais également à prévenir les pannes et à garantir le bon fonctionnement des systèmes de production.

1.1.2 Objectifs et rôle de la maintenance dans la performance industrielle

L'objectif principal de la maintenance est d'assurer le fonctionnement des équipements avec un minimum, voire une absence de pannes.

Ses objectifs portent sur la définition d'une politique adaptée et la prolongation de la durée de vie des équipements, tout en garantissant la sécurité des personnes et des biens. Elle vise également à assurer la qualité des produits, à protéger l'environnement et à optimiser les coûts de maintenance. (*Smith et al, 2003*).

1.1.3 Place de la maintenance dans le système de production

Dans une entreprise industrielle, la maintenance est une fonction stratégique qui contribue directement à la performance du système de production. Elle travaille en lien avec plusieurs services comme la production, la qualité, la sécurité et la logistique.

Le service maintenance assure la disponibilité et la fiabilité des équipements, participe à l'installation de nouveaux matériels et à la gestion des pièces de rechange. Il permet ainsi de réduire les défaillances, d'éviter les arrêts de production et de limiter les pertes économiques.

La maintenance doit donc être intégrée à la stratégie globale de l'entreprise pour garantir un fonctionnement optimal et améliorer la performance industrielle. (*Tafraoui, 2023*).

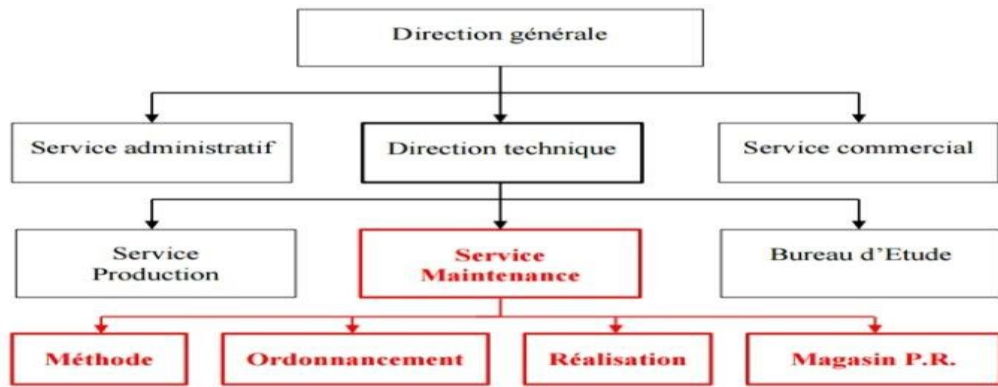


Figure 1.1 Place de la maintenance dans le secteur industriel

1.2 TYPES DE MAINTENANCE

Les stratégies de maintenance industrielle peuvent être classées selon le moment où l'intervention est réalisée par rapport à l'apparition d'une panne et la manière dont elle est planifiée. Les principales catégories sont :

1. **Maintenance corrective** : interventions réalisées après la survenue d'une panne.
2. **Maintenance préventive** : interventions planifiées pour éviter les pannes (Wanmali et al., 2021)

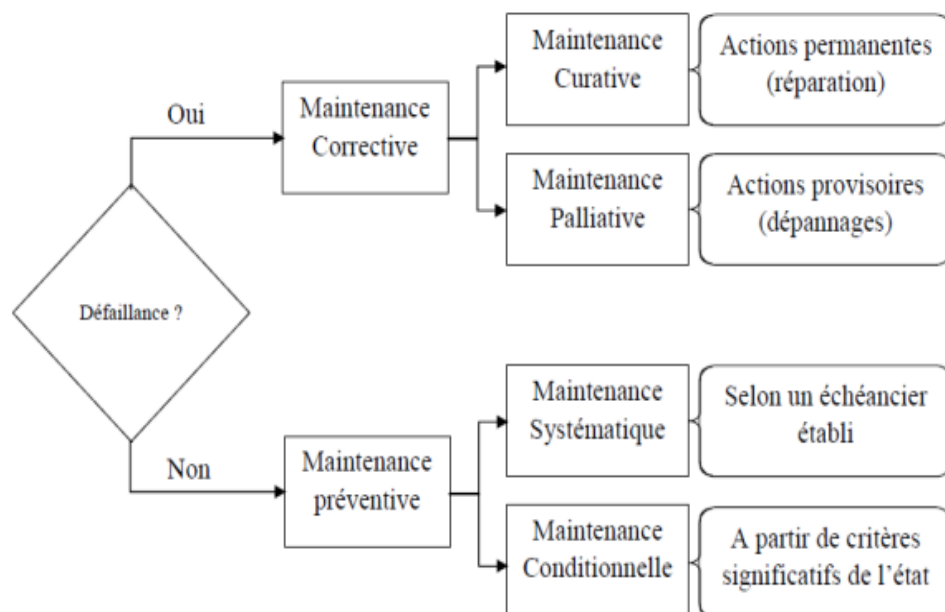


Figure 1.2 les types de maintenance industrielle (razafindrazato,2010).

1.2.1 Maintenance corrective

Selon la norme NF EN 13306, La maintenance corrective intervient après l'apparition d'une défaillance. Elle a pour objectif de réparer l'équipement concerné afin de le remettre en état de fonctionnement et de lui permettre d'assurer de nouveau la fonction pour laquelle il a été conçu. (AFNOR, 2001).

La norme distingue deux formes de maintenance corrective :

- La maintenance corrective palliative, qui consiste en des actions provisoires destinées à maintenir temporairement le fonctionnement du bien sans éliminer la cause de la défaillance ;
- La maintenance corrective curative, qui vise à supprimer durablement la défaillance par une réparation ou un remplacement approprié, permettant un retour au fonctionnement normal.

Cependant, la norme NF EN 13306 met en évidence plusieurs limites de la maintenance corrective.

Elle entraîne généralement des arrêts non planifiés, une diminution de la disponibilité des équipements et une augmentation des coûts d'exploitation, notamment en raison du caractère urgent des interventions. De plus, cette approche peut engendrer des risques accrus pour la sécurité des personnes et des biens, ainsi qu'une dégradation prématurée des installations.

Ainsi, bien que la maintenance corrective soit une composante indispensable de toute politique de maintenance, la norme souligne la nécessité de la compléter par des actions de maintenance préventive, afin d'améliorer la fiabilité, la disponibilité et la pérennité des systèmes de production.

1.2.2 Objectif de la maintenance corrective

La maintenance corrective a pour objectif essentiel de rétablir le fonctionnement normal d'un système dans les meilleurs délais, afin de limiter la durée d'indisponibilité après une défaillance. Cette intervention doit toutefois être réalisée dans le strict respect des règles de sécurité. Ce type de maintenance est généralement appliqué aux équipements de faible valeur ou de faible criticité, qui ne jouent pas un rôle déterminant dans le processus de production et dont une panne n'entraîne pas de conséquences majeures sur la sécurité ou la continuité des activités. (Laurens ,2014).

1.2.3 Maintenance préventive

La maintenance préventive regroupe toutes les actions réalisées avant l'apparition d'une panne, comme les contrôles, les visites et les interventions planifiées. Contrairement à la maintenance corrective, elle n'est pas déclenchée par une défaillance, mais organisée à l'avance pour éviter les perturbations.

Elle comprend notamment les contrôles réguliers, les inspections, les remplacements prévus, ainsi que les interventions décidées après vérification de l'état des équipements, y compris la maintenance conditionnelle et les contrôles non destructifs. (*Heng, 2002*).

1.2.3.1 Maintenance préventive systématique

La maintenance préventive systématique consiste à réaliser des interventions de maintenance selon un planning prédéfini, basé sur le temps ou sur un nombre déterminé d'heures de fonctionnement, de cycles ou d'unités produites, sans tenir compte de l'état réel de l'équipement au moment de l'intervention. Cette approche permet de prévenir les pannes en intervenant de manière régulière, même en l'absence de signes visibles de dégradation, et contribue ainsi à maintenir un niveau de fiabilité acceptable des installations et à assurer la continuité de la production (*BABANA OULD MOHAMED, 2009*).

1.2.3.2 Maintenance préventive conditionnelle

La maintenance préventive conditionnelle repose sur la surveillance continue ou périodique de l'état des équipements. Les interventions sont déclenchées lorsqu'un événement précis est détecté, comme un signal d'autodiagnostic, une information transmise par un capteur ou l'analyse de mesures traduisant une dégradation progressive des performances. Cette méthode permet de suivre l'évolution des paramètres critiques et de définir un seuil d'alerte avant que l'équipement n'atteigne une limite inacceptable de fonctionnement. L'intérêt principal de cette approche est d'exploiter les équipements au maximum de leurs capacités tout en réduisant le recours aux interventions de maintenance corrective et les arrêts imprévus (*BABANA OULD MOHAMED, 2009*).

1.2.3.3 Maintenance prédictive

La maintenance prédictive est une forme de maintenance conditionnelle qui s'appuie sur l'analyse et l'interprétation des paramètres représentatifs de l'état de dégradation des équipements. À partir de ces données, des prévisions sont établies afin d'anticiper l'apparition des défaillances et de programmer les interventions au moment le plus approprié. Cette approche permet d'intervenir avant la panne tout en évitant des opérations inutiles, contribuant ainsi à une meilleure fiabilité des installations, à la réduction des arrêts imprévus et à l'optimisation des coûts de maintenance. (AFNOR, 2001).

1.2.4 Niveaux de maintenance

La maintenance se caractérise par une grande diversité des tâches, quelque soient leur nature ou leur durée. Pour mieux l'organiser, elle est traditionnellement structurée en cinq niveaux selon la norme AFNOR X 60-000. Cependant, la tendance actuelle, notamment dans une logique de TPM, consiste à simplifier cette organisation en trois niveaux (AFNOR, 2010).

Ainsi, les niveaux 1 et 2 sont regroupés et correspondent à une maintenance de première ligne, généralement assurée par les opérateurs de production avec l'appui des techniciens si nécessaire. Les niveaux 3 et 4 concernent les interventions techniques plus avancées réalisées par des équipes de maintenance qualifiées. Enfin, le niveau 5 regroupe les opérations lourdes ou complexes, souvent confiées à des prestataires externes, afin de permettre aux équipes internes de se concentrer sur leurs compétences principales (Monchy, 2010).

Tableau 1.1 les niveaux de la maintenance selon NF X 60-010. (AFNOR, 1994)

Niveau	Description résumée
1er niveau : Maintenance de base	Interventions simples réalisées par l'utilisateur, comme les réglages de base ou le remplacement de consommables accessibles, sans outillage complexe.
2ème niveau : Maintenance légère	Dépannages simples et petites actions préventives comme le graissage ou le remplacement standard de pièces, réalisés par un technicien qualifié.

Niveau	Description résumée
3ème niveau : Maintenance spécialisée	Interventions nécessitant un diagnostic plus poussé et des réparations légères, effectuées par des techniciens spécialisés avec des outils de mesure adaptés.
4ème niveau : Maintenance lourde	Opérations complexes de maintenance corrective et préventive réalisées par une équipe qualifiée dans un atelier bien équipé.
5ème niveau : Maintenance de reconstruction	Travaux majeurs de rénovation ou de reconstruction complète, généralement confiés à un atelier spécialisé ou au constructeur.

1.2.5 Les activités connexes de la maintenance

Outre les opérations classiques de maintenance, plusieurs activités complémentaires contribuent à améliorer la performance et la fiabilité des systèmes industriels. Ces activités, appelées activités connexes de la maintenance, regroupent l'ensemble des actions qui accompagnent ou soutiennent les opérations de maintenance proprement dites.

Parmi ces activités, on peut citer notamment la rénovation, la modernisation, la reconstruction et l'amélioration des équipements.

Ces interventions visent à prolonger la durée de vie des installations industrielles, à améliorer leur performance technique ou à adapter les équipements aux nouvelles exigences de production.

Les activités connexes incluent également la planification des interventions, la gestion des pièces de rechange, la gestion documentaire, ainsi que l'analyse des défaillances et des performances des équipements. Ces actions permettent d'optimiser l'organisation de la maintenance et d'améliorer la disponibilité des installations.

En outre, les activités connexes jouent un rôle important dans la mise en place d'une stratégie de maintenance efficace, car elles facilitent la prise de décision et contribuent à l'amélioration continue des processus industriels (*AFNOR, 2007*)

ACTIVITES DE MAINTENANCE	
NATURE DE L'ACTIVITE	EXEMPLE D'ACTIVITE
■ INSPECTION Contrôle de conformité réalisé en mesurant, observant, testant ou calibrant les caractéristiques significatives d'un bien.	Vérifier à l'aide d'un wattmètre que la puissance du moteur de broche des tours à commande numérique est comprise entre 15 et 16 kW.
■ SURVEILLANCE DE FONCTIONNEMENT Activité exécutée manuellement ou automatiquement ayant pour objet d' observer l'état réel d'un bien.	Mesure du niveau de vibrations broche : ■ vitesse (10-1000 Hz) ■ accélération (2-20 kHz)
■ ESSAI DE CONFORMITE Essai destiné à montrer si une caractéristique ou une propriété d'un bien est, ou non, conforme aux spécificités nominales.	Contrôler les arrêts d'urgence et les capots de sécurité.
■ ESSAI DE FONCTIONNEMENT Actions menées après une action de maintenance pour vérifier que le bien est capable d'accomplir la fonction requise.	Contrôler l'effort de serrage du moule suite au changement du vérin hydraulique.
■ MAINTENANCE DE ROUTINE Activités élémentaires de maintenance régulières ou répétitives qui ne requièrent généralement pas de qualifications, autorisation(s) ou d'outils spéciaux.	● Surveiller fuite d'huile et fuite air comprimé par l'opérateur à la fin de chaque journée ● Surveiller l'état mécanique des pinces de robots par le technicien de maintenance 1 fois /semaine ● Contrôler les fixations des carters
■ REVISION Ensemble complet d' examens et d'actions réalisés afin de maintenir le niveau requis de disponibilité et de sécurité.	Révision annuelle des tours CN : ■ vérification du jeu des vis à billes ■ vérification du jeu des glissières ■ nettoyage et graissage des pignons et des crémaillères ■ contrôle des sécurités
■ RECONSTRUCTION Action suivant le démontage d'un bien et la réparation ou le remplacement des composants qui approchent de la fin de leur durée de vie utile et/ou devraient être systématiquement remplacés.	● Remplacement des colonnes de guidage et des paliers lisses d'une presse ● rectification d'un banc de tour ● Soudage de renforts sur le bâti ● Usinage des portées du plateau tournant ● Contrôle de la géométrie
■ AMELIORATION Ensemble des mesures techniques, administratives et de gestion, destinées à améliorer la sûreté de fonctionnement d'un bien sans changer sa fonction requise.	● Changement de la technologie hydraulique tout ou rien par de l'hydraulique proportionnelle ● Remplacement d'une commande numérique par un plus récente
■ MODIFICATION Ensemble des mesures techniques, administratives et de gestion, destinées à changer la fonction d'un bien .	Changer le vérin pneumatique par un vérin hydraulique de plus grande course et permettant d'obtenir un effort de compression plus grand.

Figure 1.3 Les activité de maintenance industrielle et des exemples (FAIGNER, 2022).

1.3 CONCEPTS FMDS

Le concept FMDS (Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité et Sécurité) est largement utilisé dans l'ingénierie de maintenance pour analyser la performance et la sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Ces quatre indicateurs permettent d'évaluer la capacité d'un équipement à fonctionner correctement, à être réparé rapidement et à garantir la sécurité des utilisateurs.

Ces notions sont fondamentales dans les secteurs industriels car elles permettent d'optimiser les stratégies de maintenance, de réduire les coûts de défaillance et d'améliorer la continuité de production.

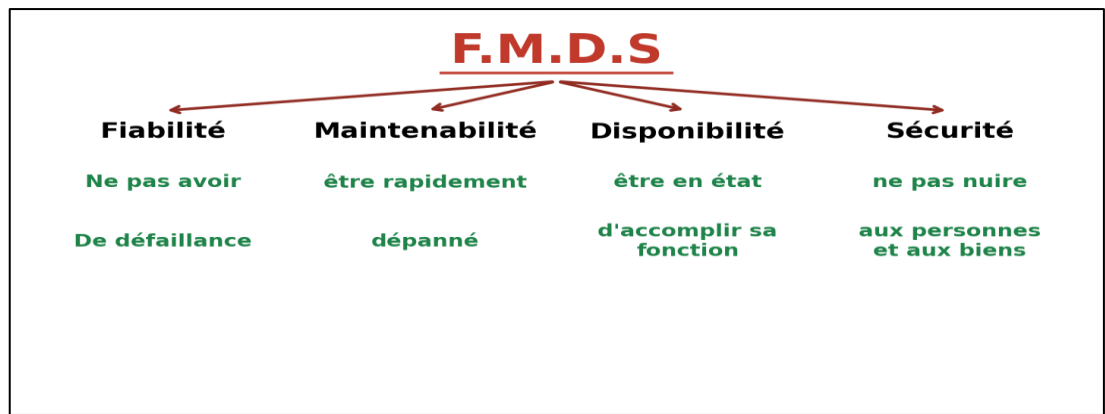


Figure 1.4 : Les Concepts FMDS

1.3.1 Définition de la fiabilité

La fiabilité est l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions et pour une durée donnée. Cette définition peut être formulée différemment : la fiabilité d'une entité est la probabilité moyenne de non-défaillance de cette entité sur un intervalle de temps donné. Les paramètres importants de la fiabilité sont donc les conditions d'utilisation du système, le temps ou le nombre de cycles. La fiabilité d'un dispositif dépend aussi de la fonction remplie par ce dispositif. (Benkhelifa A, 2011).

Loi de la fiabilité :

$$R(t) = P(T > t) \quad (1.1)$$

Où :

R(t) : fiabilité à l'instant

T : variable aléatoire représentant le temps jusqu'à la défaillance

t : durée de fonctionnement

Dans le cas d'un taux de défaillance constant, la fiabilité suit une loi exponentielle :

Où :

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1.2)$$

λ : taux de défaillance

t : temps de fonctionnement

Cette formule permet d'estimer la probabilité qu'un système fonctionne sans panne pendant une durée donnée.

1.3.1.1 Les Objectifs de la fiabilité

Les principaux objectifs de la fiabilité sont :

- Réduire la fréquence des pannes des équipements
- Améliorer les performances et la productivité des systèmes industriels
- Diminuer les coûts liés aux arrêts de production et aux réparations
- Assurer la continuité et la qualité du service

Dans les systèmes industriels modernes, l'étude de la fiabilité permet également d'anticiper les défaillances et d'optimiser les stratégies de maintenance (*Cocoza, 1997*).

1.3.1.2 Les différents types de fiabilité

- **Fiabilité intrinsèque** : elle dépend uniquement des caractéristiques propres de l'équipement et de son environnement, sans influence extérieure.
- **Fiabilité extrinsèque** : elle est liée aux conditions d'utilisation, à la qualité de la maintenance et aux interventions humaines.
- **Fiabilité implicite** : elle repose sur l'expérience acquise afin de diminuer la fréquence et la durée des arrêts.
- **Fiabilité explicite** : elle est basée sur des modèles mathématiques permettant d'évaluer précisément le niveau de confiance dans l'équipement (*Ouarab & Dadi, 2016*).

1.3.1.3 Relation entre la fiabilité et la maintenance

La fiabilité et la maintenance sont deux concepts complémentaires dans la gestion des équipements industriels. En effet, un système fiable nécessite une stratégie de maintenance appropriée afin de préserver ses performances dans le temps.

La maintenance contribue à maintenir ou à rétablir un équipement dans un état lui permettant d'assurer la fonction requise. Ainsi, plus la maintenance est efficace, plus elle contribue à améliorer la fiabilité du système.

De plus, les données issues de la maintenance (historique des pannes, interventions, temps de réparation) permettent d'analyser le comportement des équipements et d'améliorer leur conception ou leur exploitation.

Loi associée : MTBF

$$MTBF = \frac{\text{Temps Total de fonctionnement}}{\text{Nombre de pannes sur une période donnée}} \quad (1.3)$$

$$\text{Si } \lambda \text{ est constant } \Rightarrow MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (1.4)$$

La fiabilité des systèmes réparables est souvent mesurée par le temps moyen entre deux défaillances.

1.3.2 Définition de la maintenabilité

Dans des conditions données, la maintenabilité est l'aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état où il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits. Maintenabilité = être rapidement dépanné C'est aussi la probabilité de rétablir un système dans des conditions de fonctionnement spécifiées, en des limites de temps désirées, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits (*Laggoune, 2019*).

$M(t)$: La maintenabilité caractérise la facilité de remettre ou de maintenir un bien en bon état de fonctionnement.

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (1.5)$$

Objectifs de la maintenabilité

Les objectifs principaux de la maintenabilité sont :

- Réduire le temps nécessaire pour réparer les équipements
- Faciliter les interventions de maintenance
- Minimiser les coûts de maintenance
- Améliorer la disponibilité des systèmes industriels

- **Maintenabilité et maintenance**

La maintenabilité et la maintenance sont deux notions étroitement liées mais différentes.

La maintenance représente l'ensemble des actions techniques et administratives réalisées pour maintenir ou rétablir un équipement dans un état de fonctionnement acceptable.

La maintenabilité, quant à elle, caractérise la facilité et la rapidité avec lesquelles ces actions de maintenance peuvent être réalisées.

Ainsi, une bonne conception des équipements améliore leur maintenabilité, ce qui permet de réduire les temps d'arrêt et d'optimiser la gestion des interventions de maintenance (*Bellaouar, 2013*).

1.3.3 Définition de la disponibilité

La disponibilité représente la capacité d'un équipement à assurer la fonction demandée, dans des conditions données, à un moment précis ou pendant une période déterminée, lorsque les moyens extérieurs nécessaires sont disponibles. Elle dépend de l'état de fonctionnement du bien et n'est pas influencée par les moyens autres que la logistique de maintenance, comme le personnel, la documentation ou les pièces de rechange (*Mebarkia, 2013*).

Elle dépend principalement de deux facteurs :

- La fiabilité (fréquence des pannes).

- La maintenabilité (rapidité de réparation).

La disponibilité peut être exprimée par la relation suivante :

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (1.6)$$

Avec :

D : disponibilité

MTBF : temps moyen entre deux défaillances

MTTR : temps moyen de réparation

Une disponibilité élevée signifie que l'équipement est rarement en panne et qu'il peut être réparé rapidement.

1.3.3.1 Les types de disponibilité

On distingue généralement trois types de disponibilité dans l'analyse des systèmes industriels : sur un intervalle de temps donné (disponibilité moyenne), à un instant donné (disponibilité instantanée), à la limite, si elle existe, de la disponibilité instantanée lorsque $t \rightarrow \infty$ (disponibilité asymptotique).

Tableau 1.2 Différents types de disponibilité (Bellaouar, 2013).

Type de disponibilité	Définition	Formule
Disponibilité moyenne	Mesure la disponibilité sur un intervalle de temps donné en comparant le temps de bon fonctionnement au temps total (fonctionnement + indisponibilité).	$D_0 = \text{Temps de disponibilité} / (\text{Temps de disponibilité} + \text{Temps d'indisponibilité})$ ou $D_0 = TCBF / (TCBF + TCI)$
Disponibilité intrinsèque	Prend en compte uniquement les défaillances et les réparations, sans considérer les délais logistiques.	$D_i = MTBF / (MTBF + MTTR)$
Disponibilité opérationnelle	Tient compte des défaillances, réparations ainsi que des délais logistiques et organisationnels.	$D_0 = MTBF / (MTBF + MDT)$

1.3.4 Définition de la sécurité

La sécurité représente la capacité d'un système à fonctionner sans provoquer de danger pour les personnes, les équipements ou l'environnement.

Elle vise à prévenir les accidents en identifiant les risques potentiels et en mettant en place des mesures de protection adaptées. Elle est liée à la fiabilité, car une défaillance peut entraîner des situations dangereuses.

Les analyses de sécurité comprennent généralement :

- L'analyse des risques ;
- L'identification des défaillances critiques ;
- La mise en place de dispositifs de protection.

1.3.4.1 LE ROLE ET L'IMPORTANCE DE LA MAINTENANCE DANS LA SECURITE INDUSTRIELLE

- La maintenance industrielle joue un rôle essentiel dans la sécurité des installations en garantissant le bon fonctionnement des équipements et en réduisant les risques d'accidents pour les travailleurs et l'environnement (*Houcine, 2023*).
- Elle contribue également à renforcer la fiabilité des machines et à assurer la continuité des activités. Grâce aux interventions régulières, les défauts et anomalies peuvent être détectés tôt, avant qu'ils ne deviennent critiques (*Kamel, 2020*).

Enfin, une maintenance efficace permet de réduire les pannes imprévues, de prolonger la durée de vie des équipements et de diminuer les coûts liés aux réparations urgentes et aux arrêts de production.

1.3.4.2 Relation entre fiabilité, maintenabilité et disponibilité

Les trois indicateurs fiabilité, maintenabilité et disponibilité sont étroitement liés.

- Une bonne fiabilité réduit le nombre de pannes
- Une bonne maintenabilité diminue le temps de réparation
- Ces deux facteurs améliorent directement la disponibilité

Cette relation peut être exprimée par l'équation :

$$\text{Où : } D = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} \quad (1.7)$$

MTBF: Mean Time To Failure

MTTR: Mean Time To Repair

Cette relation permet d'évaluer la performance globale d'un système industriel.

1.4 ANALYSE DES DEFAILLANCES DES EQUIPEMENTS

L'analyse des défaillances constitue une étape essentielle dans l'ingénierie de la maintenance et de la fiabilité. Elle permet d'identifier les causes des pannes, d'évaluer leurs conséquences sur le fonctionnement des systèmes et de mettre en place des stratégies de maintenance appropriées afin d'améliorer la performance et la durée de vie des équipements industriels.

L'étude des défaillances s'appuie généralement sur des modèles statistiques et probabilistes qui permettent de prévoir le comportement des équipements et d'optimiser les décisions de maintenance.

1.4.1 Notion de défaillance et modes de défaillance

1.4.1.1 Définition d'une défaillance

Altération ou cessation d'un bien à accomplir une fonction requise. Après défaillance d'une entité, celle-ci est en état de panne (*AFNOR, 1994*).

1.4.1.2 Causes et modes de défaillance

Les causes de défaillance regroupent l'ensemble des facteurs pouvant empêcher un système ou un composant d'assurer correctement sa fonction. Elles résultent généralement de la combinaison de plusieurs éléments techniques, humains, organisationnels et environnementaux.

On distingue principalement (*AFNOR, 2018*) :

- **Causes techniques** : défauts de conception, usure, corrosion, vieillissement ou pannes électroniques.
- **Erreurs humaines** : mauvaise manipulation, manque de formation ou non-respect des consignes.
- **Facteurs organisationnels** : planification insuffisante ou maintenance inadaptée.
- **Facteurs environnementaux** : conditions climatiques, vibrations ou agents agressifs.
- **Interaction homme-système** : interfaces mal conçues ou complexité du système.

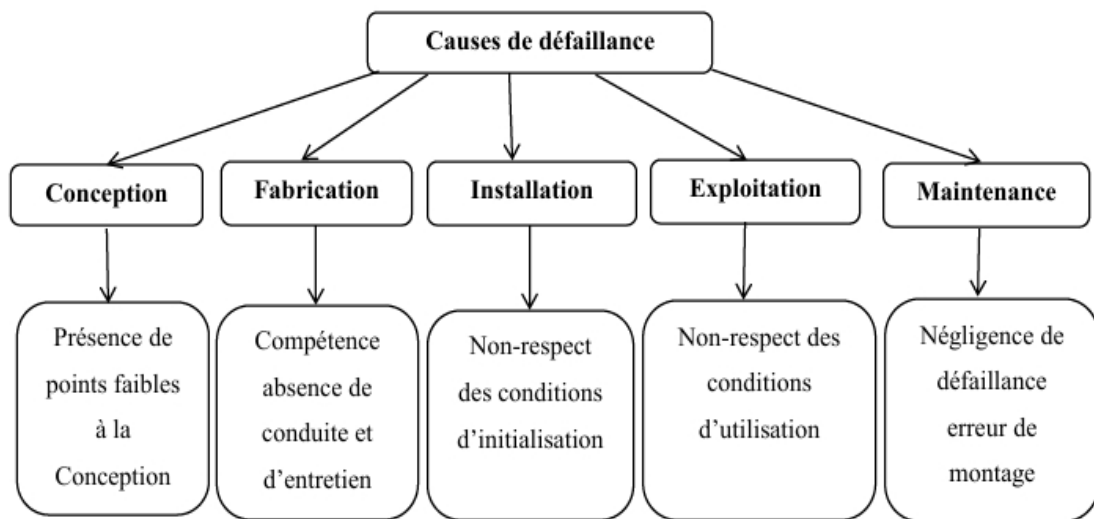


Figure 1.5 Les causes de défaillance (AUBERVILLE, 2004)

Après l'identification des composants, l'analyse des modes de défaillance se base sur la fonction de chaque élément afin d'anticiper les pannes possibles.

Les principaux modes de défaillance sont (AFNOR, 1994) :

- **Absence totale de fonction** : arrêt complet du composant.
- **Fonction dégradée** : performance insuffisante ou excessive.
- **Fonctionnement intermittent** : fonctionnement irrégulier.
- **Fonction non prévue** : comportement anormal perturbant le système.

1.4.2 Cycle de vie des équipements

Le cycle de vie d'un équipement représente toutes les étapes qu'il traverse depuis sa conception jusqu'à sa mise hors service. Son analyse permet de mieux comprendre l'évolution de

ses performances, d'anticiper les défaillances et d'optimiser les stratégies de maintenance afin d'améliorer la fiabilité, la disponibilité et de réduire les coûts d'exploitation.

Les principales phases sont : la conception, la fabrication, l'installation et la mise en service, l'exploitation, le vieillissement ou la dégradation, puis enfin le remplacement ou le retrait de l'équipement (Florent, 2025).

1.4.3 La courbe en baignoire

La courbe de la baignoire représente la probabilité qu'un certain actif tombe en panne au fil du temps. Cela nous permet de cartographier clairement trois phases distinctes du cycle de vie de l'actif, comme vous pouvez le voir ci-dessous :

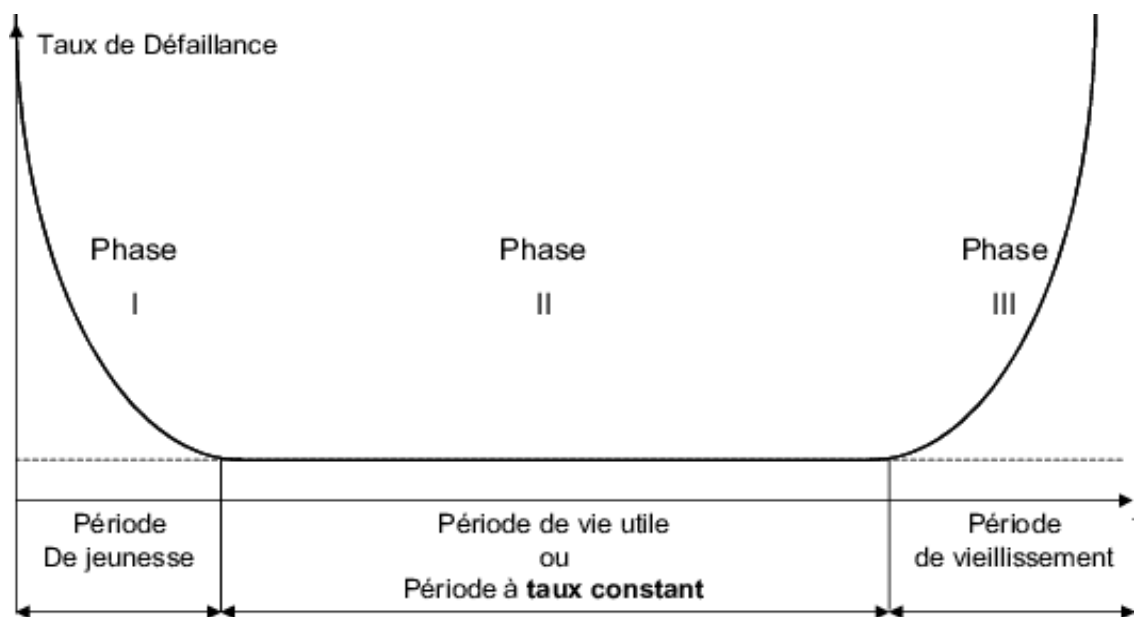


Figure 1.6 Courbe en baignoire (Benard et al., 2002)

La compréhension de ces trois étapes vous permet d'adapter votre plan de maintenance tout au long du cycle de vie.

1. Phase de jeunesse (mortalité infantile) :

Dans cette phase initiale, le taux de défaillance est relativement élevé. Les pannes sont souvent dues à des défauts de fabrication, des erreurs de conception ou des problèmes liés à l'installation de l'équipement.

2. Phase de vie utile :

Pendant cette phase, le taux de défaillance devient relativement faible et constant. Les défaillances apparaissent de manière aléatoire et ne sont pas liées au vieillissement des composants.

3. Phase d'usure :

Dans cette dernière phase, le taux de défaillance augmente progressivement en raison du vieillissement des composants, de l'usure des matériaux et de la fatigue des équipements.

- Modélisation mathématique :

Durant la phase de vie utile, le taux de défaillance est souvent considéré comme constant. Dans ce cas, la fonction de fiabilité peut être exprimée par la relation suivante :

Où :

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1.8)$$

$R(t)$: fonction de fiabilité

λ : taux de défaillance

t : temps de fonctionnement

1.4.4 Loi de Weibull et modélisation du comportement des défaillances

La loi de Weibull peut être utilisée quelle que soit la valeur du taux de défaillance. Grâce à sa grande flexibilité, elle s'adapte aux différentes évolutions de $\lambda(t)$ et permet également d'identifier la phase de vie du système étudié : jeunesse, maturité ou vieillissement. (Nakajima, 1989).

Les trois paramètres de la loi de Weibull (β , η et γ) permettent d'obtenir une analyse plus précise de l'état du système. Parmi eux, le paramètre β est le plus important car il décrit l'évolution du taux de défaillance.

- Si $\beta < 1$, le taux de défaillance diminue avec le temps, ce qui correspond à la phase de jeunesse du système.

- Si $\beta \approx 1$, le taux de défaillance reste presque constant, indiquant la phase de maturité et un fonctionnement stable.
- Si $\beta > 1$, le taux de défaillance augmente, ce qui traduit une phase de vieillissement ou d'obsolescence du matériel.

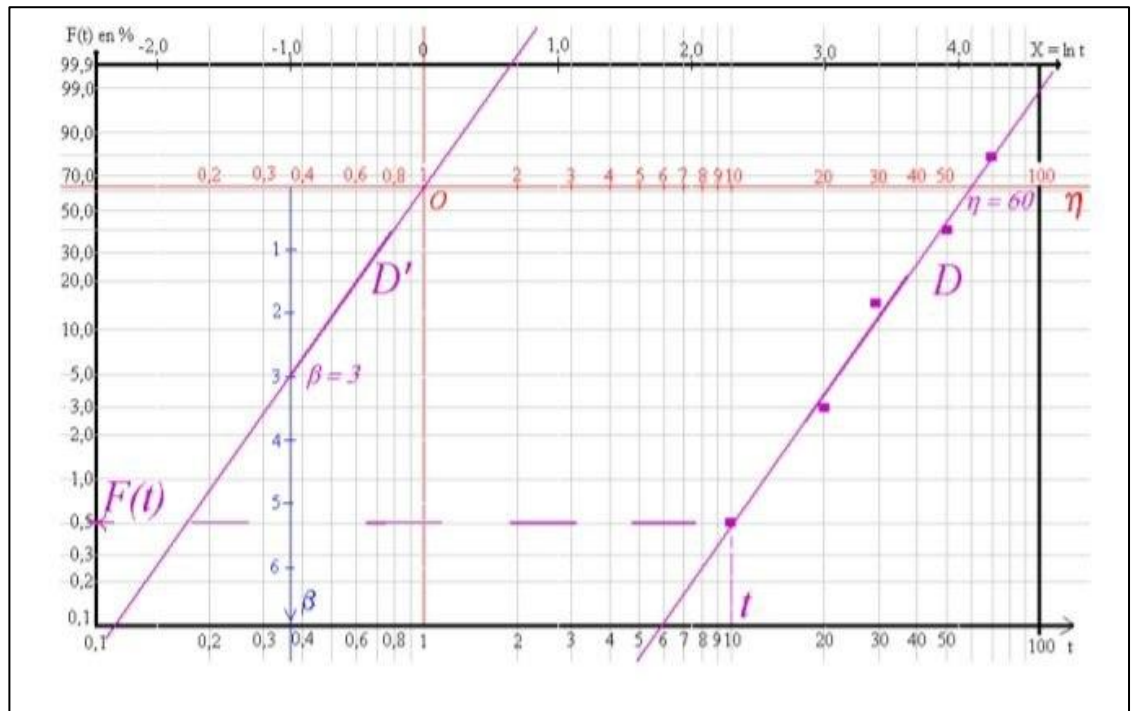


Figure 1.7 Papier de Weibull

Fonction de fiabilité de Weibull :

Où :

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (1.9)$$

$R(t)$: fonction de fiabilité

t : temps de fonctionnement

η (éta) : paramètre d'échelle représentant la durée de vie caractéristique

β (bêta) : paramètre de forme décrivant le type de défaillance

1.5 CONCLUSION

Ce premier chapitre a permis de poser les bases de la maintenance industrielle en mettant en évidence son rôle essentiel dans la performance des systèmes de production. Nous avons présenté les notions fondamentales telles que la fiabilité, la disponibilité et la maintenabilité, ainsi que les différents types de maintenance, notamment la maintenance corrective et préventive.

L'évolution des politiques de maintenance a également été abordée, montrant le passage d'une approche réactive vers des stratégies plus anticipatives comme la maintenance conditionnelle et prédictive. Cette évolution met en évidence l'importance d'une planification efficace afin de réduire les pannes et d'optimiser les coûts.

Ainsi, la diversité des stratégies de maintenance et la multiplicité des critères à prendre en compte rendent la prise de décision plus complexe. Il devient donc nécessaire de recourir à des méthodes adaptées permettant de choisir la meilleure stratégie. Dans ce contexte, le chapitre suivant sera consacré à l'étude des méthodes d'aide à la décision multicritère.

CHAPITRE 2 : L'AIDE A LA DECISION

MULTICRITERE APPLIQUEE A LA

MAINTENANCE INDUSTRIELLE

2.1 PRISE DE DECISION EN MAINTENANCE INDUSTRIELLE

La prise de décision constitue un processus central dans la gestion des systèmes industriels, particulièrement en maintenance où les choix influencent directement la fiabilité, la disponibilité des équipements et les coûts d'exploitation. Décider consiste à sélectionner, parmi plusieurs alternatives possibles, celle qui répond le mieux à un ensemble d'objectifs souvent contradictoires, tels que minimiser les coûts, réduire les défaillances et améliorer la performance globale du système (Roy, 1996 ; de Almeida et al., 2015).

Dans le contexte industriel, la décision en maintenance se distingue par la complexité des systèmes étudiés, l'incertitude liée aux défaillances, ainsi que la multiplicité des critères à considérer. Contrairement aux décisions fondées sur un seul critère, les problèmes de maintenance impliquent généralement des compromis entre critères techniques, économiques et organisationnels (Dhillon, 2002).

2.1.1 Définition et processus de décision

La décision peut être définie comme un processus de choix rationnel entre plusieurs alternatives sur la base d'informations disponibles, d'objectifs visés et de préférences du décideur (Roy, 1996). Ce processus comprend généralement plusieurs étapes :

- Identification du problème décisionnel
- Définition des objectifs
- Identification des alternatives possibles
- Évaluation des alternatives selon des critères définis
- Sélection de la meilleure solution
- Mise en œuvre et suivi de la décision.

Dans les problématiques de maintenance, ce processus peut concerner, par exemple, le choix d'une politique de maintenance ou la détermination d'un intervalle optimal d'intervention préventive.

2.1.2 Spécificités de la décision en maintenance industrielle

La décision en maintenance présente plusieurs spécificités :

- Présence d'incertitudes sur les défaillances futures.
- Coexistence de critères conflictuels.
- Impact direct des décisions sur la sûreté de fonctionnement.
- Nécessité d'intégrer contraintes techniques, économiques et opérationnelles.

Une décision de maintenance ne peut donc pas être réduite à une simple optimisation mathématique, mais s'inscrit dans un cadre d'aide à la décision plus global (*de Almeida et al., 2015*).

2.1.3 Complexité et conflits entre critères décisionnels

Dans la plupart des cas, les critères décisionnels sont conflictuels. Par exemple, réduire l'intervalle entre deux maintenances peut améliorer la fiabilité mais augmenter les coûts d'intervention. À l'inverse, espacer les interventions diminue les coûts directs tout en augmentant le risque de défaillance.

Cette nature conflictuelle des critères constitue le fondement des approches d'aide multicritère à la décision, qui visent à rechercher un compromis optimal plutôt qu'une solution optimale selon un critère unique (*Saaty, 1980 ; Hwang & Yoon, 1981*).

2.2 PLANIFICATION ET OPTIMISATION DES INTERVENTIONS DE MAINTENANCE

La planification des interventions de maintenance constitue une fonction essentielle pour assurer la disponibilité des équipements, réduire les arrêts non programmés et optimiser l'utilisation des ressources. Elle vise à organiser de manière rationnelle les actions de maintenance en tenant compte des contraintes techniques, humaines, économiques et de production (*Duffuaa et al., 1999*).

Dans le cadre de la maintenance préventive, la planification ne se limite pas à programmer des interventions périodiques, mais cherche également à déterminer le moment opportun pour intervenir afin de concilier fiabilité des équipements, coûts de maintenance et exigences opérationnelles. Cette problématique conduit naturellement vers l'optimisation des intervalles de maintenance.

2.2.1 Planification des interventions préventives

La planification des interventions préventives constitue un élément fondamental pour garantir la disponibilité et la fiabilité des équipements. Elle consiste à programmer à l'avance les opérations de maintenance afin de réduire la probabilité de défaillance et d'éviter les arrêts non planifiés.

Selon *Laurens (2014)*, la planification repose sur l'analyse des historiques de pannes, des recommandations des constructeurs et des conditions d'exploitation des équipements. Elle permet de déterminer les fréquences d'intervention optimales, en tenant compte des contraintes de production et des ressources disponibles. De plus, une planification efficace contribue à réduire les coûts de maintenance en limitant les interventions correctives coûteuses et en optimisant l'utilisation des pièces de rechange.

Les approches modernes intègrent également des outils informatiques, tels que les systèmes de gestion de maintenance assistée par ordinateur (GMAO), qui facilitent la programmation, le suivi et l'évaluation des opérations de maintenance (*Bourouni, 2004*).

2.2.2 Ordonnancement des opérations de maintenance

L'ordonnancement consiste à organiser dans le temps l'exécution des interventions planifiées en tenant compte :

- Des priorités des équipements ;
- Des contraintes de production ;
- Des ressources disponibles ;
- Des durées d'intervention.

Son objectif est d'affecter les tâches au bon moment et dans le bon ordre afin de minimiser les temps d'arrêt et maximiser l'efficacité opérationnelle (*Pinedo, 2016*).

Parmi les méthodes classiques utilisées :

- Diagrammes de Gantt ;
- Méthode PERT/CPM ;
- Règles de priorité ;
- Modèles d'optimisation.

L'ordonnancement constitue ainsi un levier d'amélioration de la performance globale du système de maintenance.

L'un des problèmes majeurs en maintenance préventive consiste à déterminer l'intervalle optimal entre deux interventions successives.

L'objectif est donc de rechercher un compromis optimal entre plusieurs critères contradictoires.

Traditionnellement, cette optimisation s'effectue selon trois approches principales :

- Optimisation basée sur la fiabilité.
- Optimisation basée sur la disponibilité.
- Optimisation basée sur les coûts.

Cependant, la prise en compte simultanée de plusieurs critères rend souvent les approches monocritères insuffisantes, ce qui justifie le recours à des méthodes d'aide multicritère à la décision (*Wang, 1997*).

2.3 FONDEMENTS DE L'AIDE MULTICRITERE A LA DECISION

2.3.1 Concepts et principes de l'analyse multicritère

2.3.1.1 Décision

Une décision est une action qui est prise pour faire face à une difficulté ou répondre à une modification de l'environnement, c'est à dire, pour résoudre un problème qui se pose à l'individu ou à l'organisation (*Lévine et pomerlo, 1989*).

Roy et Bouyssou (1993) estiment que la décision est souvent présentée comme le fait d'un individu isolé (décideur) qui exerce librement un choix entre plusieurs possibilités d'actions à un moment donné dans le temps.

Selon *Mintzberg (1979)*, une décision, qu'elle soit individuelle ou résultant d'un travail de groupe, peut être définie comme l'engagement dans une action, c'est à dire, une intention explicite d'agir.

2.3.1.2 Décision dans la fonction maintenance

La fonction maintenance désigne la structure qui prend en charge l'ensemble des processus administratifs et techniques relevant des activités de maintenance. Elle est composée de plusieurs sous-fonctions dont chacune est responsable de gérer un ensemble d'activités dans le cadre de sa mission. Parmi celles-ci, on s'intéresse en particulier aux actions concernées par la notion de décision multicritère ; c'est-à-dire celles impliquant des problèmes multidimensionnels ou multi-décideurs (*BOUCHAALA, 2021*).

Ces décisions se répartissent en plusieurs domaines clés :

- **Décisions administratives et managériales :**

- La gestion des données et des informations : Choisir les outils (GMAO, logiciels, supports) pour centraliser, traiter et exploiter les informations liées aux interventions, équipements et historiques.
- La gestion des ressources humaines : Attribuer les tâches au personnel selon leurs compétences, recruter si besoin, et évaluer les performances pour optimiser l'organisation humaine.
- La gestion des stocks et des fournisseurs : Déterminer les pièces de rechange prioritaires, gérer les consommables, choisir les fournisseurs selon le coût, la qualité, les délais et la fiabilité.
- La gestion des contracteurs : Faire appel à des prestataires externes pour certaines opérations de maintenance, en fonction de leurs qualifications, de leur expérience et de leurs offres.
- Gestion financière et budgétaire : Allouer les budgets aux différentes activités, décider d'investissements (GMAO, équipements, formations...) et optimiser les coûts.

- **Décisions techniques et technologiques :**

- La planification et l'ordonnancement : Planifier les interventions en fonction de la criticité des équipements et déterminer les intervalles adéquats pour les opérations périodiques.
- Le diagnostic et l'entretien : Analyser les symptômes des défaillances pour identifier la cause du dysfonctionnement et choisir la solution technique appropriée.
- Les analyses et les études : Choisir les stratégies de maintenance adaptées (préventive, conditionnelle, corrective...), après étude des équipements, coûts et bénéfices attendus.
- L'évaluation de la sûreté de fonctionnement : Évaluer les risques et la fiabilité des équipements (via AMDEC, analyses de modes de défaillance...) pour assurer la sécurité et la continuité.
- La prédiction et le pronostic : Déterminer les méthodes de surveillance (vibrations, thermographie...) pour anticiper les pannes et mettre en œuvre la maintenance prédictive.

2.3.1.3 Aide à la décision

L'aide à la décision est définie par *Roy et Bouyssou (1993)* comme étant « l'activité de celui (homme d'étude) qui prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, cherche à obtenir des éléments de réponses aux questions que pose un intervenant (décideur) dans un processus de décision, éléments concourant à éclairer la décision et normalement à prescrire, à recommander ou simplement à favoriser un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution du processus d'une part, les objectifs et le système de valeurs au service duquel cet intervenant se trouve placé, d'autre part ».

- **Décideur :**

L'entité (individu, organisation ou collectif) qui, dans un processus de décision, apprécie les possibilités d'action, exprime des préférences et influence l'évolution du processus en fonction des objectifs et du système de valeurs auxquels il est rattaché.

Cette entité peut être un acteur unique ou un groupe ayant un consensus sur les objectifs à atteindre (*Fomba, 2018*).

- **Homme d'étude :**

Un expert ou un spécialiste chargé d'accompagner le décideur dans un processus de prise de décision, en structurant l'analyse du problème, en modélisant les alternatives et en fournissant des éléments d'évaluation. Son rôle est d'éclairer la décision en rendant les conséquences des choix plus compréhensibles, en proposant des méthodologies et éventuellement en recommandant des actions. Il peut être un collaborateur interne ou un consultant externe, travaillant seul ou en équipe (*Fomba, 2018*).

2.3.1.4 Aide à la décision multicritère

L'aide à la décision multicritère (MCDA) est un sous-domaine de l'aide à la décision, dans lequel les différentes alternatives ou actions sont évaluées selon plusieurs critères. Dans ces problèmes de décision, l'utilisation d'un seul critère ne permet pas de départager efficacement les alternatives tout en tenant compte de l'ensemble des préférences du décideur (*Fomba, 2018*).

Lorsque l'évaluation globale d'un objectif est complexe, il est nécessaire de décomposer l'objectif en structurant l'ensemble des critères d'évaluation. L'approche multicritère permet ainsi d'augmenter le niveau de réalisme et de lisibilité pour le décideur. Construire un modèle basé sur plusieurs critères traduit un mode de raisonnement intuitif et naturel face à un problème de décision, en analysant séparément chaque conséquence. En MCDA, les valeurs à agréger sont généralement des préférences entre alternatives ou des degrés de satisfaction par rapport aux critères considérés (*Adla, 2010*).

- **Critère :**

Selon le dictionnaire « *Le Robert* », un critère est défini comme « ce qui sert de base à un jugement ». En théorie de la décision, il constitue un élément central permettant de formuler des jugements de préférence afin d'orienter ou de faciliter le processus décisionnel.

Mathématiquement, un critère est une fonction d'évaluation appliquée à un ensemble d'alternatives (ou actions). Cette fonction permet de modéliser les préférences du décideur selon un axe d'analyse spécifique. Le critère peut être exprimé sous une forme quantitative ou

qualitative, et constitue un outil essentiel pour la comparaison des alternatives selon une dimension bien déterminée.

Chaque critère est généralement associé à un indicateur de mesure, une unité, une structure de préférence, ainsi qu'une échelle d'évaluation (ordinaire ou cardinale) (*Bollinger & Pictet, 1999*).

- **Action :**

D'après *Bernard Roy (1985)*, une action « A » est la représentation d'une éventuelle contribution à la décision globale susceptible, eu égard à l'état d'avancement du processus de décision, d'être envisagée de façon autonome et de servir de point d'application à l'aide à la décision.

Plus généralement, une action correspond à l'une des solutions envisageables par le décideur face à un problème donné. Pour être considérée comme telle, elle doit avoir un sens propre et pouvoir être évaluée indépendamment, sans perdre sa pertinence décisionnelle. C'est au sein de cet ensemble d'alternatives que s'effectue la recherche de la solution la plus appropriée.

2.3.1.5 Système d'aide à la décision

Un Système d'Aide à la Décision (DSS – Decision Support System) est un système informatique interactif qui combine les capacités d'analyse de l'ordinateur avec les ressources intellectuelles du décideur. Il s'appuie sur des données et des modèles afin d'améliorer la qualité des décisions dans des situations complexes, semi-structurées ou mal structurées (*Keen et Scott-Morton, 1978 ; Sprague et Carlson, 1982*).

Le système d'aide à la décision facilite l'accès à des informations précises et actualisées, offrant aux décideurs un support analytique pour évaluer les alternatives, anticiper les risques et optimiser les stratégies. Il ne se substitue pas au jugement humain, mais le complète en fournissant un éclairage rationnel et factuel, particulièrement utile dans les contextes incertains ou complexes.

Le Système d'Aide à la Décision repose sur trois composantes fondamentales (*Bendib, s.d*) :

- **Données** : Ensemble des informations collectées, stockées et exploitées pour la prise de décision.
- **Modèle** : Méthodes et algorithmes permettant d'analyser les données et de proposer des recommandations optimales.
- **Interface** : Composant visuel et interactif permettant aux utilisateurs d'accéder aux résultats et de naviguer dans le DSS.

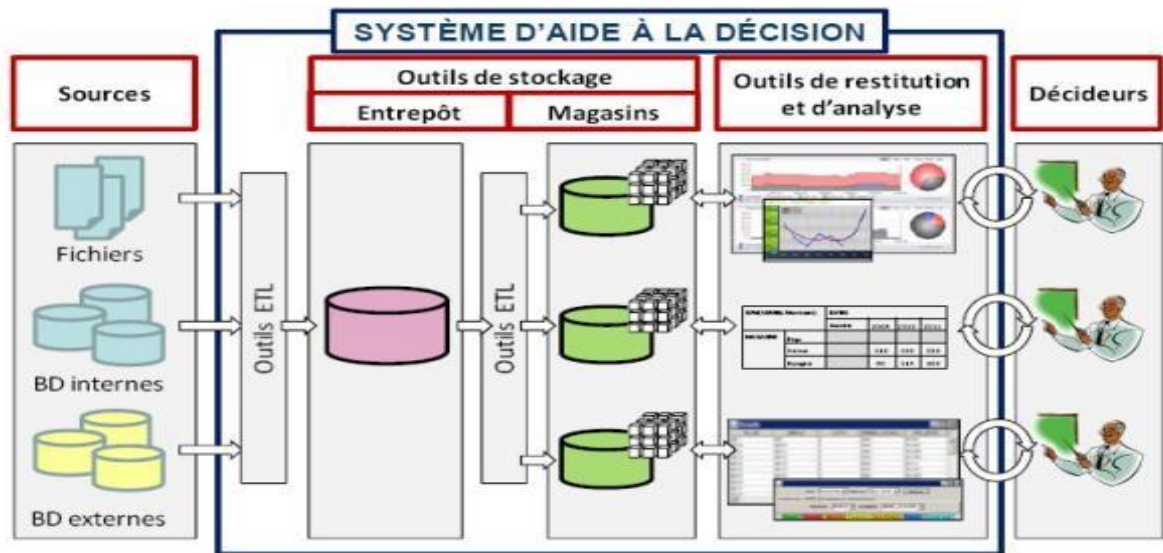


Figure 2.1 Architecture d'un SAD (Bendib, s.d)

2.3.2 Problématiques de l'aide à la décision

La première étape du processus d'aide à la décision va consister à définir vers quoi la prescription de l'homme d'étude au décideur va s'orienter. Cette étape passe par le choix d'une problématique.

Roy (1985) définit quatre problématiques de référence :

Problématique de choix ($P. \alpha$) : Elle consiste à sélectionner un sous-ensemble aussi restreint que possible d'actions, idéalement réduit à un singleton, en éliminant les autres alternatives. L'objectif est d'identifier l'action optimale en mettant en place une procédure de sélection efficace.

Problématique du Tri ($P. \beta$) : Cette problématique consiste à affecter les actions à des catégories prédéfinies en fonction de critères établis. Elle repose sur l'évaluation

individuelle des actions par rapport à des références définies. L'objectif est d'attribuer chaque action à une catégorie spécifique selon ses caractéristiques intrinsèques, en suivant une procédure d'affectation permettant de distinguer les bonnes actions des moins bonnes.

Problématique de Rangement ($P. \gamma$) : vise à ordonner totalement ou partiellement un ensemble d'alternatives selon un critère spécifique. Elle ne cherche pas nécessairement à établir un ordre global strict mais peut regrouper les alternatives en classes d'équivalence, partiellement ou totalement ordonnées. Ce type de problématiques est repose sur une procédure de classement.

Problématique de la Description ($P. \delta$) : Cette problématique fait généralement partie de la première phase d'analyse des problématiques précédentes. Elle consiste juste à éclairer l'analyse des actions en aidant le décideur à appréhender celles-ci. Cela passe par la définition des conséquences élémentaires et des critères, ainsi que par le choix ultérieur d'une autre problématique. Ce type de problématiques est repose sur une procédure cognitive.

Tableau 2.1 synthétise les différentes problématiques de décision et les procédures d'investigation auxquelles elles sont liées.

Tableau 2.1 Les différentes problématiques de décision (Belaribi, 2021).

Problématique	Objectif	Procédure de investigation
$P\alpha$ (Problématique du choix à Alpha)	Sélectionner un sou ensemble aussi restreint que possible de A contenant les meilleures actions.	Selection
$P\beta$ (Problématique du tri à Bêta)	Affecter chaque action de A à une et une seule des catégories définies selon de normes préétablies.	Segmentation
$P\gamma$ (Problématique du rangement à Gamma)	Ordonner les actions de A de la meilleure à la moins bonne.	Classement
$P\lambda$ (Problématique de la description à Lambda)	Décrire les actions et leurs conséquences.	Cognitive

2.3.3 PROCESSUS D'ANALYSE MULTICRITERE DE LA DECISION

Le processus de décision est un plan de travail qui permet de sélectionner une action à partir d'un ensemble d'alternatives, d'une manière systématique et logique. Figure 2.2 décrit explicitement le déroulement de ce processus.

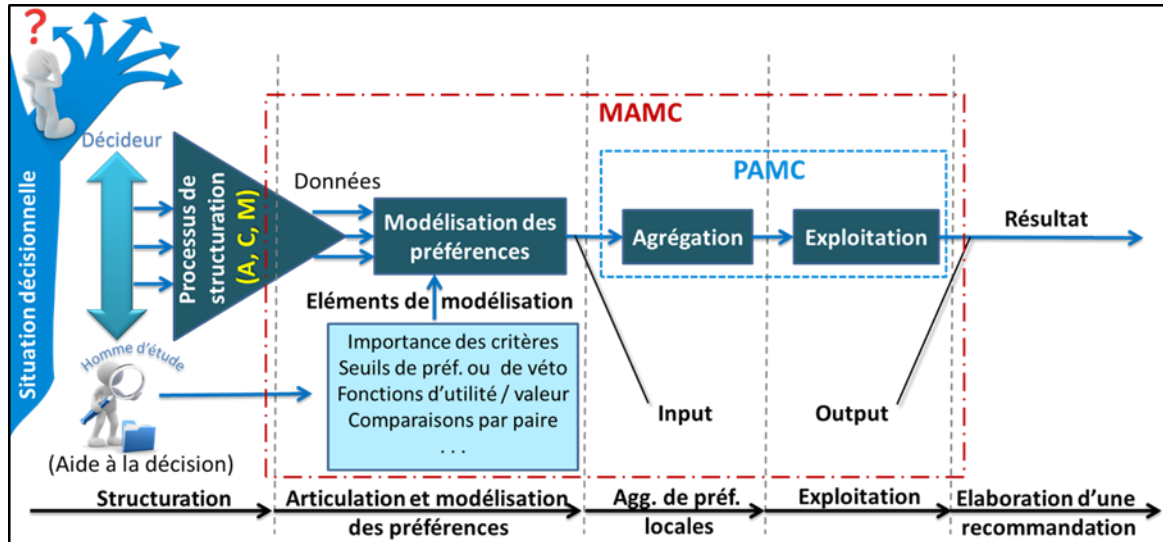


Figure 2.2 Représentation du processus de décision (BOUCHAALA, 2021).

A travers la figure 12, on aperçoit que le processus d'analyse multicritère de la décision est composé de cinq étapes principales :

Structuration du problème : Il s'agit de la bonne compréhension du problème, qui permet de rassembler proprement les données du problème suivant deux ensembles comportant les alternatives (A) et les critères (C). Un ensemble idéal de critères doit être significatif, opérationnel et non redondant, tandis qu'un ensemble idéal d'alternatives doit être fini et pertinent. L'intersection des deux ensembles constitue la matrice de décision M comprenant les évaluations préliminaires requises pour l'analyse.

Articulation et modélisation des préférences : Il s'agit d'enrichir la structure de base précédemment obtenue, en introduisant les éléments de modélisation qui caractérisent la situation décisionnelle : les poids des critères, les contraintes (s'ils existent), des seuils de performance ..., dans le but d'exprimer le comportement local des alternatives par rapport à chaque critère.

Agrégation des préférences : Il s'agit d'établir un ou plusieurs systèmes relationnels de préférences globales entre les alternatives, en appliquant les algorithmes et les règles de décision, dans le but d'agréger les préférences locales précédemment définies.

Exploitation des préférences agrégées : Il s'agit d'établir un rangement, tri, choix ou tout type de représentation claire et compréhensible, à l'aide des préférences agrégées obtenues, et ainsi de conduire des analyses de robustesse, sensibilité, justesse, ...etc. dans le but d'interpréter les résultats et vérifier leur validité.

Elaboration d'une recommandation : Arrivant à la phase finale de l'étude, le processus atteint son objectif à travers l'identification de l'alternative appropriée à partir des résultats.

2.3.4 La pondération des critères

Dans les démarches multicritères d'aide à la décision, la pondération des critères constitue une étape essentielle permettant d'évaluer l'importance relative de chaque critère dans le processus de décision. Cette pondération facilite la comparaison des alternatives en attribuant un poids à chaque critère selon son influence sur l'objectif recherché (Roy, 1985).

Les méthodes de pondération sont largement utilisées dans le domaine de la maintenance industrielle afin d'intégrer différents paramètres tels que le coût, la fiabilité, la disponibilité, la sécurité et l'impact sur la production. Selon Vincke (1992), la qualité de la décision dépend fortement de la précision des poids attribués aux critères.

- **Méthode de pondération direct**

La méthode de pondération directe consiste à attribuer directement une valeur numérique à chaque critère selon son importance. Cette approche est simple à appliquer et fréquemment utilisée dans les études préliminaires. Toutefois, elle reste subjective puisque les poids dépendent principalement du jugement des experts (Roy, 1985).

- **Méthode AHP (Analytic Hierarchy Process)**

La méthode AHP, développée par Thomas L. Saaty, repose sur des comparaisons par paires entre les critères. Cette méthode permet de déterminer les poids des critères à partir d'une matrice de comparaison et d'un calcul des priorités relatives. Elle est largement utilisée en maintenance industrielle grâce à sa capacité à traiter des problèmes complexes (Saaty, 1980).

- **Méthode Entropie**

La méthode d'entropie détermine les poids des critères à partir des données disponibles sans intervention subjective des décideurs. Elle repose sur le niveau de dispersion des informations associées à chaque critère. Plus un critère présente une variation importante, plus son poids devient élevé (Vincke, 1992).

- **Méthode ROC (Rank Order Centroid)**

La méthode ROC (Rank Order Centroid) consiste à attribuer des poids aux critères en fonction de leur classement par ordre d'importance. Cette méthode simplifie le processus de pondération tout en fournissant des résultats satisfaisants dans les problèmes d'aide multicritère à la décision. Elle est particulièrement adaptée lorsque les décideurs rencontrent des difficultés à attribuer des valeurs numériques précises aux critères (Barron & Barrett, 1996).

Selon Barron et Barrett (1996), la méthode ROC permet d'obtenir une estimation cohérente des poids des critères à partir d'un simple classement ordinal, ce qui facilite son utilisation dans les environnements industriels complexes.

2.4 APERÇU DE QUELQUES METHODES MULTICRITERES

L'analyse décisionnelle multicritères est un processus en plusieurs étapes consistant en un ensemble de méthodes visant à structurer et à formaliser les processus décisionnels de manière transparente et cohérente.

Il permet de comparer les alternatives de décision (les stratégies dans le contexte du présent travail) sur la base d'un ensemble de critères d'évaluation auxquels différentes pondérations peuvent être appliquées (Langemeyer et al., 2016).

Les méthodes multicritères sont classées sur 03 types comme ce décrit dans la figure suivante :

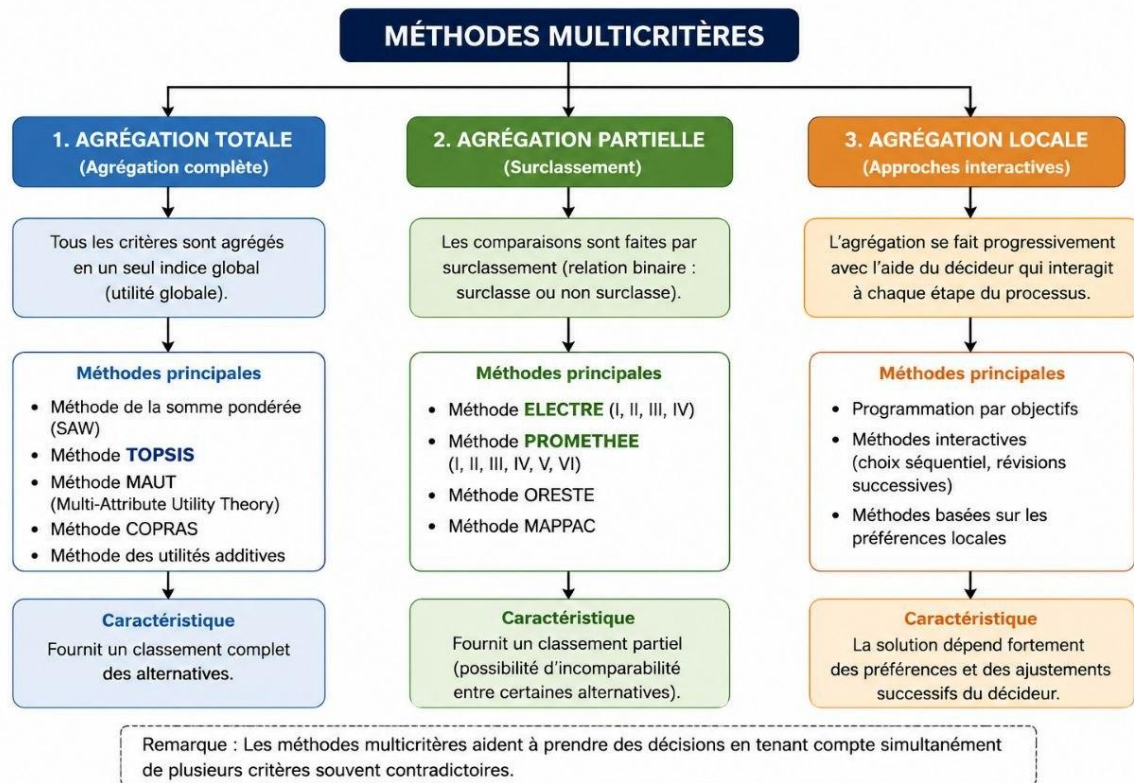


Figure 2.3 Les méthodes multicritères (Roy, 1996 ; Vincke, 1992 ; Saaty1980).

2.4.1 Méthodes d'agrégation totale

2.4.1.1 Méthode AHP

La méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) a pour objet d'aider des acteurs intervenant dans le processus de prise de décision à résoudre des problèmes complexes en organisant et en hiérarchisant les informations et les appréciations. Cette méthode est une des méthodes multicritères d'aide à la décision les plus utilisées dans plusieurs domaines, plus particulièrement, le choix de planification, d'allocation de ressources et de résolution d'un conflit.

Les fondements de cette méthode reposent sur deux approches simultanées que sont la pensée systémique et la pensée causale. La première intervient au moment de la simplification du problème qui structure des composantes hiérarchiquement. La seconde pensée, basée sur les opinions et les sentiments des acteurs, intervient dans l'évaluation par comparaison binaire de

l'impact d'une variable sur une autre. D'une manière simple, on peut dire que cette méthode consiste à représenter un problème de décision par une structure hiérarchique reflétant les interactions entre les divers éléments du problème, à procéder ensuite à des comparaisons par paires des éléments de la hiérarchie, et enfin à déterminer les priorités des actions (Belaribi, 2021).

La démarche pour l'utilisation de l'AHP est la suivante (BOUCHAALA, 2021) :

Étape 1 : La première étape de la méthode AHP consiste à décomposer le problème sous forme d'une hiérarchie simplifiée composée de plusieurs niveaux (Figure 2.6) ; allant de l'objectif (au sommet), passant par les critères et les sous critères (au milieu) et arrivant aux alternatives (actions) qui sont placées dans le niveau inférieur.

Étape 2 : Comparaison des paires d'éléments constituant chaque niveau par rapport aux éléments du niveau supérieur. En autres termes, il s'agit de l'évaluation des critères vis-à-vis

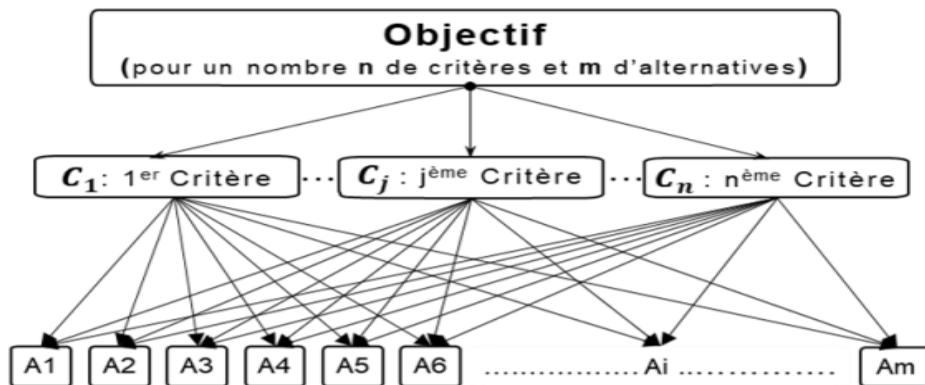


Figure 2.4 Modèle hiérarchique AHP (BOUCHAALA, 2021)

de l'objectif ciblé, et ainsi le jugement des différentes alternatives aux yeux de chaque critère, où il en résulte des matrices de jugement. Dans cette étape, le décideur est amené à spécifier l'importance de chaque critère dans le processus de décision par rapport aux autres, ainsi que l'avantage de chaque alternative par rapport à l'autre, par critère, via des comparaisons binaires qui sont généralement achevées à l'aide d'une échelle linguistique (Tableau 2.7), permettant l'évaluation relative des alternatives et des critères. Cela permet également le traitement des critères quantitatifs et critères qualitatifs d'une manière uniforme.

Tableau 2.2 Echelle d'évaluation de la méthode AHP (échelle de Saaty) (BOUCHAALA, 2021)

Degree	Designation	Description
1	Importance	Les deux éléments contribuent également à l'objectif
2	Faible importance	La préférence est d'un ordre entre les degrés 1 et 3
3	Importance Moyenne	L'expérience et le jugement favorisent légèrement un élément par rapport à une autre
4	Importance moyenne plus	La préférence est d'un ordre entre les degrés 3 et 5
5	Importance forte	L'expérience et le jugement favorisent fortement un élément par rapport à une autre
6	Importance forte plus	La préférence est d'un ordre entre les degrés 5 et 7
7	Importance très forte	Un élément est très fortement préféré à l'autre ; sa domination est démontrée dans la pratique
8	Importance très très forte	La préférence est d'un ordre entre les degrés 7 et 9
9	Importance extreme	La preuve, favorisant un élément par rapport à une autre, est de l'ordre d'affirmation le plus élevé possible

Étape 3 : Vérification de la cohérence des jugements dans chaque matrice en calculant l'index de consistance (C_I) et le ratio de consistance (C_R) à travers les équations (2.2) et (2.3), respectivement :

$$C_I = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2.2)$$

Où λ_{max} est la valeur propre maximale correspondant à la matrice des comparaisons binaires, et n est le nombre d'éléments comparés.

$$C_R = \frac{C_I}{R_I} \quad (2.3)$$

Où R_I est l'indice de cohérence moyen obtenu en générant aléatoirement des matrices de jugement de même taille (généralement, on prend la moyenne des C_I calculés pour 500 matrices remplies aléatoirement). Les jugements sont acceptables pour une valeur de C_R inférieure à 10%, dans le cas contraire ils doivent être révisés pour réduire les incohérences.

Étape 4 : Dérivation des poids des critères w_j et des priorités locales l_i des alternatives, à partir du vecteur propre correspondant à la valeur propre maximale de chaque matrice. Les priorités obtenues, sous chacun des critères, doivent être normalisées de telle façon que leur somme soit égale à 1.

Étape 5 : Synthétisation des priorités locales suivant deux modes de synthèse :

Le mode distributif : il consiste à normaliser les scores des alternatives, en divisant le score de performance de chacune par la somme totale des scores de performance sous le même critère. Il est recommandé quand le décideur est concerné par l'ampleur auquel chaque alternative domine toutes les autres alternatives sous ce critère.

Le mode idéal : il consiste à comparer les priorités normalisées des alternatives avec un repère fixe, qui est généralement choisi comme le score de la meilleure alternative par critère (la plus grande valeur sur chaque colonne). Il est recommandé quand le décideur est concerné par la performance de chaque alternative par rapport à ce repère.

Étape 6 : Enfin, les priorités globales P_i des alternatives peuvent être calculées à l'aide de l'équation (2.4), ce qui permet d'effectuer un rangement suivant la préférence des alternatives :

$$P_i = \sum_j w_j \times l_{ij} \quad (2.4)$$

2.4.1.2 méthode TOPSIS

La méthode TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), en tant qu'un des outils MCDM classiques largement adaptés utilisés pour classer les problèmes, a été développés afin d'atteindre des solutions non inférieures. Elle a été mise en œuvre de manière satisfaisante dans différentes applications champs (Yazdani et Payam, 2014).

Le concept de base de cette méthode est que, l'alternative choisie doit avoir la plus courte distance à l'alternative idéale (la meilleure sur tous les critères), et la plus grande distance à l'alternative négative idéale (qui dégrade tous les critères). Il s'agit de réduire le nombre de

scénarios de désambiguïsation en écartant les scénarios dominés et de classer les scénarios efficaces selon leurs scores globaux calculés (BOUCHAALA, 2021).

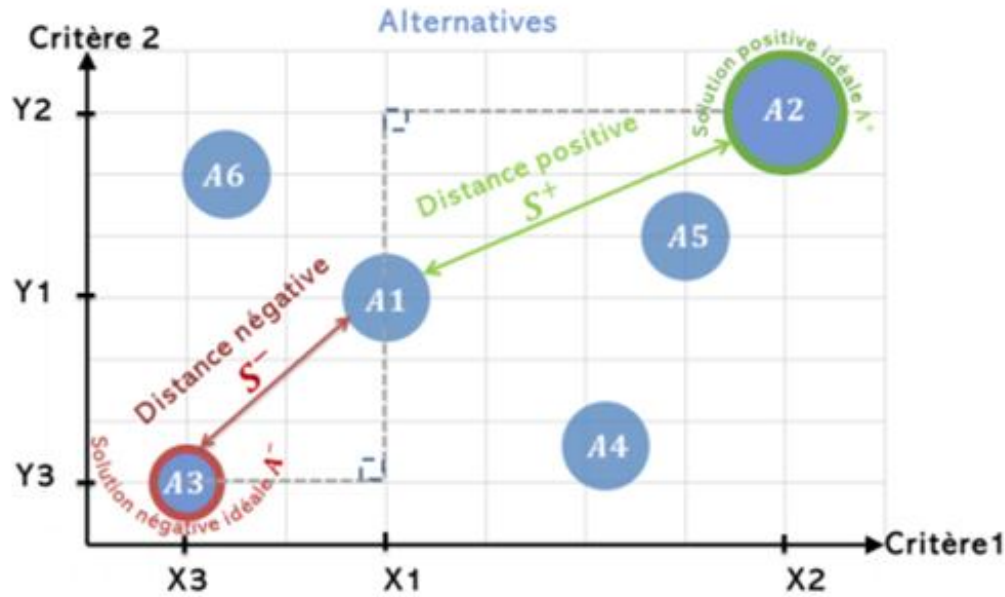


Figure 2.5 Principe de la méthode TOPSIS (BOUCHAALA, 2021)

Cela est traduit mathématiquement comme suit (BOUCHAALA, 2021) :

Étape 1 : Construction de la matrice de décision $(X_{ij})_{m \times n}$, où m est le nombre des alternatives et n est le nombre des critères, tel que l'intersection de chaque alternative avec un critère est remplie avec la valeur X_{ij} représentant la préférence locale initiale (l'ensemble des valeurs X_{ij} constituent les données d'entrée).

Étape 2 : Dérivation de la matrice de décision normalisée $(R_{ij})_{m \times n}$ à travers la normalisation vectorielle des données d'entrée suivant l'équation (2.5):

$$R_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m X_{ij}^2}} \quad (2.5)$$

Étape 3 : Calcul de la matrice de décision normalisée pondérée $(V_{ij})_{m \times n}$ suivant l'équation (2.6) :

$$V_{ij} = R_{ij} \times w_j \quad (2.6)$$

Où w_j est le poids relatif du critère j .

Étape 4 : Identification des deux solutions idéale V_j^+ et anti-idéale V_j^- , dans chaque colonne :

$$V_j^+ = (\max V_{ij} \setminus j \in J^+), (\min V_{ij} \setminus j \in J^-) \quad (2.7)$$

$$V_j^- = (\min V_{ij} \setminus j \in J^+), (\max V_{ij} \setminus j \in J^-) \quad (2.8)$$

Où :

$J^+ = \{j = 1, 2, \dots, n \mid j\}$ Est associé avec les critères bénéfiques qui sont objet de maximisation.

$J^- = \{j = 1, 2, \dots, n \mid j\}$ Est associé avec les critères non bénéfiques qui sont objet de minimisation.

Étape 5 : Calcul de la distance séparant chaque alternative des deux solutions idéale et anti-idéale, à travers les équations (2.9) et (2.10), respectivement.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^+)^2} \quad (2.9)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^-)^2} \quad (2.10)$$

Où : $i = 1, 2, 3, \dots, m$.

Étape 6 : Calcul du score de performance globale pour chaque alternative, à travers l'équation (2.11), permettant d'effectuer un rangement en conséquence.

$$P_i = S_i^- / (S_i^- + S_i^+) \quad (2.11)$$

Où : $0 \leq P_i \leq 1$ et $i = 1, 2, 3, \dots, m$.

2.4.2 Méthodes d'agrégation partielle :

2.4.2.1 Méthode ELECTRE :

- Les méthodes Elimination et choix traduisant la réalité ELECTRE

Ces méthodes ont initialement tout une série de méthodes appelées méthodes de classement (Ayadi, 2010), basées sur des comparaisons d'actions deux à deux. Celles-ci demandent peu d'information pour pouvoir être implémentées, de plus cette information est facilement accessible au décideur, elle fournit donc des résultats solides.

- La méthode ELECTRE I : La procédure d'exploitation multicritère ELECTRE I relève de la problématique de choix (P_α), dans sa version initiale, est fondée sur deux notions de base : l'indice de concordance et l'indice de discordance.
- La méthode ELECTRE II : La méthode ELECTRE II relève de la problématique de rangement (P_γ) : elle vise à ranger les actions de la meilleure à la moins bonne. La méthode ELECTRE II utilise le même indice de concordance que ELECTRE I.

Toutefois, on associe trois seuils à cet indice ($0.5 < C_3 < C_2 < C_1 < 1$). L'indice de discordance ne change pas non plus dans sa définition (ELECTRE I), mais on le calcule pour chaque critère discordant, et on lui donne 2 seuils (2 seuils par critère : $(0 < d_{j1} < d_{j2} < E_j)$).

- La méthode ELECTRE III : La méthode ELECTRE III relève de la problématique de rangement (P_γ). Son originalité réside dans le caractère flou de la relation de sur-classement. Pour chaque couple d'actions (a_j, a_k) , on détermine un degré de crédibilité du surclassement $S(a_j, a_k)$. Ce degré est compris entre 0 et 1 et il est d'autant plus grand que la solidité du surclassement de sur est importante. La méthode ELECTRE III se distingue des méthodes ELECTRE I et II par l'exploitation de pseudo-critères : on peut alors se trouver dans une situation d'indifférence, de préférence faible ou de préférence stricte lors de la comparaison des écarts de préférence de deux actions selon un critère.
- La méthode ELECTRE IV : Les conditions d'application d'ELECTRE IV sont identiques à celles d'ELECTRE III à la différence près que cette méthode ne tient pas compte des poids des critères. Cela peut être très utile dans les cas où il n'est pas possible de les déterminer de façon relativement précise, ou lorsque le décideur ne

souhaite pas faire une différenciation entre les critères en termes d'importance. Dans ELECTRE IV, on évalue chaque paire d'actions selon chaque critère sans avoir à déterminer un indice de concordance ou un indice de discordance.

2.4.2.2 Méthode PROMETHEE

Les méthodes PROMETHEE (Préférence Ranking Organisation Méthodes for Enrichments Evaluation) sont des méthodes d'analyse multicritère de sur classement permettant d'établir un classement des alternatives du meilleur au moins bon. Elles attribuent une note et un poids à chaque critère pour évaluer l'indice de préférence d'un scénario sur un autre. Cet indice sert ensuite à calculer l'attractivité d'un scénario en fonction de sa dominance et de sa soumission par rapport aux autres (Ayadi, 2010).

Les méthodes PROMETHEE appartiennent à la classe des méthodes de sur classement et reposent sur les trois étapes suivantes (Taibi, 2017) :

1. Enrichissement de la structure de préférence : Introduction du critère généralisé, basé sur une fonction de préférence, pour prendre en compte les écarts entre critères et éliminer les effets d'échelle liés aux unités de mesure.
2. Enrichissement de la relation de dominance : Définition d'un degré de préférence globale entre deux actions en tenant compte de tous les critères.
3. Aide à la décision : Utilisation de la relation de sur classement pour guider le décideur.

2.4.3 Méthodes d'agrégation locale

2.4.3.1 Méthode MILP

La méthode MILP (Mixed-Integer Linear Programming, ou Programmation linéaire en nombres entiers mixtes) est une extension de la programmation linéaire qui combine des variables continues et des variables entières, élargissant ainsi son applicabilité à des problèmes d'optimisation plus complexes et réalistes. Cette méthode est particulièrement utile dans des situations où certaines décisions doivent être prises de manière discrète (par exemple, le nombre d'unités produites ou l'allocation de ressources), tandis que d'autres peuvent varier continuellement (comme les quantités de matériaux ou les coûts). Cette flexibilité rend la MILP extrêmement utile dans divers domaines, notamment la gestion de la chaîne d'approvisionnement, la planification des horaires, et la gestion de l'énergie, entre autres. La

formulation d'un problème MILP est généralement de la forme suivante (Kechroud et Bendenia, 2024) :

Minimiser (ou Maximiser) : $C^T x$

Sous les contraintes : $Ax \leq b$

$x_j \in \mathbb{Z}^+$ (pour certaines variables x_j)

$x_i \in \mathbb{R}^+$ (pour les autres variables x_i)

Où :

X Est le vecteur des variables de décision.

C Est le vecteur des coefficients de la fonction objective.

A est la matrice des coefficients des contraintes.

B est le vecteur des constantes des contraintes.

2.4.3.2 Méthode GP

Le Goal Programming est un modèle d'optimisation multi-objectifs vise à sélectionner l'action la plus satisfaisante, parmi un ensemble d'actions potentielles (ou l'ensemble des solutions admissibles).

Plus précisément, ce modèle consiste à trouver une solution qui minimise les déviations (écarts), positifs ou négatifs, entre les objectifs fixés et les résultats obtenus. De plus, le décideur peut attribuer l'importance de ces déviations. La procédure d'agrégation des degrés d'atteinte des objectifs, souvent exprimés dans des unités différentes, représente un défi méthodologique (Ayadi, 2010).

La formulation du modèle standard du Goal Programming est comme suivie (Ayadi, 2010) :

$$\min_{x \in A} \sum_{i=1}^p (\delta_i^+ + \delta_i^-) \quad (2.12)$$

$$\text{Sujet à : } C_l(x) \leq 0, l = 1, 2, \dots, L$$

$$g_i(x) - \delta_i^+ + \delta_i^- = b_i, i = 1, 2, \dots, n$$

$$\delta_i^+, \delta_i^- \geq 0$$

Où :

δ_i^+ : l'écart positif de x par rapport au but.

δ_i^- : l'écart négatif de x par rapport au but.

$g_i(x)$: l'évaluation de la solution x par rapport au critère i .

(x) : système de contraintes associées au problème.

b_i : le but fixé sur le critère i .

2.4.3.3 Méthode CP

Le compromise programming (CP) s'articule autour d'une optique de minimisation des écarts par rapport à la solution idéale tout en procédant à une articulation apriori des préférences (α_j). Sa formulation algébrique est la suivante (*Hammami, 2003*) :

$$\min_{x \in A} \left[\sum_{j=1}^n \alpha_j^r \cdot \left[\frac{g_j(x^*) - g_j(x)}{g_j(x^*) - g_j(x_*)} \right]^r \right]^{\frac{1}{r}} \quad (2.13)$$

Où :

$g_j(x^*)$: l'évaluation de la meilleure des solutions sur le critère j .

$g_j(x_*)$: l'évaluation de la pire des solutions sur le critère j .

2.5 APPLICATIONS INDUSTRIELLES DES METHODES MULTICRITERES EN MAINTENANCE

2.5.1 Sélection des politiques de maintenance

L'aide multicritère est utilisée pour sélectionner la politique de maintenance la plus adaptée aux contraintes industrielles. Cette approche permet d'évaluer plusieurs alternatives en tenant compte de critères tels que le coût, la fiabilité, la disponibilité et la sécurité des équipements. Les méthodes comme AHP et ELECTRE facilitent la comparaison entre maintenance corrective, préventive et prédictive (Roy, 1985).

2.5.2 Évaluation de la criticité des équipements

Les méthodes multicritères permettent également d'identifier les équipements les plus critiques dans un système de production. Cette évaluation repose sur plusieurs critères, notamment la fréquence des pannes, l'impact sur la production et les risques de sécurité. Les outils tels que l'AMDEC et les matrices de criticité sont largement utilisés dans ce domaine (Vincke, 1992).

2.5.3 Priorisation des interventions de maintenance

Dans les environnements industriels complexes, plusieurs interventions de maintenance doivent être réalisées simultanément. L'aide multicritère permet alors de classer les interventions selon leur importance et leur urgence. Les méthodes comme TOPSIS et PROMETHEE contribuent à améliorer la planification des opérations de maintenance et à réduire les temps d'arrêt des équipements (Brans & Mareschal, 2005).

2.5.4 Optimisation des intervalles de maintenance préventive

L'aide multicritère est utilisée pour déterminer les intervalles optimaux de maintenance préventive en considérant simultanément plusieurs critères de performance. Cette approche permet de réduire les coûts de maintenance tout en améliorant la disponibilité et la fiabilité des équipements industriels. Les méthodes hybrides combinant logique floue et AHP sont fréquemment appliquées dans ce domaine (Vincke, 1992).

Tableau 2.3 Comparaison entre les différentes applications industrielle

Domaine application	Objectif principal	Méthodes utilisées	Résultats attendus	Exemple réel d'application
Sélection des politiques de maintenance	Choisir la meilleure stratégie de maintenance	AHP, ELECTREE	Amélioration de la performance globale	Choix de la maintenance prédictive dans l'industrie automobile afin de réduire les arrêts des chaînes de production
Evaluation de la criticité des équipements	Identifier les équipements critique	AMDEC, Matrice de criticité	Réduction des risques de défaillance	Classification des turbines critiques dans les centrales électriques
Priorisation des interventions de maintenance	Classer les interventions selon leur importance	TOPSIS, PROMETHEE	Optimisation de la planification	Priorisation des réparations dans les raffineries pétrolières après détection des anomalies
Optimisation des intervalles de maintenance préventive	Déterminer les intervalles de maintenance préventive	AHP, Logique floue	Réduction des coûts et des arrêts	Optimisation des intervalles de révision des machines CNC dans l'industrie manufacturière

2.6 SYNTHESE DES APPROCHES ETUDIEES

Tableau 2.4 Récapitulatif des méthodes étudiées

Méthodes	Avantages	Inconvénients
Matrice de criticité	Facile à appliquer et interpréter. Aide à prioriser les interventions de maintenance.	Fortement dépendante de l'évaluation subjective des critères.
Pareto (80/20)	Simple et efficace pour identifier les problèmes majeurs. Priorise les actions les plus critiques.	Approche statique, ne permet pas une optimisation dynamique.
Approche économique	méthode permet de maximiser le retour sur les ressources investies	Néglige les aspects techniques et sécuritaires
TOPSIS	Facile à appliquer et interpréter. Classe efficacement les alternatives.	Sensible au choix des pondérations des critères. Moins efficace si les critères sont corrélés.
AHP	Structure clairement les problèmes complexes.	Comparaisons parfois subjectives. Deviens lourd avec trop de critères et alternatives.

	Permet d'inclure l'expertise humaine.	
PROMETHEE	Gère efficacement plusieurs critères et préférences.	Difficile à comprendre et interpréter pour les non-initiés. Paramétrage complexe.
MILP	Optimisation rigoureuse avec contraintes strictes. Trouve une solution optimale garantie.	Formulation et résolution complexes. Consommation élevée en ressources computationnelles.
Goal Programming	Permet de fixer plusieurs objectifs simultanément. Flexible et adaptable.	Pondération des objectifs peut être difficile à équilibrer. Peut générer des solutions biaisées.
Compromise Programming	Trouve des solutions équilibrées en tenant compte de plusieurs critères. Approche flexible.	Sensible aux poids attribués aux critères. Peut être difficile à justifier et expliquer.

2.7 CONCLUSION DU CHAPITRE

Dans ce chapitre, les différentes méthodes de détermination des intervalles de maintenance préventive ont été étudiées. Les approches monocritères, basées sur la fiabilité, la disponibilité ou les coûts, se distinguent par leur simplicité mais présentent certaines limites dans les systèmes industriels complexes.

L'étude des approches multicritères a montré leur importance dans la prise de décision en maintenance, car elles permettent de considérer simultanément plusieurs critères tels que le coût, la disponibilité, la sécurité et la criticité des équipements. Les méthodes multicritères et les techniques de pondération contribuent ainsi à améliorer l'efficacité des décisions de maintenance et la performance globale des systèmes industriels.

CHAPITRE 3 : OPTIMISATION DE LA PLANIFICATION PREVENTIVE A L'AIDE DU PARADIGME MULTICRITERE

3.1 INTRODUCTION

La gestion optimale de la maintenance préventive constitue un enjeu stratégique majeur pour toute organisation industrielle souhaitant concilier fiabilité opérationnelle, maîtrise des coûts et continuité de production. Le choix de la périodicité de remplacement préventif d'un composant est, en apparence, une décision technique simple ; en réalité, elle résulte d'un arbitrage complexe entre des objectifs partiellement contradictoires : intervenir trop tôt engendre des coûts préventifs excessifs et une indisponibilité inutile, tandis qu'intervenir trop tard expose le système à des défaillances coûteuses et à une dégradation de la fiabilité, voire la disponibilité aussi. Dans cette optique, ce chapitre vise à proposer et mettre en œuvre une approche multicritère pour la détermination de l'intervalle optimale de la maintenance préventive, permettant d'assurer une solution efficiente à la fois sur l'aspect économique, opérationnelle et productif.

3.1.1 Présentation Du Travail Cible

Face à la complexité croissante des systèmes industriels et à la multiplicité des contraintes opérationnelles, les méthodes de planification traditionnelles montrent progressivement leurs limites. C'est pourquoi ce travail propose une approche basée sur l'aide à la décision multicritère, en mobilisant notamment les méthodes AHP (Analytic Hierarchy Process) et TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), afin de déterminer des intervalles de maintenance préventive mieux adaptés aux réalités du terrain.

L'objectif est de construire un cadre décisionnel structuré permettant de concilier plusieurs enjeux simultanément : améliorer la fiabilité et la disponibilité des équipements, maîtriser les coûts d'exploitation et garantir la sécurité des personnes et des installations. Le travail s'articule autour de trois axes principaux : l'analyse de l'état actuel de la maintenance sur

le site, la modélisation multicritère du problème décisionnel, et enfin la formulation de recommandations pratiques et applicables sur le terrain.

3.1.2 Contexte

Dans de nombreux environnements industriels, la planification de la maintenance préventive repose encore sur des périodicités fixes issues des recommandations des constructeurs, des retours d'expérience ou des pratiques standardisées. Cependant, face à la diversité des équipements modernes, à leur complexité croissante, à la variabilité de leur criticité, ainsi qu'aux contraintes de faisabilité technique, organisationnelle et économique, ces approches s'avèrent souvent insuffisantes pour atteindre les niveaux de performance attendus. Elles conduisent fréquemment à des intervalles de maintenance mal calibrés, soit trop rapprochés — engendrant des coûts inutiles — soit trop espacés — exposant le système à des risques de défaillance évitables.

Les méthodes avancées d'optimisation — reposant notamment sur l'analyse de fiabilité, la modélisation statistique des défaillances et les approches multicritères — disposent en théorie de mécanismes adaptés pour surmonter ces limitations. Toutefois, leur mise en œuvre reste limitée dans les environnements opérationnels, en raison de leur complexité d'implémentation et de leur faible accessibilité pour les praticiens de terrain. Ce décalage entre la sophistication des outils et la réalité industrielle freine leur adoption et en réduit l'impact. Dans ce contexte, il devient essentiel de concevoir une démarche à la fois techniquement robuste et aisément applicable. C'est dans cette optique que s'inscrit le présent travail, à travers le développement d'une approche multicritère dédiée à l'optimisation de la planification de la maintenance préventive sous contraintes.

3.1.3 Motivations

Le développement d'une démarche d'aide à la décision spécifique à la planification de la maintenance préventive se justifie par plusieurs constats :

- Un mauvais calibrage des intervalles de maintenance peut générer des coûts importants, qu'il s'agisse de surcoûts liés à des interventions inutiles ou de pertes de production dues à des pannes évitables, affectant ainsi la rentabilité de l'ensemble du système productif.

- L'adoption d'une stratégie de remplacement inadaptée peut réduire la durée de vie des équipements, entraîner des arrêts imprévus et compromettre la performance et la sécurité globale des installations.
- Il devient indispensable d'optimiser l'allocation des ressources matérielles et humaines, en tenant compte des contraintes budgétaires, des effectifs disponibles et des exigences propres à chaque équipement.
- Le besoin d'outils accessibles, structurés et visuellement clairs se fait ressentir sur le terrain, afin que les responsables de maintenance puissent s'approprier les méthodes d'optimisation sans dépendre d'une expertise hautement spécialisée.
- Il est crucial de réconcilier les approches rigoureuses — multicritères, optimisation sous contraintes — avec la simplicité d'usage, afin de garantir leur ancrage opérationnel et leur pérennité dans la pratique industrielle.

3.1.4 Objectifs

3.1.4.1 Objectif général

Optimiser la planification de la maintenance préventive des équipements de la station de compression CP1/Z de SONATRACH, en développant un cadre décisionnel multicritère, permettant de déterminer des intervalles de maintenance mieux adaptés aux contraintes opérationnelles du terrain.

3.1.4.2 Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques déclinent l'objectif général en trois axes opérationnels, en correspondance directe avec la structure du mémoire :

a) Analyser l'état actuel de la maintenance sur le site

- Identifier et collecter les données requises pour la modélisation.
- Caractériser le comportement en défaillance du composant faisant l'objet du remplacement à travers une loi de dégradation.
- Évaluer les limites des méthodes de planification conventionnelles actuellement appliquées.

b) Modéliser le problème décisionnel par une approche multicritère

- Identifier et pondérer les critères pertinents ainsi que les alternatives de décision (périodicités potentiellement optimales).
- Evaluer les performances des différentes alternatives identifiées suivant les critères définis.
- Etablir un modèle multicritère pour classer les alternatives de planification et sélectionner les intervalles de maintenance optimaux.

c) Formuler des recommandations pratiques et applicables

- Proposer un plan de maintenance préventive optimisé, fondé sur les résultats de la modélisation multicritère.
- Contribuer à l'amélioration de la fiabilité, de la disponibilité des équipements et à la maîtrise des coûts de maintenance.
- Garantir l'adéquation des recommandations fournies par le modèle aux exigences variables de l'industrie (flexibilité de la modélisation).

3.1.5 Défis

La concrétisation des objectifs susmentionnés s'accompagne de plusieurs défis majeurs, tant sur le plan méthodologique que sur le plan technique et pratique :

- **Assurer la qualité et la complétude des données** : les historiques de pannes et d'interventions sont souvent incomplets ou hétérogènes, ce qui complique la modélisation du comportement des équipements et l'estimation fiable des paramètres de défaillance.
- **Gérer la diversité des équipements** : chaque composant présente des caractéristiques techniques, des modes de défaillance et des contraintes d'exploitation qui lui sont propres, rendant difficile l'application d'une démarche uniforme à l'ensemble du parc.
- **Maîtriser la subjectivité des jugements experts** : les méthodes multicritères reposent en partie sur des évaluations humaines pour la pondération des critères, introduisant une part de subjectivité qu'il convient de contrôler par des mécanismes de vérification de cohérence.
- **Concilier rigueur et accessibilité** : les modèles d'optimisation mobilisés doivent rester suffisamment transparents et interprétables pour que les résultats soient

compris, acceptés et exploités par les équipes opérationnelles, au-delà du cadre académique.

- **Assurer la transférabilité de la démarche** : la méthodologie développée doit être suffisamment flexible pour pouvoir être adaptée à d'autres contextes industriels, sans nécessiter une refonte complète à chaque application.

3.2 PRESENTATION DU SUPPORT D'ETUDE

Les données utilisées sont issues d'un scénario hypothétique mais bien réaliste, relevant du secteur de l'industrie pétrolière et gazière, plus précisément inspiré du contexte opérationnel du complexe industriel CP1/Z de Sonatrach, situé à Arzew, Algérie. Ce scénario est décrit dans les sous-sections suivantes.

3.2.1 Identification du scénario d'étude : Site et unité

Site : Complexe industriel CP1/Z, exploité par SONATRACH et situé à Arzew, Algérie — l'une des zones industrielles les plus stratégiques du pays, abritant un ensemble d'infrastructures pétrolières et gazières d'envergure nationale, opérant en continu 8 760 h/an.

Unité concernée : Unité de distillation atmosphérique (Crue Distillation Unit, CDU), qui constitue la tête du procédé de traitement des hydrocarbures au sein du complexe CP1/Z. Cette unité traite le brut pétrolier en entrée et alimente toutes les unités en aval. Toute défaillance sur cette unité entraîne un arrêt partiel ou total du site, justifiant les coûts élevés de défaillance non planifiée.

Contexte opérationnel :

- Fonctionnement continu (régime 3×8, 365 j/an)
- Criticité : niveau A (impact sécurité, production, environnement)
- Historique d'exploitation disponible sur 22 cycles de remplacement correctif, couvrant environ 8 ans d'exploitation.

3.2.2 Description de l'équipement

L'équipement étudié est une pompe centrifuge de charge (Feed Charge Pump), référence P-101, assurant le transfert du brut dessalé vers le four de préchauffage (Fired Heater F-101) à haute température et haute pression.

Tableau 3.1 Les caractéristiques de la pompe P-101

Caractéristique	Valeur
Type	Pompe centrifuge multi-étagée
Fluide véhiculé	Brut pétrolier dessalé
Température de service	220 – 280 °C
Pression de refoulement	18 – 22 bar
Puissance moteur	450 Kw
Débit nominal	380 m ³ /h

Pourquoi les coûts sont élevés :

- Défaillance non planifiée (25 600 \$) : arrêt de l'unité CDU complète + pertes de production + intervention d'urgence + risque de fuite à haute température.
- Temps technique de réparation (TTR) de 13 à 20 heures : démontage en conditions chaudes, refroidissement obligatoire, procédures HSE strictes.
- Coût préventif (6 000 \$) : remplacement programmé lors d'un mini-arrêt planifié sur l'équipement en stand-by.

3.2.3 Composant faisant l'objet du remplacement périodique

Le composant analysé est la garniture mécanique d'étanchéité (mechanical seal) de la pompe P-101.

La garniture mécanique est le composant le plus sollicité thermiquement et mécaniquement. Elle est soumise à une usure progressive, caractéristique d'un mécanisme de dégradation déterministe compatible avec une politique de remplacement préventif périodique.

Mécanismes de défaillance observés :

- Usure des faces de friction (carbure de silicium / graphite)
- Cokéfaction du fluide de flush à haute température
- Fatigue thermique des soufflets métalliques

Dans ce scénario, on suppose que les TTR suivent la décomposition indiquée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3.2 La décomposition du TTR

Phase	Part (%)	Durée typique
Attente & déclenchement	10 %	~1,5 h
Diagnostic & isolation	20 %	~3 h
Préparation & permis de travail	10 %	~1,5 h
Remplacement + essai de remise en service	60 %	~9 h
Total TTR moyen	100 %	~16 h

Le remplacement préventif ($MTTR_p$) ne mobilise que la phase de remplacement + essai, car la pompe est déjà isolée et froide lors d'un arrêt planifié, ce qui réduit le temps d'intervention de 40 % par rapport à une intervention corrective.

3.3 METHODOLOGIE PROPOSEE

La présente étude s'inscrit dans le cadre d'une méthodologie originale conçue et développée par l'encadrant dans le cadre de ses travaux de recherche portant sur l'optimisation des politiques de maintenance préventive. Le présent mémoire a pour objectif d'en assurer la mise en œuvre, d'en appliquer les différentes étapes à une étude de cas fondée sur le scénario hypothétique précédemment présenté, et d'en évaluer la pertinence ainsi que les performances obtenues.

La méthodologie proposée repose sur une approche intégrée combinant l'analyse de fiabilité, l'évaluation économique et l'optimisation multicritère afin de déterminer la périodicité

optimale de maintenance préventive. Elle comprend successivement la collecte et le traitement des données, la modélisation de la fiabilité par la loi de Weibull, la validation du modèle, le calcul des indicateurs de performance, la définition des contraintes, l'optimisation économique, l'optimisation multicritère fondée sur l'approche AHP–TOPSIS, ainsi que la validation des résultats par une analyse comparative.

La Figure 3.1 synthétise le cadre méthodologique adopté, tandis que les sous-sections suivantes détaillent chacune des étapes de sa mise en œuvre.

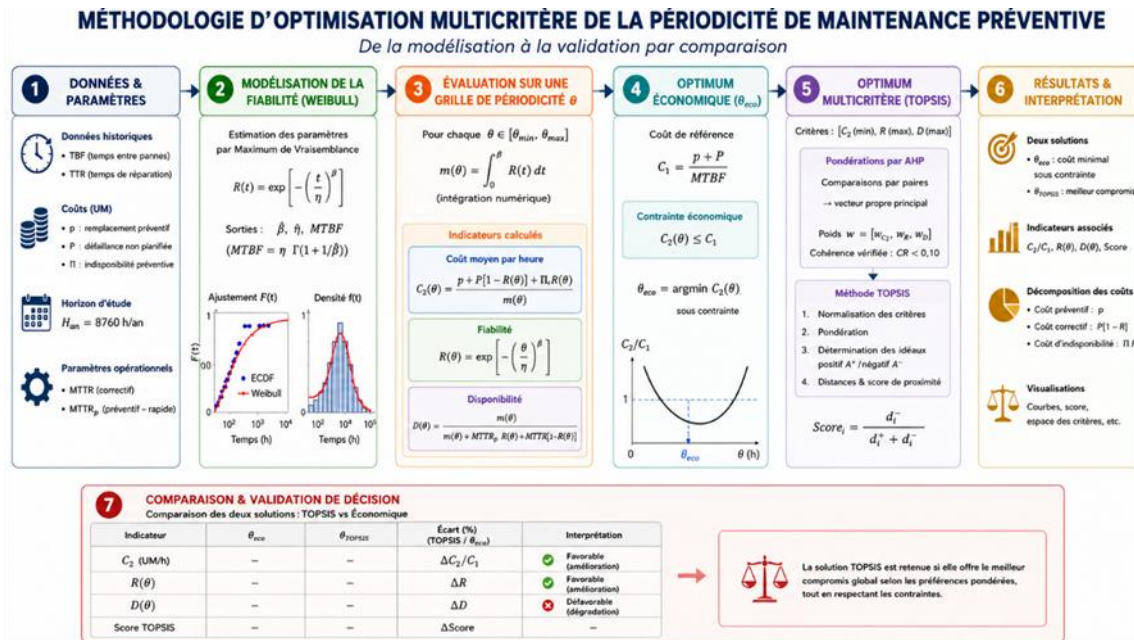


Figure 3.1 Méthodologie d'optimisation multicritère de la périodicité de maintenance préventive

3.3.1 Données et paramètres requis

Les données nécessaires à l'approche proposée proviennent principalement de l'historique de fonctionnement du composant concerné. Elles comprennent :

- Les temps de bon fonctionnement (TBF) observés entre deux défaillances successives, indispensables à la modélisation de la fiabilité.
- Les temps de réparation (TTR) ou temps d'arrêt (TA), requis pour l'évaluation de la disponibilité.
- Les paramètres économiques : coût du remplacement préventif (p), coût de défaillance non planifiée (P), et coût d'indisponibilité dû à une intervention planifiée (π).

À partir de ces données, les paramètres dérivés suivants sont calculés :

- Le temps moyen entre défaillances (MTBF), calculé par l'équation 1.3.
- Le temps moyen de réparation (MTTR), calculé par l'équation 1.6.
- Le temps moyen de réparation préventive (MTTRp), correspondant à la durée de remplacement et d'essai suivant la répartition illustrée dans le tableau 3.2.

L'horizon annuel de référence H (en heures de marche prévues par an) est également requis pour le calcul des coûts annuels.

3.3.2 Modélisation de la fiabilité

3.3.2.1 Modèle de Weibull à deux paramètres

La loi de Weibull à deux paramètres est retenue pour modéliser la fiabilité du composant. Sa fonction de fiabilité est définie d'après l'équation 1.10 par : $R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \right]$, où $\beta > 0$ est le paramètre de forme et $\eta > 0$ le paramètre d'échelle (caractéristique de vie). Le MTBF est alors :

$$MTBF = \eta \cdot \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \quad (3.1)$$

où $\Gamma(\cdot)$ désigne la fonction gamma.

L'estimation des paramètres β et η est réalisée par la méthode du Maximum de Vraisemblance (MLE), en maximisant la log-vraisemblance :

$$\ln L(\beta, \eta) = \sum_i \left[\ln \left(\frac{\beta}{\eta} \right) + (\beta - 1) \cdot \ln \left(\frac{t_i}{\eta} \right) - \left(\frac{t_i}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (3.2)$$

3.3.2.2 Validation du modèle

La qualité d'ajustement est vérifiée par superposition de la fonction de répartition empirique (ECDF) et du modèle théorique $F(t) = 1 - R(t)$. La distribution théorique doit suivre fidèlement les données observées sur l'ensemble de la plage des TBF. La densité de probabilité $f(t)$ doit révéler un pic bien défini autour du MTBF, confirmant le bon ajustement du modèle :

$$f(t) = \left(\frac{\beta}{\eta} \right) \cdot \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (3.3)$$

3.3.3 Évaluation des performances pour différentes périodicités

N points de périodicités $\theta \in [\theta_{\min}, \theta_{\max}]$ sont évalués suivant 3 critères fondamentaux :

- Fiabilité résiduelle à l'instant du remplacement obtenu par le modèle de Weibull (équation 1.10 - $R(\theta) = \exp [-(\theta/\eta)^\beta]$)
- Disponibilité moyenne approximée suivant la logique opérationnelle (section 1.3.3) comme suit :

$$D(\theta) = \frac{m(\theta)}{[m(\theta) + MTTR \cdot (1 - R(\theta)) + MTTR p \cdot R(\theta)]} \quad (3.4)$$

Avec $m(\theta) = \int_0^\theta R(t) dt$: la durée moyenne de fonctionnement entre deux remplacements.

- Le coût moyen par unité de temps d'une politique de remplacement préventif à périodicité fixe θ est donné par le modèle de coût de Block-replacement défini par :

$$C_2(\theta) = \frac{[p + P \cdot (1 - R(\theta)) + \pi \cdot R(\theta)]}{m(\theta)} \quad (3.5)$$

La politique corrective pure (aucun remplacement préventif) correspond au coût C_1 défini par (équation 3.6) :

$$C_1 = (p + P) / MTBF \quad (3.6)$$

Il est donc possible, voire souhaitable, d'utiliser le rapport $(C_2(\theta)/C_1)$ à la place de $C_2(\theta)$ pour représenter le critère coût afin de normaliser son évaluation par rapport au coût de référence.

3.3.4 Détermination de l'optimum économique

L'optimum économique $\theta_{\text{éco}}$ est donc défini comme la périodicité minimisant $C_2(\theta)$, sous la contrainte que la maintenance préventive soit économiquement avantageuse par rapport à la politique corrective pure :

$$\theta_{\text{éco}} = \operatorname{argmin} C_2(\theta) \text{ sous } C_2(\theta) < C_1 \quad (3.7)$$

3.3.5 Détermination de l'optimum multicritère

3.3.5.1 Définition du domaine admissible

Le domaine admissible Ω est défini par les contraintes suivantes :

$$C_2(\theta) \leq \alpha \cdot C_1 \mid R(\theta) \geq R_{min} \mid D(\theta) \geq D_{min} \quad (3.8)$$

Le paramètre $\alpha \leq 1$ garantit que toute solution retenue est préférable à l'absence de maintenance préventive. Les bornes R_{min} et D_{min} permettent d'imposer des niveaux minimaux de fiabilité et de disponibilité selon les exigences opérationnelles du site.

3.3.5.2 Pondération des critères par la méthode AHP

Les poids des critères C_2 , R et D sont déterminés par la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process). Une matrice de comparaison par paires A est construite, où chaque élément $A(i,j)$ représente l'importance relative du critère i par rapport au critère j .

$$A = [a_{ij}] \text{ avec } a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}} \quad (3.9)$$

Le vecteur de poids w est obtenu en normalisant le vecteur propre principal de A :

$$A \cdot w = \lambda_{max} \cdot w \rightarrow w_i = \left(\frac{v_i}{\sum v_j} \right) \quad (3.10)$$

La cohérence des jugements est vérifiée par le ratio de cohérence CR , qui doit rester inférieur au seuil de 0,10 fixé par Saaty (le développeur de la méthode AHP) :

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad \text{avec : } CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n-1)} \quad (3.11)$$

Où n est le nombre de critères et RI l'indice aléatoire tabulé ($RI = 0,58$ pour $n = 3$).

3.3.5.3 Classement des solutions par TOPSIS

La méthode TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) est appliquée pour classer les solutions du domaine admissible Ω . Chaque solution suivant la démarche détaillée dans la section 2.4.1.2 avec une étape supplémentaire de normalisation Min-

Max précédant la normalisation vectorielle pour assurer une évaluation rigoureuse. Le score final permettant de déterminer l'optimum multicritère est défini par l'équation suivante :

$$Score(\theta) = \frac{d^-(\theta)}{[d^+(\theta) + d^-(\theta)]} \quad (3.12)$$

Où $d^+(\theta)$ et $d^-(\theta)$ désignent les distances euclidiennes pondérées de la solution θ à A^+ et A^- respectivement, calculées dans l'espace normalisé des critères. L'optimum multicritère θ_{mc} est la solution maximisant $Score(\theta)$ sur Ω .

3.3.6 Analyse des résultats et aide à la décision

Les performances de θ_{eco} et θ_{TOPSIS} sont analysées selon les trois critères C_2 , R et D . L'arbitrage entre gain en termes de fiabilité et de disponibilité par rapport au surcoût économique est explicité pour justifier le choix de la solution recommandée.

3.3.7 Validation de la décision par comparaison

La validation finale repose sur un bilan économique annuel complet. Le nombre moyen annuel de cycles de renouvellement est estimé par $H/m(\theta)$. Chaque cycle se termine soit par une défaillance avec une probabilité $1 - R(\theta)$, soit par un remplacement préventif avec une probabilité $R(\theta)$. Le nombre annuel de remplacements correctifs (N_{CM}) et préventifs (N_{PM}) est estimé donc par :

$$N_{CM} = \frac{H}{m(\theta)} [1 - R(\theta)] \quad , \quad N_{PM} = \frac{H}{m(\theta)} R(\theta) \quad (3.13)$$

Les coûts annuels décomposés sont alors :

$$C_{corr} = N_{CM} \cdot P \quad , \quad C_{prev} = N_{PM} \cdot (p + \pi) \quad (3.14)$$

La comparaison des coûts totaux annuels entre les deux solutions économiquement-optimale et multicritère permet d'estimer les ressources à prévoir pour chaque solution dans l'horizon fixé.

3.4 IMPÉMENTATION ET RÉSULTATS

Cette section présente les résultats obtenus dans chaque étape de la méthodologie décrite en section 3.3, arrivant la détermination de l'intervalle optimale de remplacement à la fin.

3.4.1 Collecte et structuration des données

Les données utilisées (22 TBF et 22 TTR) sont organisées en un tableau structuré après tri par ordre croissant des TBF. Les valeurs TBF s'échelonnent de 2 840 h à 17 550 h, avec une moyenne de 9028 h. Les TTR varient de 13 h à 20 h (moyenne 16,36 h). La décomposition $TTRp = 0,60 \times TTR$ est appliquée pour distinguer le temps opérationnel du remplacement préventif (*moyenne MTTRp* = 9,82 h), comme indiqué dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3 Données TBF et TTR collectées (22 observations)

Statistique	TBF [h]	TTR [h]	<i>TTRp</i> [h]
Minimum	2 840	13	8
Maximum	17 550	20	12
Moyenne	9 028,2	16,36	9,82
Nombre d'observations (n)	22	22	22

D'autre part, les données économiques sont considérées comme suit :

- $p = 6000$ \$,
- $P = 25600$ \$,
- $P_i = 5000$ \$,

Avec un horizon de remplacement $H=8760h$ (calculé selon le contexte décrit dans la section 3.2.1).

3.4.2 Estimation des paramètres Weibull par MLE

L'optimisation numérique de la log-vraisemblance par la méthode de Nelder-Mead converge vers $\beta = 2,9776$ et $\eta = 10\,097,28$ h. Le MTBF calculé est $MTBF = \eta \cdot \Gamma(1 +$

$1/\beta) = 9\,013,71$ h. La validation graphique (ajustement ECDF vs $F(t)$ théorique) confirme la qualité du modèle, comme illustré dans Figure 3.2.

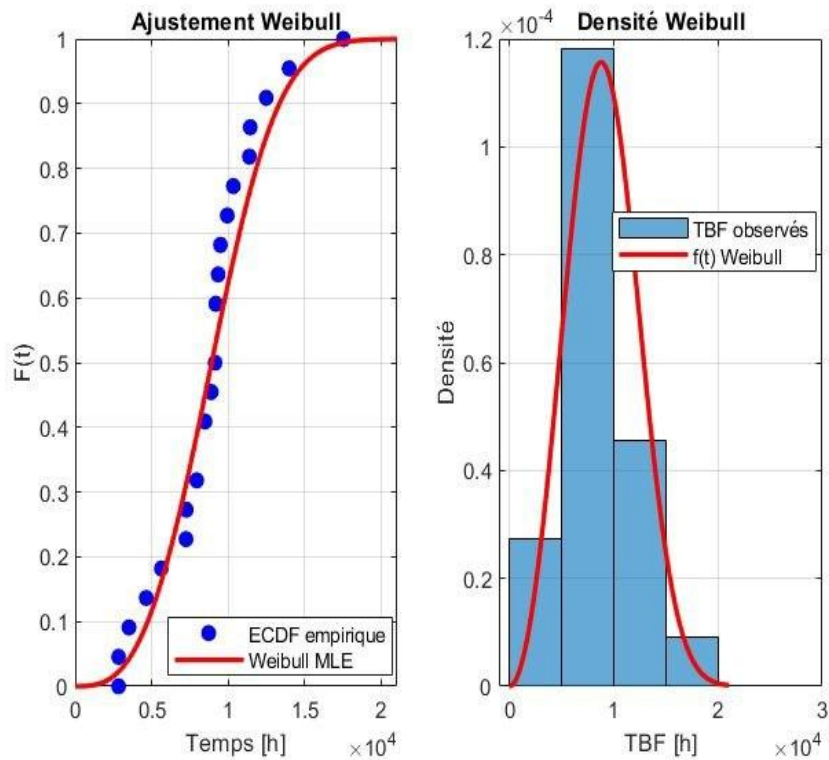


Figure 3.2 Validation Weibull : ECDF empirique vs modèle MLE et densité $f(t)$

Le tableau 3.4 synthétise les caractéristiques du modèle avec leurs interprétations. La valeur $\beta \approx 3$ est physiquement interprétable comme une usure par fatigue thermomécanique progressive des faces de la garniture. Ce résultat valide rigoureusement le choix d'une politique de remplacement préventif périodique : la dégradation est prévisible et une intervention avant défaillance est physiquement justifiée.

Tableau 3.4 Paramètres Weibull estimés par MLE

Paramètre	Symbole	Valeur estimée	Interprétation
Paramètre de forme	β	2,9776	$\beta \approx 3 \rightarrow$ usure progressive (régime de vieillissement)
Paramètre d'échelle	η	10 097,28 h	Durée caractéristique de vie
MTBF estimé	MTBF	9 013,71 h	$\approx 1,03$ an entre deux défaillances
Coût de réf. C1	C1	3,5058 \$/h	Coût moyen sans maintenance préventive

3.4.3 Construction de la grille d'évaluation

La grille $\theta = \{400, \dots, 43\,800\}$ h comprend $N = 5\,000$ points équidistants. Pour chaque θ , les quatre indicateurs sont calculés : $m(\theta)$ par intégration numérique trapézoïdale ($N_{int} = 1\,000$ sous-intervalles), $R(\theta)$ par la formule de weibull, $C2(\theta)$ par la formule du coût moyen sur cycle, et $D(\theta)$ comme rapport temps utile / temps total. Le tableau 3.5 illustre un extrait des résultats de cette étape.

Tableau 3.5 Évaluation des critères sur la grille θ (extrait)

θ [h]	$R(\theta)$	$C2/C1$	$D(\theta)$	$m(\theta)$ [h]
2 000	0,9920	1,5976	0,9951	1993,42
4 000	0,9384	0,8883	0,9974	3940,05
6 000	0,8088	0,7479	0,9981	5698,08
6581	0,7561	0,7428	0,9981	—
5670	0,8358	0,7560	0,9980	—
8 000	0,6070	0,7650	0,9983	7120,83
10000	0,3783	0,8376	0,9983	8107,61
12000	0,1880	0,9131	0,9983	8662,31
15000	0,0387	0,9803	0,9982	8962,27

3.4.4 Optimisation économique

Le minimum de $C2(\theta)$ sur le domaine admissible $\{\theta : C2(\theta) < C1\}$ est identifié à $\theta_{\text{éco}} = 6\,581$ h, avec $C2_{\text{éco}}/C1 = 0,7428$. Cela correspond à une économie de 25,7 % par rapport à la politique corrective pure (coût $C1 = 3,5058$ \$/h). Le nombre attendu d'interventions correctives est de 0,347 par an, et le nombre de remplacements préventifs est de 1,076 par an.

Tableau 3.6 Résultats de l'optimum économique

Indicateur	Valeur
Périodicité optimale économique $\theta_{\text{éco}}$	6 581h ($\approx 9,0$ mois)
Coût moyen $C2(\theta_{\text{éco}})$	2,6041 \$/h
Rapport $C2/C1$	0,7428 (économie de 25,7 % vs politique corrective)

Indicateur	Valeur
Fiabilité $R(\theta_{\text{éco}})$	0,7561 (75,6 %)
Disponibilité $D(\theta_{\text{éco}})$	0,9981 (99,8 %)
Nombre de remplacements préventifs / an (NPM)	1,076
Nombre d'interventions correctives / an (NCM)	0,347

3.4.5 Pondération des critères par la méthode AHP

La pondération des critères par la méthode AHP se fait en construisant la matrice de comparaison par paires (Tableau 3.7) d'une manière parfaitement consistante. Dans notre cas la priorité a été donnée au critère économique (C2) sur la fiabilité (R), qui est, à son tour, prioritaire sur la disponibilité (D), ce qui reflète la réalité économique d'un site de raffinage où la maîtrise des coûts est primordiale, sans négliger la sécurité qui est souvent liée à la fiabilité dans de tels contextes.

Tableau 3.7 Matrice de comparaison AHP — Critères [C2, R, D]

Critère	C2 (Coût du préventif.)	R (Fiabilité)	D (Disponibilité)
C2 (Coût)	1	3	5
R (Fiabilité)	1/3	1	3
D (Disponibilité)	1/5	1/3	1

Les poids des critères (tableau 3.8) sont obtenus à travers l'extraction du vecteur propre principal, donnant approximativement $w = [0,637 ; 0,258 ; 0,105]$. Les poids étant connus maintenant, il est possible de procéder à la mise en œuvre de la méthode TOPSIS.

Tableau 3.8 Résultats AHP — Poids et vérification de cohérence

Paramètre AHP	Valeur
Poids C2 (Coût moyen total)	0,6370 (63,7 %)
Poids R (Fiabilité)	0,2583 (25,8 %)
Poids D (Disponibilité)	0,1047 (10,5 %)

3.4.6 Optimisation multicritère par la méthode TOPSIS

La matrice de décision est constituée des 3 critères pour toutes les solutions admissibles (Tableau 3.5). Après normalisation Min-Max puis vectorielle, pondération par le vecteur w , et calcul des distances aux solutions idéales et anti-idéales (conformément à la section 2.4.1.2), l'indice de proximité relative est maximisé approximativement à $\theta_{TOPSIS} = 5\,670\text{ h}$ ($score = 0,9042$), comme le montre la figure 3.3.

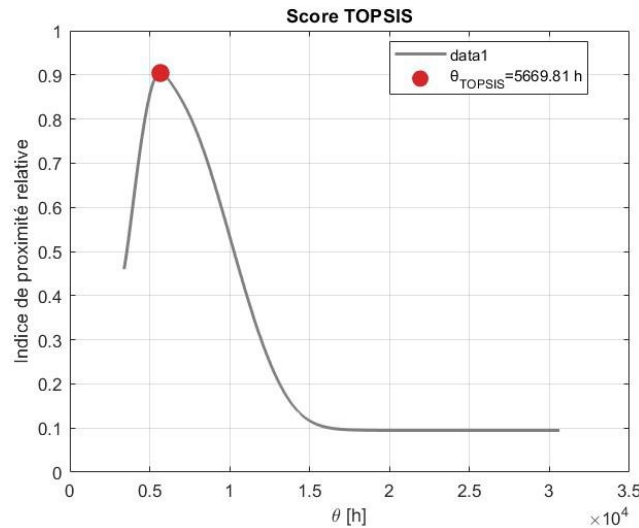


Figure 3.3 Score TOPSIS en fonction de θ — maximum à $\theta = 5\,670\text{ h}$

Figure 3.4 ci-dessous montre que le score optimal multicritère obtenu est supérieur de 4,18% à celui obtenu à $\theta_{\text{éco}}$ ($score = 0,8679$), confirmant que la solution économique pure est sous-optimale au sens multicritère. C'est ce que l'on note également à travers le gain important assuré par la solution multicritère en termes de fiabilité, au prix d'une diminution négligeable de performance sur les aspects coûts et disponibilité.

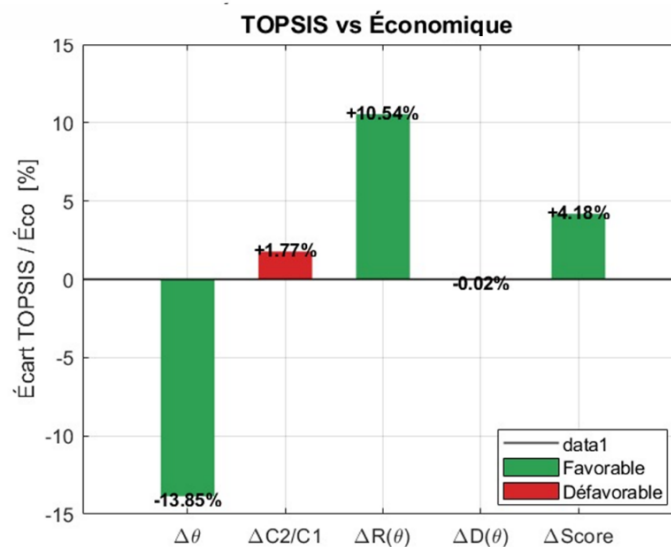


Figure.3.4 Histogramme des écarts TOPSIS/Éco — (favorables-vert ; défavorables-rouge)

3.4.7 Recommandations finales et plan de maintenance

Sur la base des résultats obtenus, les implications des recommandations des deux approches monocritère (solution éco-optimale) et multicritère (solution compromise) concernant le remplacement systématique de la garniture mécanique de la pompe P-101 sont synthétisées dans le tableau suivant.

Tableau 3.9 Comparaison des deux optimums : économique vs multicritère TOPSIS

Indicateur	θ_{eco}	θ_{TOPSIS}	Écart
Périodicité θ^* [h]	6 581	5 670	-13,85 %
Rapport C2/C1	0,7428	0,7560	+1,77 %
Fiabilité $R(\theta)$	0,7561 (75,6 %)	0,8358 (83,6 %)	+10,54 %
Disponibilité $D(\theta)$	0,9981	0,9980	-0,02 %
Score TOPSIS	0,8679	0,9042	+4,18 %
Coût correctif annuel (\$/an)	8 888,53	6 784,96	-23,67 %
Coût préventif annuel (\$/an)	11 840,11	14 841,10	+25,35 %
Coût total annuel (\$/an)	20 728,64	21 626,07	+4,33 %
N_CM (interv. correctives/an)	0,347	0,265	-23,6 %
N_PM (remp. Préventifs/an)	1,076	1,349	+25,4 %

Le tableau 3.9 montre que le plan de maintenance permet d'atteindre une fiabilité de 83,6 % à l'instant du remplacement préventif, de réduire le nombre de pannes imprévues de 23,6 % par an, et de limiter les coûts correctifs à 6 785 \$/an. Le surcoût global par rapport à l'optimum purement économique est de +897 \$/an, soit +4,33 %, ce qui est largement compensé par les bénéfices en termes de sécurité, de continuité de production et de réduction du risque opérationnel.

D'autre part, la figure 3.5 ci-dessous illustre clairement le gain de fiabilité achevé par la solution multicritère choisie pour un surcoût minime. En jouant sur les contraintes, ces résultats peuvent être davantage améliorées et alignés avec divers scénarios en termes d'exigences opérationnelle et économique qui varie d'une industrie à une autre.

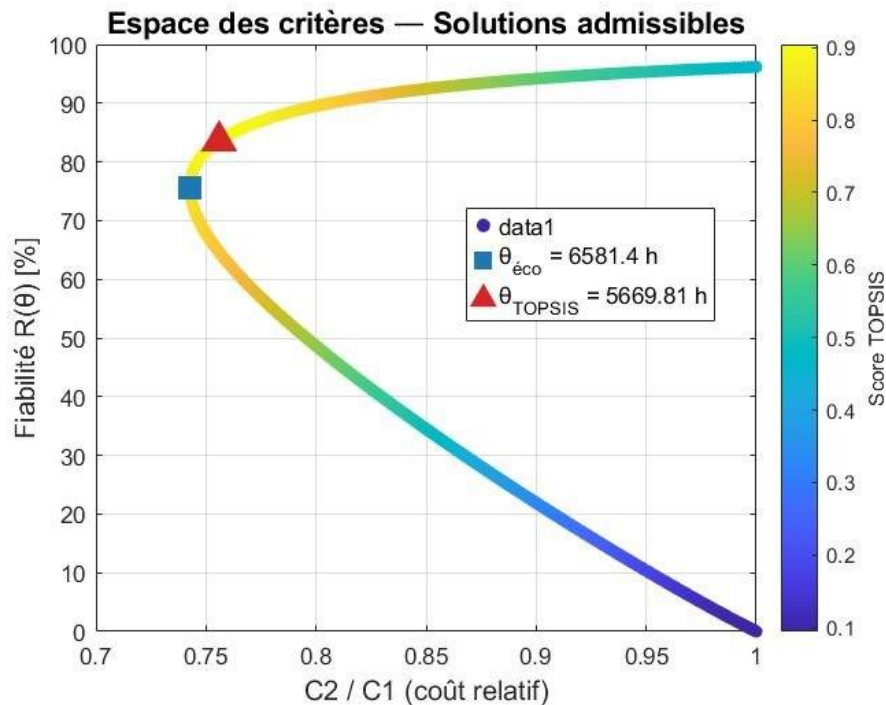


Figure 3.5 Nuage de scores TOPSIS avec $\theta_{\text{éco}}$ et θ_{TOPSIS} en fonction de $C2/C1$ vs $R(\theta)$

3.5 CONCLUSION

Ce travail a présenté une méthodologie complète et structurée d'optimisation multicritère de la périodicité de maintenance préventive, appliquée à la garniture mécanique d'étanchéité d'une pompe centrifuge appartenant à une unité de distillation atmosphérique d'un complexe industriel gazier.

La démarche développée s'articule autour de quatre contributions principales :

- Modélisation probabiliste de la fiabilité : L'estimation Weibull par MLE a conduit à $\beta = 2,9776$ et $\eta = 10\,097,28 \text{ h}$, confirmant un mécanisme d'usure progressive ($\beta \approx 3$) compatible avec une politique de remplacement préventif systématique.
- Optimisation économique : La périodicité $\theta_{\text{éco}} = 6\,581 \text{ h}$ minimise le coût moyen de maintenance $C2(\theta)$ et permet une économie de 25,7 % par rapport à une politique purement corrective.

- Optimisation multicritère AHP-TOPSIS : L'intégration des critères de coût, de fiabilité et de disponibilité, pondérés par la méthode AHP ($CR = 0,033 < 0,10$), conduit à la *solution $\theta_TOPSIS = 5\,670\,h$* , avec un score TOPSIS de 0,9042.
- Analyse comparative et aide à la décision : La solution multicritère améliore la fiabilité de +10,54 % et réduit les pannes de 23,6 % par an, pour un surcoût annuel de seulement +4,33 % par rapport à l'optimum économique.
- La périodicité recommandée de $\theta^* = 5\,670\,h$ ($\approx 7,5$ mois) constitue un compromis optimal entre maîtrise des coûts, fiabilité opérationnelle et disponibilité de l'équipement.

Ce résultat fournit une aide à la décision quantifiée et traçable pour les équipes de maintenance, contribuant ainsi à l'amélioration des pratiques de la maintenance et la prévision des ressources nécessaires.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce mémoire avait pour objectif d'étudier la planification et l'optimisation de la maintenance préventive à l'aide des méthodes d'aide multicritère à la décision, à travers un cas d'étude portant sur l'unité de distillation atmosphérique du complexe industriel CP1/Z de SONATRACH, situé à Arzew. Dans un environnement industriel où la performance des équipements constitue un facteur déterminant de compétitivité, la maîtrise des activités de maintenance représente un enjeu majeur, en particulier pour une unité de tête de procédé dont la moindre défaillance peut entraîner l'arrêt partiel ou total du site.

Dans un premier temps, les concepts fondamentaux de la maintenance industrielle ont été présentés, notamment les notions de fiabilité, de maintenabilité, de disponibilité et de sécurité. L'analyse des différents types de maintenance a permis de mettre en évidence l'importance d'une gestion efficace des interventions préventives au sein d'une installation fonctionnant en continu, telle que notre unité.

Dans un second temps, les fondements de l'aide multicritère à la décision ont été étudiés. Les méthodes AHP et TOPSIS ont été analysées en tant qu'outils permettant d'intégrer simultanément plusieurs critères souvent contradictoires — coût, fiabilité, disponibilité — dans le processus décisionnel, offrant une meilleure représentation de la réalité industrielle que les méthodes monocritères traditionnelles.

Enfin, cette démarche a été appliquée au cas d'étude adopté. La modélisation de la fiabilité par la loi de Weibull ($\beta = 2,9776$; $\eta = 10\,097,28$ h) a permis de caractériser un mécanisme d'usure progressive, tandis que la combinaison des méthodes AHP et TOPSIS a permis de retenir une périodicité de remplacement de $\theta^* = 5\,670$ heures, offrant un compromis équilibré entre coût, fiabilité et disponibilité pour cet équipement stratégique.

Les résultats obtenus montrent que l'approche multicritère constitue un outil efficace pour améliorer la qualité des décisions de maintenance au sein de notre unité, réduire les risques de défaillance non planifiée et optimiser les performances globales des équipements industriels.

PERSPECTIVES

Bien que les objectifs fixés pour ce mémoire aient été atteints, plusieurs pistes méritent d'être explorées afin de prolonger et d'enrichir ce travail :

- Intégrer des données de surveillance en temps réel (vibrations, température, pression) issues d'un système de contrôle-commande afin de faire évoluer le modèle vers une maintenance conditionnelle et prédictive plutôt que systématique.
- Développer des modèles prédictifs basés sur l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique afin d'affiner l'estimation des lois de dégradation et d'anticiper plus finement les défaillances de la garniture mécanique et des autres composants critiques.
- Étendre la démarche AHP-TOPSIS proposée à d'autres équipements/composants critiques, afin de disposer d'un outil global d'aide à la décision pour la planification de la maintenance préventive à une échelle d'un complexe industriel.
- Intégrer d'autres critères décisionnels (impact environnemental, sécurité des personnes, disponibilité des pièces de rechange) afin de rapprocher davantage le modèle des contraintes opérationnelles réelles.

BIBLIOGRAPHIE

AFNOR. (1994). *NF X 60-010 : Maintenance — Concepts et définitions des activités de maintenance*. Association Française de Normalisation.

AFNOR. (2001). *NF EN 13306 : Terminologie de la maintenance*. Association Française de Normalisation.

AFNOR. (2007). *NF X 50-501 : Maintenance — États de référence des biens : vocabulaire des activités de rénovation et de reconstruction*. AFNOR Éditions.

AFNOR. (2018). *NF EN 17007 : Processus de maintenance et indicateurs de performance*. AFNOR Éditions.

Auberville, J.-M. (2004). *Maintenance industrielle : De l'entretien de base à l'optimisation de la sûreté* (Collection Technosup). Ellipses.

Ayadi, D. (2010). *Optimisation multicritère de la fiabilité : application du modèle de goal programming avec les fonctions de satisfactions dans l'industrie de traitement de gaz* [Mémoire de master, Université d'Angers].

Babana Ould Mohamed Lamine. (2009). *Méthodes de maintenance*. Institut Supérieur d'Enseignement Technologique de Rosso.

Barron, F. H., & Barrett, B. E. (1996). Decision quality using ranked attribute weights. *Management Science*, 42(11), 1515–1523.

Behzadian, M., Otaghsara, S. K., Yazdani, M., & Ignatius, J. (2012). A state-of-the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*, 39(17), 13051–13069.

Belaribi, F. Z. (2021). *Utilisation des méthodes d'aide multicritère à la décision dans la gestion des ressources en eau : application de la méthode PROMETHEE à la sélection d'un procédé de dessalement de l'eau de mer* [Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaïd].

Bellaouar, A. (2013). *Fiabilité, maintenabilité, disponibilité*. Cours de maintenance industrielle, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.

Bendib, S.-S. (s.d.). *Introduction aux systèmes d'aide à la décision* [Support de cours]. Université de Batna 2, Faculté des Mathématiques et de l'Informatique, Département d'Informatique. https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/sonia-sabrina-bendib/files/sad_support_de_cours.pdf

Benkhelifa, A. (2011). *Fiabilité des équipements de D.T.M., analyse fonctionnelle et implications organisationnelles de la fonction maintenance de transport* [Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla].

- Benard, V., Cauffriez, L., & Renaux, D. (2002). *Modélisation des paramètres de la sûreté de fonctionnement par des fonctions de transfert : Application à la disponibilité*.
- Blanchard, B. S. (2004). *Logistics engineering and management* (6th ed.). Pearson.
- Bouchaala, M. A. (2021). *Modélisation et analyse multicritère de la décision dans la fonction maintenance* (Thèse de doctorat). Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed.
- Brans, J. P., & Mareschal, B. (2005). PROMETHEE methods. Dans J. Figueira, S. Greco, & M. Ehrgott (Éds.), *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys* (pp. 163–186). Springer.
- Cocozza-Thivent, C. (1997). *Processus stochastiques et fiabilité des systèmes*. Springer.
- De Almeida, A. T., Cavalcante, C. A. V., Alencar, M. H., Ferreira, R. J. P., de Almeida Filho, A. T., & Garcez, T. V. (2015). *Multicriteria and multiobjective models for risk, reliability and maintenance decision analysis*. Springer.
- Dhillon, B. S. (2002). *Engineering maintenance: A modern approach*. CRC Press.
- Duffuaa, S. O., Raouf, A., & Campbell, J. D. (1999). *Planning and control of maintenance systems*. John Wiley & Sons.
- Ebeling, C. E. (2010). *An introduction to reliability and maintainability engineering* (2nd ed.). Waveland Press.
- Faghihinia, E., & Mollaverdi, N. (2012). Building a maintenance policy through a multi-criterion decision-making model. *Journal of Industrial Engineering International*, 8, Article 14.
- Heng, J. (2002). *Pratique de la maintenance préventive*. Dunod.
- Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making: Methods and applications*. Springer.
- International Organization for Standardization. (2017). *ISO 15686-5: Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 5: Life-cycle costing*. ISO.
- Kamel, C. (2020). *Étude de la maintenance industrielle* [Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra].
- Kechroud, H., & Bendenia, A. (2024). *Vers une maintenance optimale des équipements industriels : Approche basée sur la modélisation multicritère* [Mémoire de master, Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed].
- Laggoune, R. (2019). *Fiabilité des systèmes*. Université Abderrahmane Mira de Bêjaïa.

Lamouri, M. E. H., & Abdelkani, F. (2020). *Réalisation d'un logiciel de diagnostic* [Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra].

Laurens, J. (2014). *Mise en place d'un plan de maintenance préventive sur un site de production pharmaceutique*.

Mebarkia, D. (2013). *Recherche d'une solution optimale d'exploitation et de maintenance des gazoducs algériens tenant compte de la fiabilité des équipements des différentes lignes* [Mémoire de magistère, Université M'Hamed Bougara de Boumerdès].

Monchy, F. (2010). *Maintenance : méthodes et organisations* (3e éd.). Dunod.

AFNOR. (2018). *NF EN IEC 60812: Analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE et AMDEC)*. AFNOR.

Nakajima, S. (1989). *La maintenance productive totale : mise en œuvre*. AFNOR.

Ouarab, N., & Dadi, S. (2016). *Analyse de la fiabilité et optimisation de la maintenance préventive du système de contrôle d'accès* [Mémoire de master, Université Abderrahmane Mira de Béjaïa].

Pinedo, M. (2016). *Scheduling: Theory, algorithms, and systems* (5th ed.). Springer.

Razafindrazato, G. M. R. (2010). *Méthodes numériques pour la caractérisation vibratoire de structures complexes* [Thèse de doctorat, Université Paris-Est Créteil].

Roy, B. (1985). *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Economica.

Roy, B. (1996). *Multicriteria methodology for decision aiding*. Kluwer Academic Publishers.

Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill.

Smith, A. C., Babister, A. W., & Tomsett, J. D. (2003). *Total maintenance management*. Taylor & Francis.

Tafraoui, S. (2023). *Maintenance industrielle*. Support de cours, Université Ahmed Draïa d'Adrar.

Vincke, P. (1992). *Multicriteria decision-aid*. John Wiley & Sons.

Wang, H. (2002). A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European Journal of Operational Research*, 139(3), 469–489.

Wanmali, A. P., Patel, S., & Dhamone, S. P. (2021). Review on different techniques in maintenance.