



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

معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de maintenance en électromécanique

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique Industriel

Thème

Vers une Maintenance Optimale des équipements industriels: Approche basée sur la Modélisation Multicritère

Présenté et soutenu publiquement par :

KECHROUD Halima

BENDENIA Amina

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
GUETARNI Islam Hadj Mohamed	MCB	Université d'Oran 2 MBA	Président
BOUCHAALA Mohammed Abdelghani	MCB	Université d'Oran 2 MBA	Encadreur
METAHRI Dhiyaeddine	MCB	Université d'Oran 2 MBA	Examineur

Année 2023/2024

Vers une Maintenance Optimale des équipements industriels: Approche basée sur la Modélisation Multicritère

Résumé :

Dans le contexte industriel actuel, la maintenance des équipements est cruciale pour garantir la continuité de la production, la sécurité des travailleurs et la réduction des coûts. Ce mémoire propose une approche innovante pour optimiser la maintenance des équipements industriels via la modélisation multicritère, en intégrant des critères tels que la fiabilité, les coûts et la production. L'objectif est de développer un modèle de maintenance équilibré et efficace en utilisant l'analyse multicritère, combinée à des techniques de modélisation mathématique et d'optimisation. Cette approche permet de hiérarchiser les critères selon leur importance et de trouver un compromis optimal entre eux. Des scénarios de maintenance ont été testés dans une usine de production, montrant que cette méthode réduit significativement les coûts de maintenance, améliore la fiabilité des équipements et optimise la production. Le modèle utilise des données historiques et en temps réel pour prévoir les pannes et planifier les interventions de manière proactive, proposant des plannings de maintenance qui minimisent les interruptions et maximisent l'efficacité opérationnelle. En conclusion, la modélisation multicritère se révèle être une méthode efficace pour optimiser la maintenance des équipements industriels, offrant une nouvelle perspective prometteuse pour améliorer les performances opérationnelles et adopter des pratiques de maintenance plus durables.

Mots clés : Maintenance , cout , fiabilité , production , la modélisation multicritère.

Abstract:

In the current industrial context, equipment maintenance is crucial to ensure production continuity, worker safety, and cost reduction. This thesis proposes an innovative approach to optimize industrial equipment maintenance using multi-criteria modeling, integrating criteria such as reliability, costs, and production. The objective is to develop a balanced and effective maintenance model using multi-criteria analysis combined with mathematical modeling and optimization techniques. This approach allows prioritization of criteria according to their importance and finding an optimal compromise between them. Maintenance scenarios were tested in a production plant, demonstrating that this method significantly reduces maintenance costs, improves equipment reliability, and optimizes production. The model utilizes historical and real-time data to predict failures and proactively plan interventions, proposing maintenance schedules that minimize interruptions and maximize operational efficiency. In conclusion, multi-criteria modeling proves to be an effective method for optimizing industrial equipment maintenance, offering a promising new perspective for improving operational performance and adopting more sustainable maintenance practices.

Key-words: maintenance , cost , reliability , production , multicriteria modeling.

المخلص:

في السياق الصناعي الحالي، تُعدُّ صيانة المعدات أمرًا بالغ الأهمية لضمان استمرارية الإنتاج، وسلامة العمال، وتقليل التكاليف. يقدم هذا البحث نهجًا مبتكرًا لتحسين الهدف هو تطوير نموذج صيانة متوازن وفعال. صيانة المعدات الصناعية باستخدام النمذجة متعددة المعايير، مدمجًا معايير مثل الموثوقية، والتكاليف، والإنتاج باستخدام التحليل متعدد المعايير، مع دمج تقنيات النمذجة الرياضية والتحسين. يتيح هذا النهج إعطاء الأولوية للمعايير وفقًا لأهميتها والعثور على حل وسط أمثل بينها تم اختبار سيناريوهات الصيانة في مصنع إنتاج، مما أظهر أن هذه الطريقة تقلل بشكل كبير من تكاليف الصيانة، وتحسن موثوقية المعدات، وتُحسِّن الإنتاج يستخدم النموذج بيانات تاريخية وفي الوقت الفعلي للتنبؤ بالأعطال والتخطيط للتدخلات بشكل استباقي، مقترحًا جداول صيانة تقلل من الانقطاعات وتعزز الكفاءة التشغيلية. في الختام، تُثبت النمذجة متعددة المعايير أنها طريقة فعالة لتحسين صيانة المعدات الصناعية، مقدمةً منظورًا جديدًا واعدًا لتحسين الأداء التشغيلي واعتماد ممارسات صيانة أكثر استدامة.

كلمات مفتاحية: صيانة , تكاليف , موثوقية , الإنتاج , متعدد المعايير .

Dédicace

Je souhaite exprimer ma gratitude envers mes parents qui ont contribué à ma formation .

À mes frères et soeurs, pour qui j'ai toujours été déterminé à donner le maximum de moi-meme.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers ma binome Amina pour ces cinq années de travail empreintes de souvenirs.

Je tiens à dresser mes salutations à mes amis et camarades de l'institut de maintenance et de sécurité industriel, ainsi qu'à toute la promotion électromécanique industriel de 2024.

À toutes les personnes qui me sont chères et qui me portent dans leur coeur.

KECHROUD Halima

J'offre cette réussite de fin d'études à ma famille . Votre amour, votre soutien et vos encouragements constants ont été essentiels pour moi tout au long de ce parcours. Merci d'avoir toujours été là pour moi, de m'avoir donné la force et la motivation nécessaires pour atteindre mes objectifs.

A ma chère binôme, [KECHROUD Halima]. Merci pour ton travail acharné, ta détermination et ta coopération exemplaire tout au long de ce parcours. Ton soutien, ta patience et ton amitié ont été des éléments clés dans la réussite de ce projet. Ensemble, nous avons surmonté les défis et célébré les réussites, et pour cela, je suis profondément reconnaissant(e).

A tous mes ami(e)s chacun a son nom .

Avec toute ma gratitude et mon affection,

Bendenia Amina

Remerciements

Nous remercions Dieu le Tout-Puissant qui nous a donné le courage et la volonté afin de mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à notre encadreur, le Dr. BOUCHAALA Med. Abdelghani, pour son expertise, son dévouement et son soutien continu qui ont grandement contribué à la réussite de ce mémoire. Ses conseils avisés, sa présence et ses encouragements ont été extrêmement précieux, et nous sommes reconnaissants d'avoir eu la chance de bénéficier de son encadrement.

Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères à l'administration de l'Institut de Maintenance et Sécurité Industrielle d'Oran pour la richesse et la qualité de leur enseignement, ainsi que pour les efforts considérables déployés afin d'assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Que les membres du jury trouvent ici l'expression de nos sincères remerciements pour l'honneur qu'ils nous font en prenant le temps de lire et d'évaluer ce travail.

Nous tenons également à exprimer notre gratitude envers nos familles respectives, sans exception, pour leur soutien inconditionnel et leurs encouragements tout au long de notre parcours.

Que tous ceux qui ont participé, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail reçoivent ici notre sincère reconnaissance.

Sommaire

Dédicace	iii
Remerciements	iv
Sommaire	v
Liste des Figures	viii
Liste des Tableaux	ix
Abréviations et Notations	x
Introduction Générale	1
Chapitre 1: Généralités sur La maintenance	3
1.1 Définition de la maintenance	4
1.2 Evolution dans le contexte industriel	4
1.3 La fonction de maintenance.....	4
1.3.1 La fonction Méthode	4
1.3.2 La fonction Ordonnancement	5
1.3.3 La fonction Réalisation.....	5
1.3.4 La fonction Gestion.....	5
1.4 Politique de maintenance.....	6
1.5 Stratégie de maintenance	7
1.6 Les objectifs de la maintenance	7
1.7 principaux types de la maintenance.....	8
1.7.1 La maintenance corrective.....	8
1.7.2 Les différents types de maintenance corrective	9
1.7.3 La maintenance préventive	9
1.7.4 Les différents types de maintenance préventive :	10
1.8 Approches connexes de maintenance.....	11
1.8.1 Maintenance basée sur la fiabilité	11
1.8.2 Maintenance basée sur les risques :.....	12
1.8.3 Maintenance productive totale :	12
1.9 Opérations de la maintenance	14
1.9.1 Dans la maintenance corrective	14
1.9.2 Dans la maintenance préventive	14
1.10 Concepts clés de la maintenance.....	15
1.11 LES Indicateurs de la maintenance	18
1.11.2 La criticité des équipements industriels.....	19
1.12 Conclusion.....	20
Chapitre 2: LA MODELISATION MULTICRITERE	21

2.1	Définition de l'aide multicritère à la décision	22
2.2	Principe général d'analyse multicritère à la décision:	22
2.3	Les différentes problématiques multicritères :.....	23
2.3.1	Problématique du choix à Alpha α	24
2.3.2	Problématique du tri à Bêta β	25
2.3.3	Problématique du rangement à Gamma γ	25
2.3.4	Problématique de la description à Lambda.....	26
2.4	Approches monocritère et multicritère	27
2.4.1	Approche monocritère.....	27
2.4.2	Approche multicritère.....	28
2.5	Terminologie et concepts associés à la modélisation multicritère	28
2.5.1	Le décideur	28
2.5.2	L'analyste.....	29
2.5.3	Les alternatives	29
2.5.4	Les objectifs.....	29
2.5.5	Les critères.....	30
2.5.6	Les contraintes	30
2.5.7	Un système d'aide à la décision (SAD)	30
2.6	La matrice de performances	32
2.7	Fondement méthodologique	32
2.7.1	Procédure d'agrégation multicritère (PAMC).....	32
2.7.2	Les MMC (méthodes multicritère).....	32
2.7.3	Agrégation complète	33
2.7.4	Agrégation partielle.....	33
2.7.5	Agrégation locale	34
2.7.6	Méthodes d'agrégation complète	34
2.7.7	Méthodes d'agrégation partielle.....	36
2.7.8	Méthodes d'agrégation locales.....	38
2.8	PROCESSUS D'ANALYSE MULTICRITERE DE LA DECISION	39
2.9	Conclusion.....	41

Chapitre 3: Implémentation de la modélisation multicritère pour l'optimisation de la maintenance 42

3.1	Travail Ciblé: Contexte, Motivations et Objectifs	42
3.1.1	Contexte :.....	42
3.1.2	Motivations :.....	42
3.1.3	Objectifs :	43
3.2	Présentation du cas d'étude :	44
3.2.1	Critères retenus	45
3.2.2	Données utilisées.....	46
3.3	Présentation de la méthodologie adoptée :	47
3.3.1	La méthode TOPSIS :.....	49
3.3.2	Description de la méthode MILP :	50
3.4	Implémentation de la méthodologie :.....	53
3.4.1	Implémentation de la méthode TOPSIS :	53
3.4.2	Implémentation du modèle MILP :	58
3.5	Présentation et discussion des résultats	61
3.5.1	Interprétation des résultats de la méthode TOPSIS :.....	61
3.5.2	Interprétation des résultats de la méthode MILP :	62

3.5.3 Comparaison et validation des résultats :	64
3.6 Conclusion.....	65
Références	67

Liste des Figures

Figure 1.1 Évolution de la maintenance depuis 1940	4
Figure 1.2 Les fonctions du service de maintenance	6
Figure 1.3 Les différents types de maintenance	8
Figure 1.4 Les parties de TPM	12
Figure 1.5 Concepts clés de la maintenance	15
Figure 1.6 Système série	16
Figure 1.7 Système parallèle	16
Figure 1.8 Fonctionnement d'un équipement	18
Figure 2.1 Principe générale d'analyse multicritère	23
Figure 2.2 La problématique du choix à Alpha	24
Figure 2.3 La problématique du tri	25
Figure 2.4 La problématique du rangement.....	26
Figure 2.5 La différence entre les quatre problématiques de références	26
Figure 2.6 Architecture d'un SAD.....	31
Figure 2.7 La structure hiérarchique	35
Figure 2.8 Illustration des distances à l'idéal et à l'anti-idéal	35
Figure 2.9 Représentation du processus de décision.....	40
Figure 3.1 une représentation schématique des relations entre les équipements sélectionnés .	44
Figure 3.2 Shéma de la méthodologie adoptée	48
Figure 3.3 Représentation graphique du principe de la méthode TOPSIS	49
Figure 3.4 Interface réalisée par Matlab App Designer.	54
Figure 3.5 Classement de criticité obtenu	57
Figure 3.6 logiciel LINGO v21	59
Figure 3.7 spécifications du modèle MILP	59
Figure 3.8 Les résultats obtenus pour une stratégie	60
Figure 3.9 Les résultats obtenus pour deux stratégie	60
Figure 3.10 Performances locales et globales des équipements	61

Liste des Tableaux

Tableau 2.1 Les différentes problématiques de décision [18]	24
Tableau 2.2 Structure d'une matrice de performances[31]	32
Tableau 3.1 Les données préliminaires (fiabilité coût production).....	46
Tableau 3.2 Les Données(Cout mc ,ms,mp) extrait par ref [37].....	47
Tableau 3.3 Les données pondérées.....	55
Tableau 3.4 La Matrice normalisée	55
Tableau 3.5 Calcul de la matrice de décision normalisée pondérée	56
Tableau 3.6 Distances et priorités-calculées.....	57
Tableau 3.7 Les équipements s'affiche du moins critique au plus critique.....	58
Tableau 3.8 Les résultats de notre approche.....	62
Tableau 3.9 Les résultats obtenus par l'approche de référence [37].....	64

Abréviations et Notations

λ taux de défaillance

$\mu(t)$ taux de réparation

5 S ordre, pureté, propreté, rigueur, netteté

AHP l'Analytic Hierarchy Process , Analyse hiérarchique des procédés

CND Contrôles Non Destructifs

CP Compromise Programing

D Disponibilité

DSS Decision Support System, système d'aide à la décision SAD

ELECTRE Elimination Et choix Traduisant la Réalité

ETL Extract, Transform, Load

FDMS Surtée de fonctionnement

GP Goal Programing

M Maintenabilité

MAUT Multi Attribute Utility Theory, Théorie de l'utilité multi-attributs

MBF Maintenance basée sur la fiabilité

MC maintenance conditionnelle

Milp Mixed-Integer Linear Programming, ou Programmation linéaire en nombres entiers mixtes

MMC méthodes multicritère

MP maintenance prédictive

MS Maintenance systématique

MTBF Temps moyen entre deux défaillances (Mean Time Between Failures).

MTTF Temps moyen jusqu'à la première défaillance (Mean Time To Failure)

MTTR Temps moyenne des réparations (Mean Time To repair)

PAMC Procédure d'agrégation multicritère

PROMETHEE Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation,
Méthode d'organisation du classement des préférences pour l'évaluation de l'enrichissement

R La fiabilité

S La sécurité

TMD Le temps moyen de disponibilité

TMI Le temps moyen d'indisponibilité

TOPSIS Technique for order preference by similarity to ideal solution, Technique de
préférence de commande similaire à la solution idéale

TPM Maintenance productive totale

TRS Taux de Rendement Synthétique

UTA les Utilités additives

WGP Weighted Goal Programming

Introduction Générale

Dans le paysage industriel contemporain, la compétitivité des entreprises dépend fortement de la performance et de la fiabilité de leurs équipements. La maintenance industrielle joue un rôle crucial en garantissant la continuité et l'efficacité des opérations, en réduisant les temps d'arrêt, et en optimisant les coûts d'exploitation. À mesure que les technologies évoluent et que les processus deviennent plus complexes, la gestion de la maintenance doit également s'adapter pour répondre aux nouvelles exigences et défis.

La maintenance industrielle comporte plusieurs enjeux majeurs, tels que la minimisation des coûts, l'amélioration de la fiabilité des équipements, la sécurité des opérations et la réduction de l'impact environnemental. La complexité de ces enjeux nécessite une approche innovante et intégrée pour optimiser les processus de maintenance. La modélisation multicritère émerge comme une solution efficace, permettant de prendre en compte divers critères simultanément et de fournir des solutions optimales adaptées à différents contextes industriels.

L'amélioration des stratégies de maintenance des centrales hydroélectriques est essentielle pour assurer la continuité de la production et répondre efficacement à la demande croissante en énergie. Ce mémoire adopte une méthodologie rigoureuse pour implémenter la modélisation multicritère dans le cadre de la maintenance industrielle. La démarche inclut la définition des critères de maintenance pertinents, la collecte et l'analyse des données nécessaires, l'application des méthodes de modélisation multicritère appropriées et l'interprétation des résultats pour formuler des recommandations stratégiques. Plus spécifiquement, ce travail utilise la méthode TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) et la méthode MILP (Programmation Linéaire en Nombres Entiers Mixtes) pour optimiser les décisions de maintenance.

Le mémoire est structuré en trois chapitres principaux. Le Chapitre 1 aborde les généralités sur la maintenance, offrant une vue d'ensemble des concepts fondamentaux nécessaires à la compréhension de son rôle crucial dans l'industrie moderne. Le Chapitre 2 se concentre sur la modélisation multicritère, explorant en détail les méthodes utilisées pour intégrer et hiérarchiser plusieurs critères essentiels tels que la fiabilité, les coûts et la production. Enfin, le Chapitre 3 met en lumière l'application concrète de la modélisation multicritère pour l'optimisation de la

maintenance. À travers des études de cas pratiques, ce chapitre démontre comment ces méthodes peuvent être mises en œuvre pour améliorer efficacement les stratégies de maintenance .

Chapitre 1: Généralités sur La maintenance

1. Introduction

De nos jours, la maintenance industrielle est bien plus qu'une simple nécessité opérationnelle ; elle est devenue un élément stratégique crucial pour assurer la continuité des opérations au sein des entreprises. Au-delà de la simple réparation des équipements défaillants, elle englobe un ensemble diversifié de stratégies et de pratiques visant à maintenir la fiabilité, la disponibilité et la performance des équipements et des installations industrielles. Une telle fonction complexe se compose de nombreuses sous-fonctions, mettant en jeu plusieurs méthodes, opérations et approches. Ce chapitre vise à explorer les principaux concepts dans ce contexte Ce chapitre vise à introduire les concepts de base dans ce contexte afin d'assurer une bonne compréhension du travaux élaborés dans la suite de ce mémoire.

1.1 DEFINITION DE LA MAINTENANCE

La maintenance [1] 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.

1.2 EVOLUTION DANS LE CONTEXTE INDUSTRIEL

Dans un contexte de concurrence économique à l'échelle planétaire, la gestion de la maintenance est loin d'être stabilisée dans un environnement où l'automatisation et le processus de fabrication deviennent de plus en plus complexes [2].

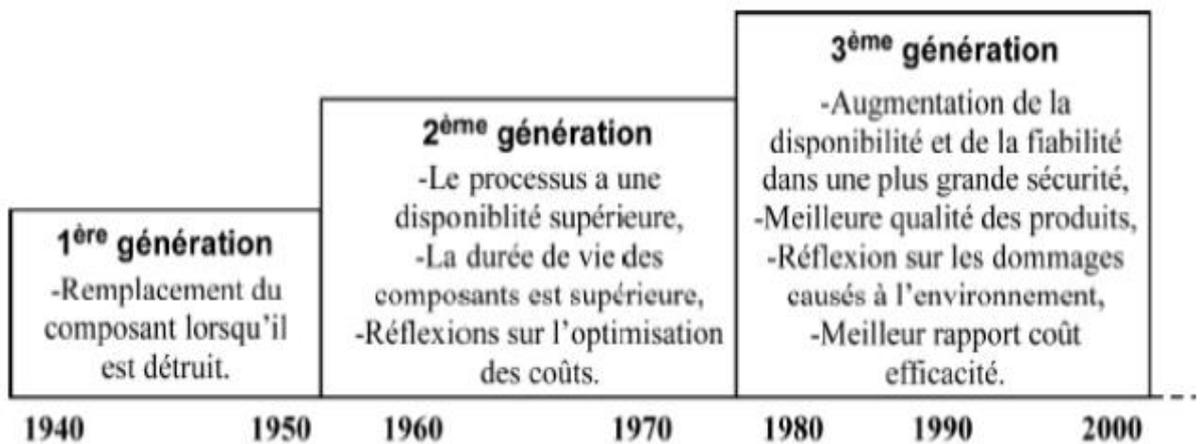


Figure 1.1 Évolution de la maintenance depuis 1940[2]

1.3 LA FONCTION DE MAINTENANCE

Les fonctions du service de maintenance sont les suivantes

1.3.1 La fonction Méthode

La fonction méthode [3] a pour but de préparer les travaux de la maintenance. Pour la maintenance corrective, la préparation implique d'anticiper les risques encourus, puis d'anticiper les problèmes susceptibles de freiner l'intervenant. Pour la maintenance préventive, cela consiste à élaborer le plan de maintenance d'un équipement, puis à évaluer son coût et son efficacité afin de les optimiser.

telles que la proposition d'améliorations techniques et/ou organisationnelles, et la fourniture de l'assistance technique sur site - soutien aux intervenants sur site - aide au

diagnostic. Quel que soit le type d'intervention qui sera réalisée [4], la préparation sera toujours présente. Elle peut être :

Implicite (non formalisée)

Dans le cas de tâches simples, l'intervenant assurera lui-même, par l'expérience et souvent automatiquement dans la préparation de son travail.

Explicite (formalisée)

Il est implémenté par un développeur et crée un fichier de configuration organisé qui constitue une partie importante de la documentation technique, qui sera utilisé chaque fois qu'une intervention est effectuée. Il sera donc inclus et gardé les soumettre à des mises à jour ultérieures.

1.3.2 La fonction Ordonnancement

La fonction ordonnancement [3] est le chef d'orchestre de la maintenance Elle a la responsabilité de la synchronisation des actions de maintenance. Les missions principales de l'ordonnancement sont la planification des travaux l'optimisation des moyens en fonction des délais et chemins critiques, et le contrôle de l'avancement des travaux.

1.3.3 La fonction Réalisation

La fonction réalisation [3] consiste à utiliser les moyens disponibles conformément aux procédures établies, dans les délais recommandés, afin d'accomplir une tâche définie selon les normes de l'art et de remettre le matériel dans un état spécifié. Cette réalisation peut nécessiter un diagnostic, c'est-à-dire identifier et caractériser la défaillance.

1.3.4 La fonction Gestion

La fonction de gestion des services de maintenance [4] englobe la coordination des activités liées à la maintenance, telles que la planification des travaux, l'attribution des ressources, le suivi des interventions, la gestion des pièces de rechange et des stocks, la gestion du personnel technique, la formation, l'évaluation des performances, ainsi que la gestion des coûts et des budgets alloués à ces activités. Elle vise à garantir la disponibilité, la fiabilité et la durabilité des équipements tout en optimisant les ressources disponibles.

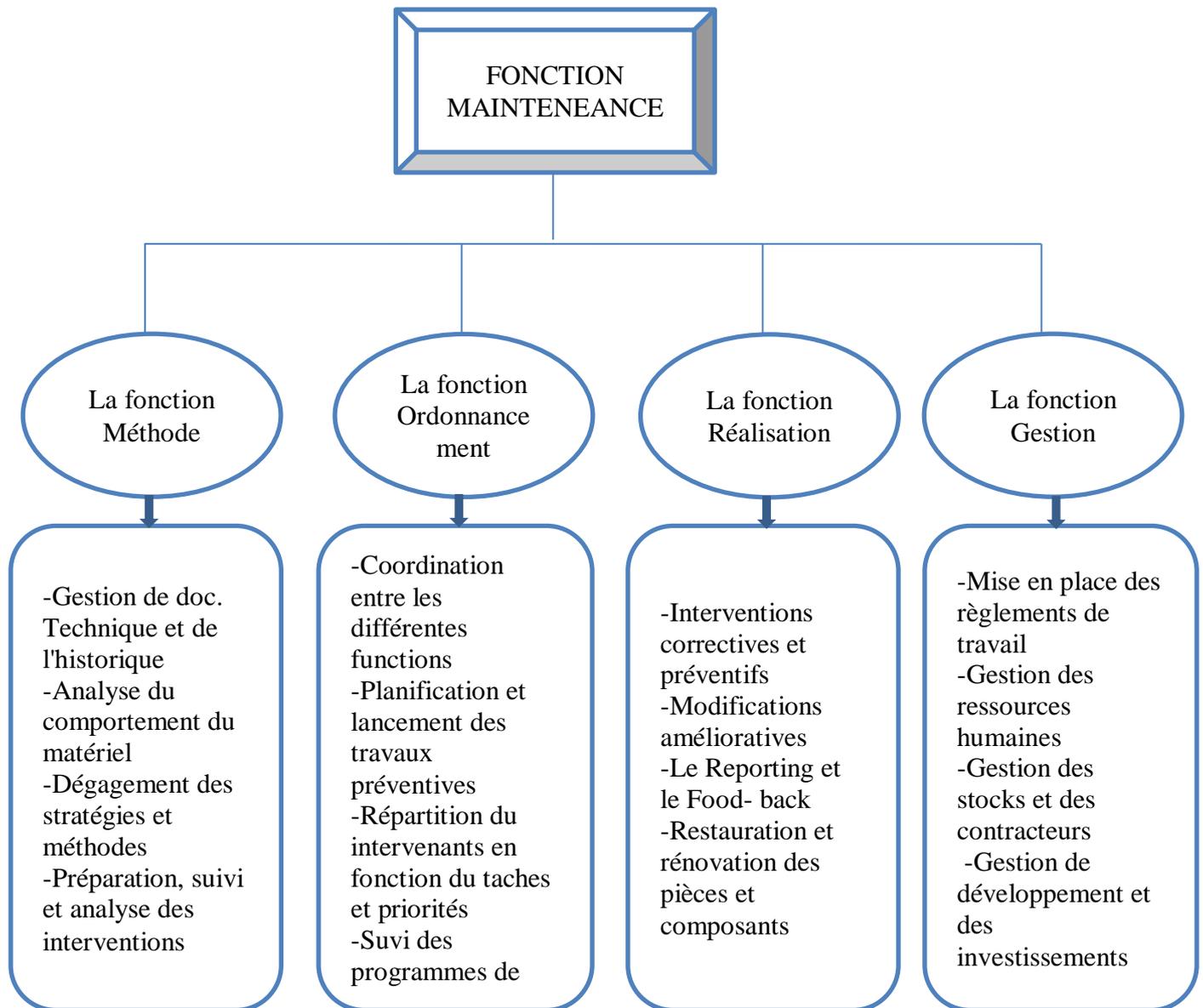


Figure 1.2 Les fonctions du service de maintenance [5]

1.4 POLITIQUE DE MAINTENANCE

La politique de maintenance [6] implique la définition d'un plan de maintenance et la répartition adéquate entre les activités préventives et correctives. Il est essentiel de reconnaître que la prévention ne résoudra pas tous les problèmes, et qu'établir un pourcentage fixe entre prévention et correction nécessite une corrélation avec les exigences de disponibilité et de qualité du client, qui dans le contexte de la maintenance, représente la production de l'entreprise. Une politique de maintenance efficace se base sur la criticité des équipements. Il est inutile de prévenir les problèmes sur des équipements à risque faible ou nul, sans impact sur le client final.

La première étape consiste donc à identifier les équipements à risque en utilisant une grille de criticité, prenant en compte l'ancienneté des équipements et la capacité de gestion par la maintenance.

1.5 STRATÉGIE DE MAINTENANCE

La stratégie de maintenance [7] englobe les principes directeurs qui orientent la planification, l'organisation et l'exécution des activités de maintenance au sein d'une entreprise. Elle vise à optimiser la disponibilité, la fiabilité et la durabilité des équipements tout en minimisant les coûts et les interruptions de production. Cette stratégie inclut la sélection des méthodes et des technologies appropriées, la gestion des ressources humaines et matérielles, ainsi que l'évaluation continue des performances pour assurer l'efficacité et l'alignement avec les objectifs globaux de l'organisation.

1.6 LES OBJECTIFS DE LA MAINTENANCE

Les objectifs de la maintenance sont divisés en deux catégories : les objectifs de coût et les objectifs opérationnels [8].

Objectifs de coût :

- Minimiser les dépenses de maintenance.
- Assurer la maintenance dans les limites d'un budget.
- Adapter les dépenses de maintenance en fonction de l'âge et du taux d'utilisation de l'installation.
- Autoriser une certaine flexibilité dans les dépenses imprévues, à la discrétion du responsable de la maintenance.

Objectifs opérationnels :

- Maintenir les équipements dans un état acceptable et optimal.
- Assurer une disponibilité maximale à un coût raisonnable.
- Éliminer les pannes à moindre coût et à tout moment.
- Maximiser la durée de vie des équipements.
- Remplacer les équipements selon des périodes prédéterminées.
- Garantir des performances de haute qualité.
- Assurer un fonctionnement sûr et efficace.
- Obtenir un rendement maximal de l'investissement.

- Maintenir une présentation satisfaisante des équipements.
- Assurer un état de propreté impeccable des équipements.

1.7 PRINCIPAUX TYPES DE LA MAINTENANCE

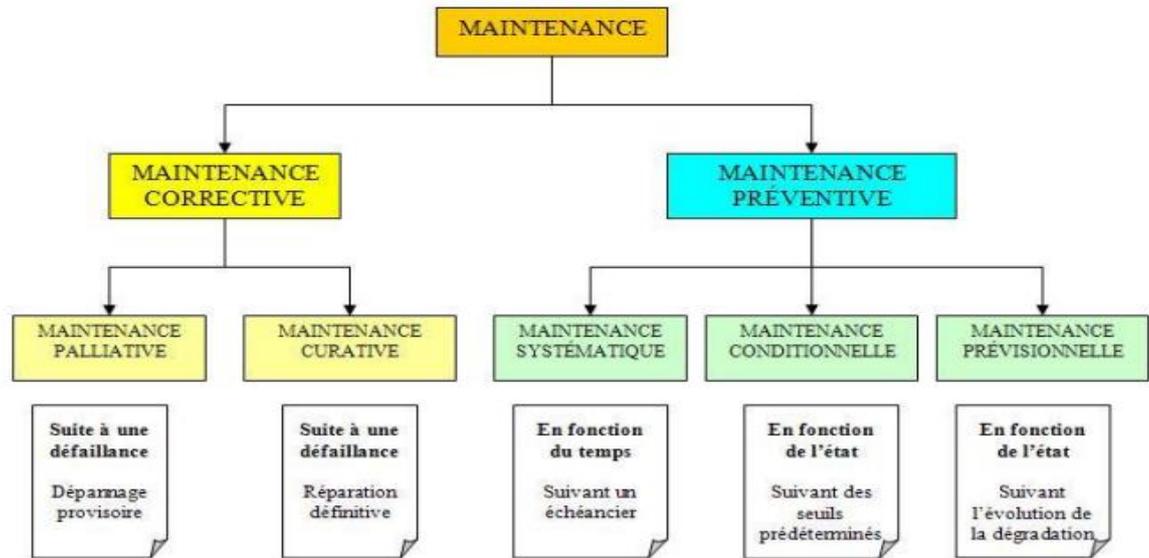


Figure 1.3 Les différents types de maintenance[2]

1.7.1 La maintenance corrective

La maintenance [2] corrective (ou accidentelle) a pour objectif de rétablir le système après une défaillance (perte de la fonction requise) de manière à ce qu'il soit capable de fournir à nouveau ses fonctions. Que ce soit dans des milieux industriels, tertiaires ou de transport, les processus de maintenance ainsi que de qualité sont identiques. Ce qui diffère entre la fabrication et les processus continus, c'est la constante de temps de réalisation des différentes activités

Les activités de la maintenance corrective comprennent [6]:

- La détection et la localisation de la défaillance (symptôme).
- La reconnaissance du mode de défaillance lors du diagnostic initial.
- L'identification de la cause de la panne.
- La remise en état avec ou sans modification.
- Le contrôle du bon fonctionnement.
- Le rapport de l'intervention avec l'analyse du processus de défaillance.

1.7.2 Les différents types de maintenance corrective

La maintenance palliative : La maintenance palliative [9] revêt un caractère temporaire et provisoire. Elle est principalement constituée des opérations qui devront toutefois être suivies des actions curatives (réparations). Le dépannage est une opération de maintenance palliative qui est destinée à remettre le système en état provisoire de fonctionnement, de manière à ce qu'il puisse assurer une partie de ses fonctions requises. Les opérations de dépannage sont souvent de courte durée et peuvent être nombreuses et elles sont également très coûteuses.

La maintenance curative : La maintenance curative [10] consiste à remettre en état l'équipement de manière définitive. Après intervention, l'équipement retrouve ses caractéristiques initiales, telles qu'elles étaient avant l'apparition du problème.

Évolution de la maintenance corrective

La notion de "correction" après une défaillance inclut l'idée d'amélioration. En maintenance traditionnelle, après la détection d'une défaillance accidentelle, on effectue un dépannage ou une réparation pour rétablir la fonction perdue, et souvent on s'arrête là. En maintenance, on réalise [7]:

- Une analyse des causes de la défaillance.
- Une remise en état (dépannage/réparation).
- Une éventuelle amélioration (correction) visant à éviter la réapparition de la panne ou à minimiser ses effets sur le système.
- Une documentation de l'intervention permettant une utilisation ultérieure.

1.7.3 La maintenance préventive

La maintenance préventive [6] est exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères spécifiés, dans le but de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation du fonctionnement d'un bien. Elle se divise en trois axes.

Les buts de la maintenance préventive [7] sont multiples :

- Augmenter la durée de vie des équipements.
- Réduire la probabilité de défaillance en service.
- Minimiser les temps d'arrêt pour révisions ou pannes.
- Prévenir et anticiper les interventions coûteuses de maintenance corrective.
- Faciliter la planification de la maintenance corrective.
- Éviter les consommations excessives d'énergie, de lubrifiant, etc.
- Améliorer les conditions de travail du personnel de production.
- Réduire le budget de maintenance.
- Éliminer les causes d'accidents graves.

1.7.4 Les différents types de maintenance préventive :

La maintenance systématique : Il s'agit d'une maintenance préventive [6] réalisée à des intervalles de temps prédéfinis ou selon un nombre défini d'unités d'utilisation, mais sans vérification préalable de l'état de l'équipement.

La maintenance conditionnelle : C'est une forme de maintenance préventive [6] basée sur la surveillance du fonctionnement de l'équipement et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement, intégrant les actions qui en découlent.

La maintenance prévisionnelle : C'est une forme de maintenance conditionnelle [6] exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation des paramètres significatifs de la dégradation de l'équipement. C'est dans cette maintenance prévisionnelle que l'on utilise les outils issus des contrôles non-destructifs (CND) tels que la thermographie infrarouge, l'analyse des lubrifiants, les mesures des vibrations ou des épaisseurs avec les ultrasons, etc.

1.8 APPROCHES CONNEXES DE MAINTENANCE

1.8.1 Maintenance basée sur la fiabilité

Définitions de la MBF

Quelques définitions de la MBF [11], tirées de la littérature récente, donneront une idée générale de la méthode.

- La MBF est une stratégie de maintenance globale d'un système technologique utilisant une méthode d'analyse structurée pour assurer la fiabilité inhérente à ce système.
- La MBF est une méthode destinée à établir un programme de maintenance préventive pour améliorer progressivement le niveau de disponibilité des équipements critiques. La MBF repose essentiellement sur la connaissance précise du comportement fonctionnel et dysfonctionnel des systèmes.

L'objectif de la MBF

L'objectif principal est clair améliorer la disponibilité des équipements sélectionnés comme critiques par leur influence sur la sécurité, sur la qualité et par leur impact sur les flux de production. Améliorer la disponibilité implique la réduction des défaillances techniques par la mise en place d'un plan préventif allant à l'essentiel », mais aussi la réduction des durées de pertes de production par une nouvelle répartition des tâches entre production et maintenance. D'autres objectifs sont recherchés [12] :

- la maîtrise des coûts par l'optimisation du plan de maintenance préventive, en faisant porter l'effort de prévention « au bon endroit au bon moment », donc par élimination de tâches préventives constatées improductives.
- la mise en œuvre d'une démarche structurée, par analyse systématique de chaque mode de défaillance qui permet de justifier les décisions prises.
- la mise en œuvre d'une démarche participative au niveau des groupes de travail MBF ou au niveau des tâches réparties entre production et maintenance.
- la rapidité des résultats associés à une faible perturbation de l'organisation en place, par opposition à la TPM qui est une démarche globale de management à objectifs sur le long terme.

Outils de la MBF

La MBF (Maintenance Basée sur la Fiabilité) utilise divers outils issus de méthodologies éprouvées, tels que la matrice de criticité, l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité), ainsi que le logigramme de décision. La matrice de criticité évalue l'impact des défaillances des équipements sur des critères clés comme la sécurité, la disponibilité et la qualité. L'AMDEC permet de hiérarchiser les défaillances selon leur importance, leurs causes et leurs effets. Le logigramme de décision aide à déterminer le type de conséquences sur les équipements en fonction du type de défaillance, et à définir le niveau des actions de maintenance nécessaires. En complément, des méthodes statistiques telles que les lois de Weibull, l'analyse exponentielle, l'analyse normale et l'analyse de Pareto peuvent être employées pour améliorer la gestion globale de la maintenance [13].

1.8.2 Maintenance basée sur les risques :

Ce type de maintenance [14] se concentre sur les risques et utilise les principes de l'évaluation des risques pour améliorer la manière dont certaines tâches de maintenance sont effectuées et dont les différentes ressources sont allouées. La maintenance basée sur le risque consiste à analyser les possibilités de rupture, les modes de défaillance et les dommages d'une machine, d'un équipement ou d'un système, ce qui permettra ensuite aux responsables d'élaborer un plan de maintenance qui atténuera ces risques.

1.8.3 Maintenance productive totale :

Le TPM [13] est un système global de maintenance industrielle basé sur le respect des facultés humaines et la volonté participative de tous les employés d'augmenter la rentabilité des installations. Ce système importé du Japon vise à éliminer les principales sources de pertes de production afin de réaliser efficacité optimale de l'équipement. La démarche TPM repose notamment sur des mesures de maintenance préventive et sur la prise en charge par les opérateurs de la maintenance de leurs propres appareils.

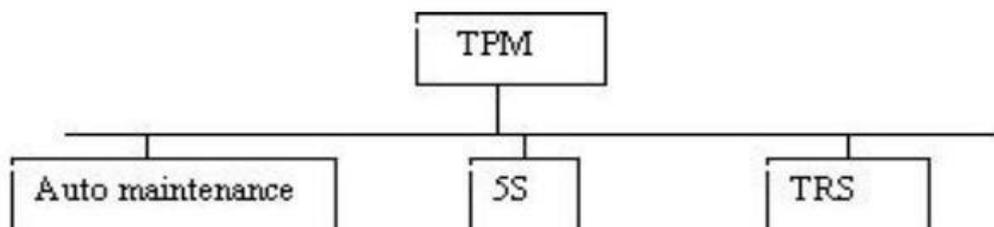


Figure 1.4 Les parties de TPM[13]

Le TRS est un outil qui permet d'évaluer la qualité de l'ensemble du processus de production. On montre, par le calcul de divers indicateurs, les points à améliorer et leur influence sur le processus complet.

Le principe 5 S stipule qu'un travail efficace et de qualité nécessite un environnement propre, sécurisé et organisé. Les 5 S permettent d'établir un environnement de travail fonctionnel, basé sur des règles simples, précises et efficaces. Cette méthode se déroule en 5 étapes, chacune associée à un terme japonais commençant par la lettre S :

- SEIRI (ordre) : éliminé les choses inutiles, débarrassé.
- SEISO (pureté) : nettoyer, veiller à la clarté du rangement.
- SEIKETSU (propreté) : définir les règles de propreté et de rangement.
- SHITSUKE (rigueur) : respecter les règles de propreté et de rangement et progresser.
- SEITO (netteté) : ranger de façon judicieuse, tenir propre : Une place pour chaque chose et chaque chose à sa place.

Nakajima définit la TPM en cinq points :

Les définition [12] comme suit

- La TPM vise à réaliser le rendement maximal des équipements.
- La TPM est un système global de maintenance productive pour la durée de vie totale des équipements.
- La TPM implique la participation de toutes les divisions, notamment l'ingénierie, l'exploitation et la maintenance.
- La TPM implique la participation de tous les niveaux hiérarchiques.
- La TPM utilise les activités des cercles comme outil de motivation.

Les objectifs de la TPM sont :

Le TPM est basé sur l'amélioration continue de la fiabilité et de la productivité des machines (C.-à-d. Efficacité du système de production) par [13] :

- L'amélioration du rendement des installations.
- La mise en place d'une maintenance préventive.
- La gestion autonome des équipements.
- L'amélioration des compétences.
- L'intégration dans les standards de conception des solutions reconnues efficaces.

1.9 OPÉRATIONS DE LA MAINTENANCE

1.9.1 Dans la maintenance corrective

Les opérations de maintenance corrective comprennent [5]:

1. Diagnostic : Enquêter sur l'équipement pour identifier le composant défectueux ou déterminer la cause du dysfonctionnement.
2. Dépannage : Effectuer une remise en état temporaire après une défaillance partielle, dans le but de programmer une réparation permanente ultérieurement.
3. Réparation : Corriger complètement la défaillance et restaurer entièrement le matériel.
4. Échange standard : Remplacer un composant défectueux par une pièce identique, qu'elle soit neuve ou reconditionnée.

1.9.2 Dans la maintenance préventive

Les opérations de maintenance préventive se regroupent en trois familles : les inspections, les contrôles et les visites. Elles permettent de surveiller l'évolution de l'état réel du matériel, qu'elles soient effectuées de manière continue ou à des intervalles prédéterminés ou non, calculés sur la base du temps ou du nombre d'unités d'utilisation [7] .

1. L'inspection : C'est une activité de surveillance exercée dans le cadre d'une mission définie, qui peut inclure des rondes. Elle ne se limite pas forcément à la comparaison avec des données préétablies et est souvent réalisée sans outillage spécifique, sans nécessiter d'arrêt de la production ou des équipements. Par exemple, l'inspection des extincteurs ou l'écoute de bruits dans un compresseur.
2. La visite : C'est une opération de maintenance préventive qui consiste en un examen détaillé et prédéterminé de tout ou partie de l'équipement. Par exemple, la visite périodique des ascenseurs ou des équipements électriques et mécaniques d'un engin de levage. Ces activités peuvent entraîner des démontages partiels et des opérations de maintenance corrective.

3. Le contrôle : Il s'agit de vérifications de conformité par rapport à des données préétablies, suivies d'un jugement. Par exemple, le contrôle du niveau d'isolement d'une installation basse tension ou du jeu fonctionnel dans un mécanisme. Les contrôles peuvent impliquer des décisions telles que l'acceptation, le rejet ou le report, et peuvent conduire à des actions correctives. La périodicité des contrôles peut être constante ou variable, en fonction de l'usure du matériel.

1.10 CONCEPTS CLES DE LA MAINTENANCE

La maintenance est un domaine qui englobe plusieurs concepts interdépendants pour assurer le bon fonctionnement et la durabilité des systèmes.

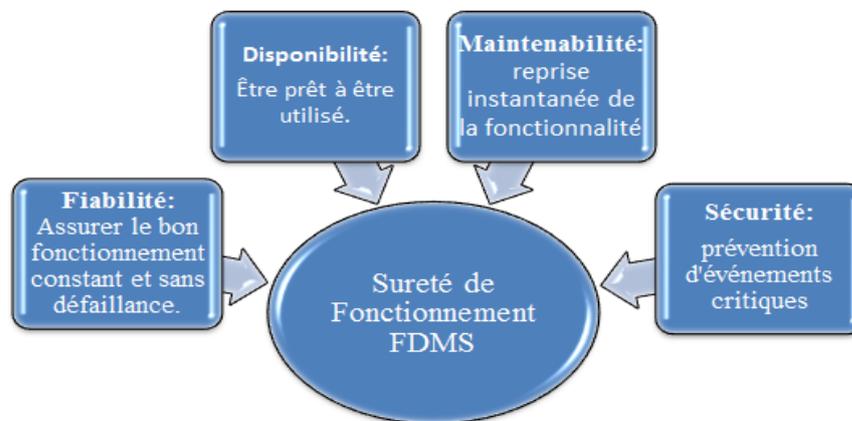


Figure 1.5 Concepts clés de la maintenance

1.9.1 Fiabilité

Définition

La fiabilité $R(t)$ [15] d'un système, par définition, représente la probabilité de bon fonctionnement du système sur la durée $[0, t]$, en supposant qu'il n'est pas défaillant à l'instant $t=0$. Les indicateurs associés à la fiabilité sont :

- $\lambda(t)$: Taux de défaillance, qui indique le nombre de défaillances par unité de temps.
- MTBF : Temps moyen entre deux défaillances (Mean Time Between Failures).
- MTTF : Temps moyen jusqu'à la première défaillance (Mean Time To Failure). Pour un système non réparable, $MTTF=MTBF$.

Fiabilité de système [16] constitué de plusieurs composants:

1. Système en série :

Un système série se caractérise par l'enchaînement linéaire de n éléments .D'après sa structure, la défaillance de l'un de ses n composants entraîne la défaillance du système complet car chaque élément dépend de l'élément qui le précède .

La fiabilité du système en série se calcul :

$$R(t) = R1(t) \times R2 (t) \times R3 (t) \times \dots \times Rn (t) \quad (1.1)$$



Figure 1.6 Système série [16]

2. Système en parallèle :

Un système est dit en parallèle s'il suffit qu'un seul des éléments fonctionne pour que le système fonctionne.

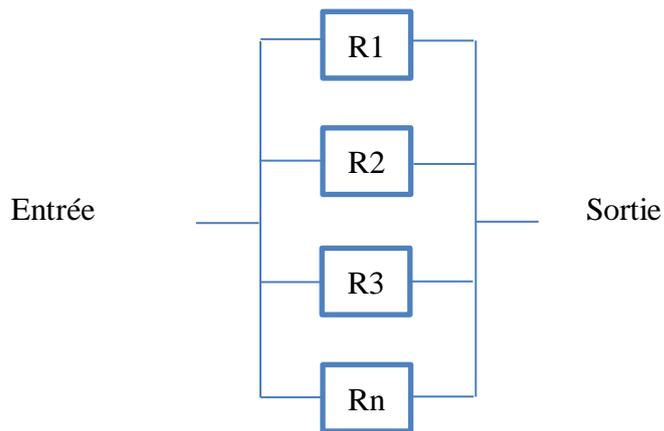


Figure 1.7 Système parallèle[16]

La fiabilité résultante est donnée par :

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Ri(t)) \quad (1.2)$$

La fiabilité du système en parallèle se calcule ainsi :

$$R(t) = 1 - ((1 - R1(t)) \times (1 - R2(t)) \times \dots \times (1 - Rn(t))) \quad (1.3)$$

Remarque :

- Plus il y a des composantes en parallèle, la fiabilité est meilleure.
- Habituellement, on utilise cette propriété pour accroître la sécurité de fonctionnement d'un système

Exemple :

- système de freins d'urgence sur une automobile
- deux pompes en parallèle.

1.9.2 La maintenabilité

Définition

La maintenabilité est définie comme [15] l'aptitude d'un dispositif à être maintenu ou rétabli dans un état où il peut accomplir une fonction requise lorsque la maintenance est effectuée dans des conditions d'utilisation spécifiées avec des moyens et des procédures prescrits. La maintenabilité $M(t)$ représente la probabilité de rétablir le fonctionnement du système après sa défaillance, dans des conditions spécifiques et dans un temps (t) donné et limité. Les indicateurs de maintenabilité incluent :

$\mu(t)$: taux de réparation qui s'assimile à la probabilité que le système soit réparé entre l'instant t et l'instant $(t + dt)$, sachant qu'il n'est pas réparé sur l'intervalle $[0, t]$.

MTTR : moyenne des de réparations (Mean Time To repair)

1.9.3 La disponibilité

Définition

La disponibilité [16] d'une entité est la probabilité qu'elle soit en mesure d'accomplir une fonction requise dans des conditions données à un instant donné, en supposant que les moyens extérieurs nécessaires sont disponibles. Elle est notée $D(t)$ ou $A(t)$.

$$D(t) = A(t) = P(\text{système non défaillant à l'instant } t)$$

Le fonctionnement à un instant t ne nécessite pas forcément un fonctionnement continu depuis le début jusqu'à cet instant, notamment pour un système réparable ; c'est là que réside la différence fondamentale avec la fiabilité.

1.9.4 La sécurité

Définition

La sécurité [16], ou "Safety" en anglais, est la capacité d'une entité à éviter la survenue, dans des conditions données, d'événements critiques ou catastrophiques. Elle est caractérisée par la probabilité $S(t)$ que l'entité E évite la survenue d'événements critiques ou catastrophiques dans ces conditions.

$$S(t) = P [E \text{ évite des événements critiques ou catastrophiques sur } [0, t]]$$

Il convient de noter que dans le domaine de l'informatique, la sécurité a souvent deux aspects :

- La sécurité-innocuité (Safety en anglais), qui vise à se protéger contre les défaillances catastrophiques.
- La sécurité-confidentialité (Security en anglais), qui concerne la prévention de l'accès ou des manipulations non autorisées de l'information, et qui vise à lutter contre les fautes intentionnelles.

1.11 LES INDICATEURS DE LA MAINTENANCE

Les indicateurs sont [16] :

Temps moyen de bon fonctionnement :

Le MTBF (la moyenne des temps de bon fonctionnement entre défaillances consécutives (MTBF)).

Exemple :

Fonctionnement d'un équipement sur 24 heures

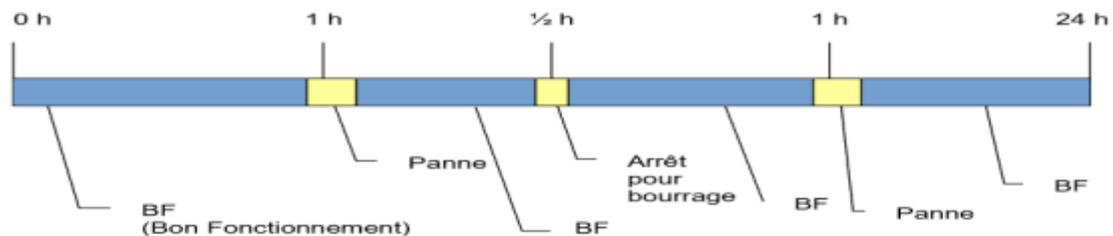


Figure 1.8 Fonctionnement d'un équipement[16]

MTBF= Somme des temps de fonctionnement entre le n défaillances / nombre d' intervention de maintenance avec immobilisation Si λ est constant: $MTBF = 1 / \lambda$.

MTBF est la durée de vie moyenne du système.

Taux de défaillance : λ

λ Le taux de défaillance instantané est le taux de défaillance d'un système ayant fonctionné pendant une durée t.

Appelé également taux de panne, il est égal à l'unité de temps sur la MTBF.

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (1.4)$$

L'indicateur MTTR : temps moyen pour réparer, exprime la moyenne des temps de tâches de réparation.

MTTR: moyenne des temps de réparation (Moyenne des Temps de Taches de Réparation).

μ : taux de réparation.

$$MTTR = \frac{\text{Somme des temps de réparation}}{\text{Nombre de réparations}} \quad (1.5)$$

En considérant que μ est constant dans le temps.

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \quad (1.6)$$

Les grandeurs moyennes associées à la disponibilité les plus courantes sont :

Le temps moyen de disponibilité (TMD) ou durée de bon fonctionnement après réparation, ou Mean Up Time (MUT) : durée moyenne de fonctionnement après la réparation et la défaillance suivante :

Le temps moyen d'indisponibilité (TMI) ou durée moyenne d'indisponibilité, Ou Mean Down Time (MDT) : durée moyenne entre une défaillance et la remise en état suivante :

La durée moyenne entre défaillance notée MTBF (Mean Time Between Failure) : durée moyenne entre deux défaillances consécutives de l'entité. En général, on a la relation :

$$MTBF = MUT + MDT \quad (1.7)$$

1.11.2 La criticité des équipements industriels

La criticité [17] résulte de défaillances en termes de santé, de sécurité, d'environnement, de perte de production et de coût de maintenance.

Réaliser une analyse de criticité pour élaborer une stratégie de maintenance plus efficace :

- L'analyse de criticité permet de comprendre les risques potentiels des actifs pouvant impacter les opérations.
- Une analyse de criticité formelle aide à hiérarchiser le travail de manière efficace, à gérer les risques de façon appropriée et à fonder les améliorations de la fiabilité sur des données objectives.

Par définition, il s'agit d'une analyse quantitative des défauts des équipements et de leur classement par ordre de conséquences graves sur la sécurité, l'environnement, les pertes de production et les coûts de maintenance.

Il est crucial de connaître le degré d'importance de chaque équipement pour la production. Cela permettra de déterminer quelles actions préventives ciblées sont nécessaires pour réduire les temps d'arrêt lorsqu'ils surviennent, voire les prévenir complètement.

1.12 CONCLUSION

En conclusion, le chapitre sur la généralité de la maintenance industrielle nous a permis d'explorer en profondeur les fondements et les pratiques essentielles de cette fonction cruciale dans le domaine industriel. Nous avons examiné les différents types de maintenance, des approches préventives aux interventions correctives, ainsi que les stratégies de gestion et les défis rencontrés. En comprenant ces aspects fondamentaux, nous sommes mieux équipés pour garantir la disponibilité et la fiabilité des équipements et des systèmes industriels. Ce chapitre nous fournit également une base solide pour aborder des sujets plus avancés, tels que la modélisation multicritère, qui nous permettront d'optimiser davantage les processus de maintenance et d'assurer une efficacité opérationnelle maximale.

Chapitre 2: LA MODELISATION MULTICRITERE

2. Introduction

Le terme "modélisation multicritère" désigne une approche utilisée pour prendre des décisions dans des situations où plusieurs critères doivent être pris en compte. Ce type de modélisation permet de représenter de manière plus complète la complexité des choix en tenant compte simultanément de plusieurs aspects ou objectifs. En utilisant des techniques et des outils appropriés, les décideurs peuvent évaluer différentes options en fonction de multiples critères et trouver des solutions qui optimisent ces critères de manière équilibrée.

Dans ce chapitre, nous aborderons les principes fondamentaux de la modélisation multicritère, tels que la définition des critères, la pondération, les méthodes d'agrégation, et les techniques de résolution des problèmes. Nous explorerons également les différentes approches, telles que l'analyse multicritère, les méthodes d'optimisation multicritère, et les outils logiciels disponibles pour soutenir ce processus décisionnel complexe. Enfin, nous discuterons des applications pratiques de la modélisation multicritère dans divers domaines, de la gestion des projets à l'évaluation des politiques publiques.

2.1 DEFINITION DE L'AIDE MULTICRITERE A LA DECISION

Différentes définitions ont été proposées pour l'aide multicritère à la décision. Nous reprenons ici [18] : "L'aide multicritère à la décision vise, comme son nom l'indique, à fournir à un décideur des outils lui permettant de progresser dans la résolution du problème de décision où plusieurs points de vue, souvent contradictoires, doivent être pris en compte".

Traditionnellement, l'activité de l'aide à la décision se base sur l'idée de l'existence d'une fonction objectif (ou un critère) bien définie et unique et qui s'impose aux yeux de tous pour caractériser la bonne direction dans laquelle il convenait de faire évoluer le système dont on s'intéressait.

L'argument réaliste [19] selon lequel la réalité étant multidimensionnelle, il est naturel que l'on prenne en compte plusieurs points de vue pour aider à la décision et donc qu'on utilise des méthodes multicritères, ne peut à lui seul justifier d'adopter une démarche multicritère pour aider à la décision. Utiliser un tel argument conduirait à voir le monocritère comme un cas limite et dégénéré du multicritère.

L'aide multicritère [19] à la décision œuvre à apporter un éclairage et des explications à une catégorie de problèmes où:

- Plusieurs critères quantitatifs et qualitatifs sont pris en considération; - Ces critères sont souvent hétérogènes;
- Ces critères sont généralement conflictuels; - Ces critères sont généralement considérés d'inégale importance.

2.2 PRINCIPE GENERAL D'ANALYSE MULTICRITERE A LA DECISION:

En toute généralité, lorsqu'on pose un problème multicritère, il s'agit de trouver la solution ou bien l'alternative la plus adéquate, compte tenu de la famille de critères adoptés. Cette solution peut se traduire en plusieurs formes selon le type de la problématique (choix, affectation, classement, ou voire même description) [18].

On peut alors opérer en six étapes :

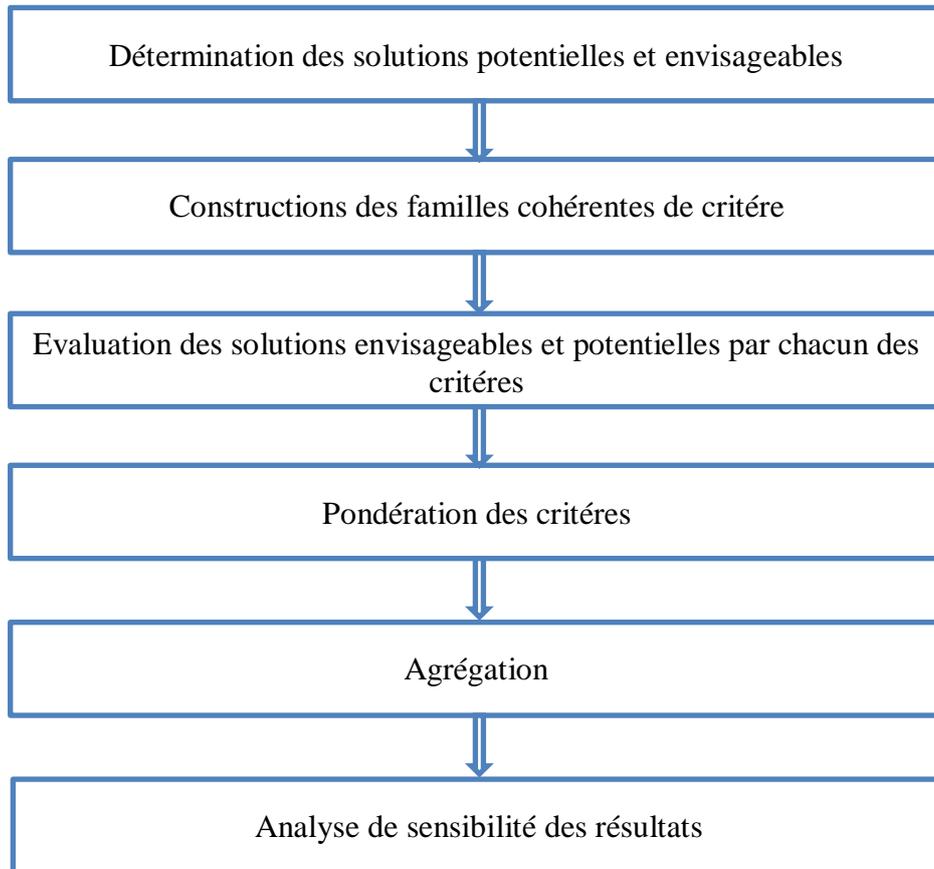


Figure 2.1 Principe générale d'analyse multicritère[18]

2.3 LES DIFFERENTES PROBLEMATIQUES MULTICRITERES :

La problématique peut être perçue comme étant une orientation de l'investigation qu'on adopte pour un problème de décision donné. Elle exprime les termes dans lesquels le décideur ou l'homme d'étude pose le problème et traduit le type de la prescription qu'il souhaite obtenir [19]. Les problématiques de décision se partagent généralement en quatre types, comme illustré dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2.1 Les différentes problématiques de décision [18]

Problématique	Objectif	Procédure d'investigation
P α (Problématique du choix à Alpha)	Sélectionner un sous ensemble aussi restreint que possible de A contenant les meilleures actions.	Sélection
P β (Problématique du tri à Bêta)	Affecter chaque action de A à une et une seule des catégories définies selon de normes préétablies.	Segmentation
P γ (Problématique du rangement à Gamma)	Ordonner les actions de A de la meilleure à la moins bonne.	Classement
P λ (Problématique de la description à Lambda)	Décrire les actions et leurs conséquences.	Cognitive

2.3.1 Problématique du choix à Alpha α

La problématique de choix P. α [20] consiste à sélectionner un sous-ensemble aussi restreint que possible de l'ensemble des actions A, contenant les meilleures actions. L'idéal est d'obtenir une seule et meilleure action. Mais en raison de la nature conflictuelle des critères, il est préférable de fournir au décideur quelques actions qui représentent différentes variantes de la "meilleure action". Évidemment, le résultat final peut être affiné en utilisant des informations supplémentaires ou avec une analyse plus approfondie. Exemple : choix d'un site pour une localisation industrielle où chaque site représente une action.

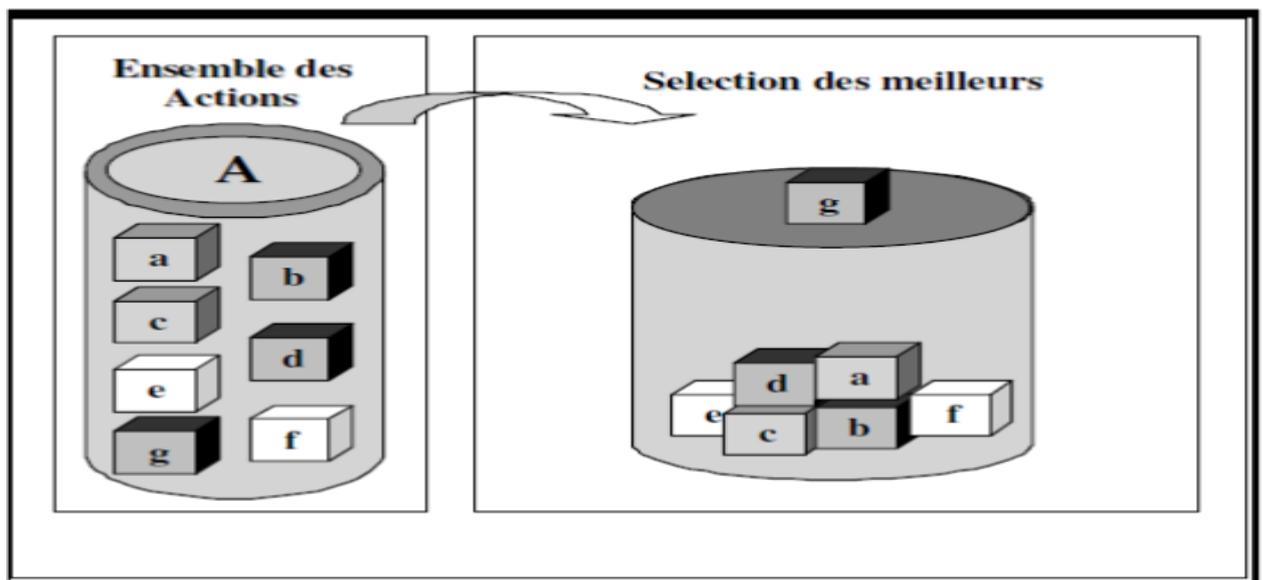


Figure 2.2 La problématique du choix à Alpha[18]

2.3.2 Problématique du tri à Bêta β

La problématique du tri [20], également appelée problématique Bêta, consiste à affecter chaque action potentielle à une catégorie. Les catégories sont généralement définies en fonction des valeurs observées des actions qu'elles doivent recevoir. Cette problématique vise à trouver un protocole d'affectation permettant de répartir les actions de A dans l'ensemble des catégories prédéfinies, c'est-à-dire à séparer les bonnes actions des moins bonnes [18]. Exemple : affecter différentes parcelles d'un territoire (donc chaque parcelle est une action) à un type d'utilisation particulier parmi différentes utilisations possibles.

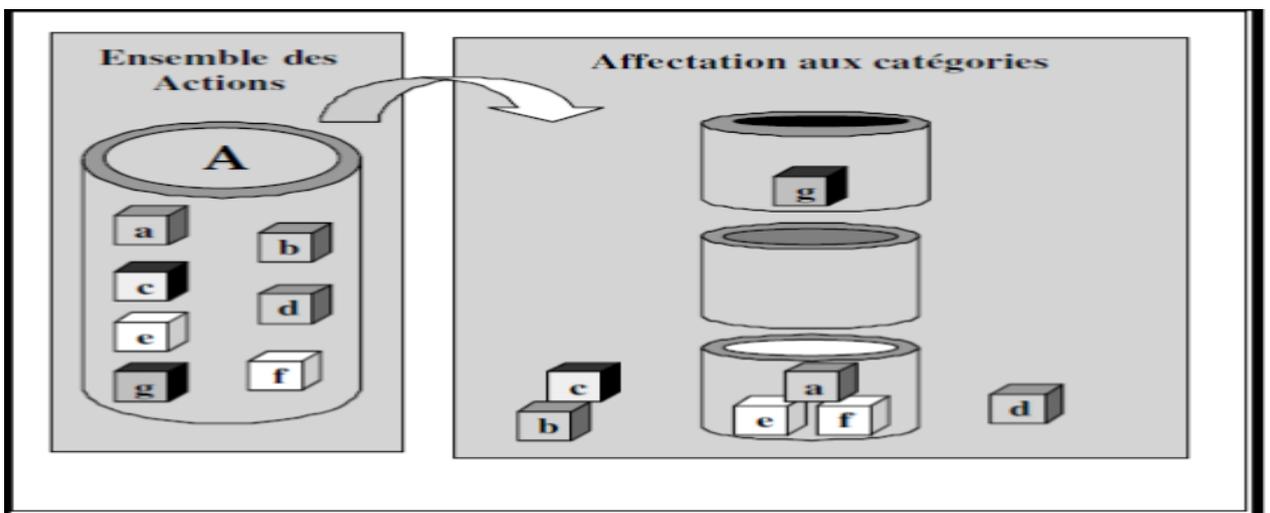


Figure 2.3 La problématique du tri [18]

2.3.3 Problématique du rangement à Gamma γ

La problématique du rangement (P. γ) [19] consiste à poser le problème en termes de classement des actions de A ou de certaines d'entre elles, c'est-à-dire à orienter l'investigation vers la mise en évidence d'un classement défini sur un sous-ensemble de A, conçu en vue de discriminer les actions se présentant comme "suffisamment satisfaisantes" en fonction d'un modèle de préférences, compte tenu du caractère révisable et/ou transitoire de A. Cette problématique prépare une forme de prescription ou de simple participation visant :

- Soit à indiquer un ordre partiel ou complet portant sur des classes regroupant des actions jugées équivalentes .
- Soit à proposer l'adoption d'une méthodologie fondée sur une procédure de classement (de tout ou partie de A) convenant à une éventuelle utilisation répétitive et/ou automatisée

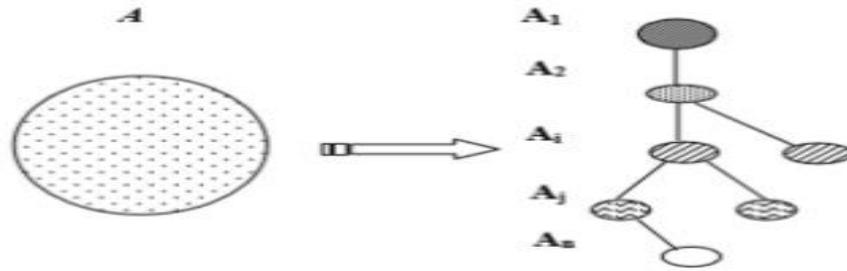


Figure 2.4 La problématique du rangement [19]

2.3.4 Problématique de la description à Lambda

La problématique Lambda [18] consiste à limiter le problème à une description des actions de l'ensemble A et/ou de leurs conséquences. Cela signifie orienter l'investigation vers la mise en évidence d'informations relatives aux actions potentielles, conçues pour aider directement le décideur à les découvrir, à les comprendre et à les évaluer, en tenant compte du caractère révisable et/ou transitoire de A. Cette approche prépare une forme de prescription ou de simple participation visant :

- Soit à présenter une description systématique et formalisée des actions et de leurs conséquences, qu'elles soient qualitatives ou quantitatives.
- Soit à proposer l'adoption d'une méthodologie basée sur une procédure cognitive adaptée à une éventuelle utilisation répétitive et/ou automatisée.

Nous pouvons illustrer les caractéristiques des quatre problématiques précédentes dans la Figure suivant

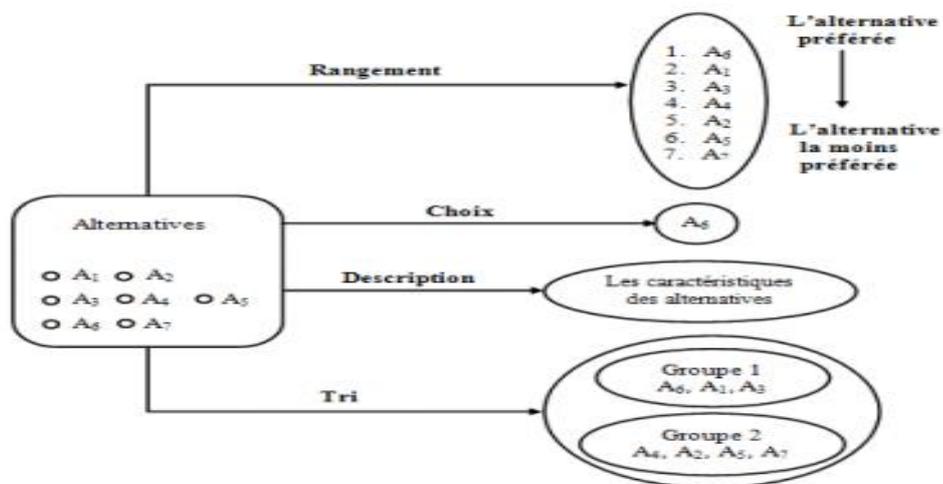


Figure 2.5 La différence entre les quatre problématiques de références [20]

2.4 APPROCHES MONOCRITERE ET MULTICRITERE

Les premières réflexions sur la décision ont été formulées par des penseurs et philosophes des siècles passés tels qu'Aristote, Platon, Thomas Aquinas, Benjamin Franklin, etc, qui ont déjà envisagé qu'une décision complexe était intrinsèquement liée à une pluralité de points de vue pouvant être grossièrement définis comme des critères. Cependant, pendant de nombreuses années, la seule façon d'exprimer un problème de décision était de le définir selon un critère unique (monocritère), ce qui réduisait les aspects multidimensionnels d'une situation de décision à une seule échelle [21].

2.4.1 Approche monocritère

L'approche monocritère [22], comme son nom l'indique, concerne les problèmes décisionnels où la prise de décision repose sur un seul critère. Selon Schärliig [23], cette approche appréhende les situations décisionnelles en ne considérant qu'une seule dimension ou aspect. Elle est fondée sur le principe de rationalité pure de la décision, qui vise à optimiser un critère unique donné, d'où son nom de monocritère. L'utilisation d'un seul critère permet d'élaborer des modèles généralement bien structurés et mathématiquement posés. D'après Roy [24] Cette approche repose sur l'idée qu'il existe au moins une décision, pouvant être démontrée comme optimale avec suffisamment de temps et de moyens, tout en restant neutre par rapport au processus de décision. L'optimisation est soutenue par trois contraintes : la globalité, la stabilité et la complète comparabilité transitive. Dans cette perspective, l'approche monocritère consiste à comparer les projets en se basant principalement sur un aspect, souvent la dimension économique. Les projets présentant les coûts les plus bas ou les meilleurs profits sont privilégiés dans cette approche. Cette discipline selon Zeleny [25] a connu divers développements au fil du temps et a vu son champ d'intérêt s'élargir progressivement. Initialement, elle est apparue pendant la Seconde Guerre mondiale en réponse aux préoccupations du moment, en se concentrant sur les problèmes tactiques de défense nationale. Par la suite, elle s'est intéressée à l'analyse des contextes industriels en mettant l'accent, sur l'efficience, définie comme l'accomplissement optimal d'une tâche en fonction d'un critère préétabli. Les concepts principaux de la recherche opérationnelle développés dans les années 1950 ont été de plus en plus affinés et appliqués dans les années 1960. Cependant, selon cet auteur, cela s'est révélé insuffisant pour répondre aux préoccupations des gestionnaires des années 1970, confrontés à des contextes décisionnels de plus en plus stratégiques et complexes.

2.4.2 Approche multicritère

L'approche multicritère [22] se distingue principalement par sa capacité à formaliser la préparation des décisions, améliorant ainsi la transparence du processus décisionnel. Elle permet de définir, de préciser et de mettre en évidence la responsabilité du décideur dès lors qu'il tient compte de la complexité de la réalité et se base sur plusieurs critères. Vink [26] souligne que l'analyse multicritère vise à accompagner le décideur en élaborant des outils qui rendent compte de la multiplicité des aspects relatifs à ce contexte. En d'autres termes, l'approche multicritère aide le décideur, tout en tenant compte des contraintes de l'environnement, à rechercher le compromis le plus satisfaisant entre plusieurs objectifs. D'après Aouni [27] Le décideur devient la pierre angulaire des modèles développés en aide multicritère à la décision. Ainsi, l'aide à la décision multicritère est étroitement liée à la façon dont les humains prennent des décisions. Malgré la diversité des approches, méthodes et techniques, les éléments de base de l'aide à la décision multicritère sont simples : un ensemble fini (ou infini dans le cas continu) de mesures (alternatives, actions ou solutions potentielles), au moins deux critères, des objectifs et, bien sûr, au moins un décideur. En considération de ces éléments, l'aide à la décision multicritère contribue à la prise de décisions, notamment en termes de choix, de classification ou de tri des alternatives ou actions potentielles [21].

2.5 TERMINOLOGIE ET CONCEPTS ASSOCIES A LA MODELISATION MULTICRITERE

Dans cette section, nous rappelons la terminologie couramment utilisée dans la littérature de la théorie de la décision multicritère. Les termes essentiels permettant de décrire un problème de décision sont les alternatives, les objectifs, les attributs, les critères, le décideur et l'analyste [18].

2.5.1 Le décideur

Un décideur [22] est un individu (ou un groupe d'individus) qui, face à une situation de décision, a la responsabilité d'évaluer les différentes alternatives possibles et de proposer ou de mettre en œuvre une solution (ou des solutions).

Le rôle du décideur

Une des tâches importantes du décideur est de formuler ses jugements personnels, de s'en convaincre lui-même, et de prendre des décisions. Nous appelons ce rôle l'auto-conviction. Cette tâche d'auto-conviction peut se faire de manière totalement intuitive ou à l'aide d'une analyse plus formelle et structurée [28].

Le décideur peut recourir à une analyse formelle pour différentes raisons :

- Pour des raisons de confort psychologique (la sécurité d'avoir une analyse formelle pour corroborer son intuition).
- Utiliser cette analyse comme structure ou protocole de communication.
- Il peut être amené à justifier ses conclusions auprès d'autres personnes ou à les convaincre.
- Du bien-fondé de sa proposition. Dans ce cas, le décideur joue le rôle d'avocat de ses opinions.
- Cette analyse peut l'aider à réconcilier les différents points de vue.

2.5.2 L'analyste

L'analyste [29], également appelé homme d'étude en français, est chargé de définir le modèle de décision, de conduire le processus de décision et de présenter les résultats au décideur. Ses activités comprennent la formulation et l'analyse qualitative et quantitative du problème. L'interaction entre l'analyste et le décideur est une caractéristique essentielle du processus de décision, et son niveau dépend généralement du niveau de connaissance du décideur, de sa volonté de participer au processus, de la règle de décision à appliquer et de la nature du problème.

2.5.3 Les alternatives

L'ensemble des alternatives [28] désigne l'ensemble des scénarios, des candidats, des sites, etc., sur lesquels porte la décision. L'identification de cet ensemble de solutions réalisables est une tâche primordiale dans la définition du problème.

Cet ensemble peut être défini de deux façons:

- Explicitement par un ensemble fini d'alternatives de cardinal relativement faible.
- Implicitement par un ensemble de propriétés ou de conditions que les alternatives doivent vérifier (c'est le cas d'un ensemble d'alternatives spécifié par ses variables de décision vérifiant un système de contraintes explicites).

2.5.4 Les objectifs

Un objectif [28] indique le sens de l'amélioration qu'un décideur souhaite apporter à un système lors d'un changement d'état. Il reflète l'aspiration du décideur. Les trois manières de poursuivre un objectif sont de le maximiser, de le minimiser ou de le maintenir dans un certain

état. Des exemples industriels classiques de ces situations sont : maximiser le profit, minimiser le coût ou maintenir un équilibre économique.

Des auteurs ajoutent à ces situations d'autres types d'objectifs comme : près d'une cible (but), plus grand ou plus petit qu'un certain seuil, dans un intervalle, etc.

2.5.5 Les critères

Un critère [20] est une expression qualitative ou quantitative permettant de juger des personnes, des objets ou des événements. Pour qu'une expression puisse devenir un critère, elle doit être utile pour le problème considéré et fiable. Selon le dictionnaire Robert, le mot critère désigne couramment « ce qui sert de base à un jugement ». C'est dans ce sens que le mot critère est habituellement utilisé en recherche opérationnelle et en théorie de la décision. Les jugements qu'il doit permettre d'établir sont essentiellement des jugements de préférences en relation avec la décision. Un critère est doté d'un indicateur permettant de le calculer, d'une unité, d'une structure de préférence et d'une échelle, en valeurs ordinales ou cardinales. Nous notons C_j le critère numéro j et l'ensemble des critères $C = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$ avec m le nombre de critères pris en compte.

L'évaluation d'un critère prend en compte sa relative importance par rapport aux autres critères. Cette importance est généralement exprimée par un coefficient de pondération, noté w_j (poids du critère j). La notion d'importance relative, bien qu'intuitivement claire, manque souvent de définition précise, et les poids attribués peuvent varier selon la méthode multicritère choisie. En effet, les poids ne possèdent pas la même signification d'une méthode à l'autre [20].

2.5.6 Les contraintes

Les contraintes [5] sont des conditions essentielles qui limitent l'objectif de maximisation ou de minimisation, garantissant ainsi l'admissibilité des actions sur un critère donné, telles que le budget ou le délai. Elles sont généralement introduites pour garantir la conformité avec les lois et les règlements applicables, ou en fonction des besoins du décideur et des ressources disponibles pour la mise en œuvre pratique de la décision.

2.5.7 Un système d'aide à la décision (SAD)

Un système d'aide à la décision (SAD) [30], également connu sous le nom de système d'aide à la décision (DSS : Decision Support System), est un outil qui aide au traitement de l'information et à la prise de décision. En général, il extrait et fournit les informations nécessaires

au processus décisionnel, tout en agissant comme un résolveur de problèmes. En somme, un SAD est un système informatique qui facilite le processus de prise de décision en regroupant divers outils informatiques (matériels et logiciels).

Le système d'aide à la décision (SAD) fonctionne en extrayant les données pertinentes de diverses sources, en les stockant dans un entrepôt centralisé, et en répondant aux requêtes des décideurs sur des thèmes, des métiers ou des analyses spécifiques. Pour ce faire, trois types d'outils sont utilisés [30]:

1- Outils ETL (Extract, Transform, Load) : ils extraient les données des différentes sources, telles que les bases de données de l'entreprise ou les sources externes, afin d'alimenter et de mettre à jour l'entrepôt de données. Ces données, qui peuvent être hétérogènes et réparties, sont transformées en données décisionnelles, puis intégrées et chargées dans l'entrepôt.

2- Outils de stockage : ils doivent gérer efficacement de grandes quantités de données (intégration de données) et définir des sous-ensembles de données adaptés à différentes catégories de décideurs.

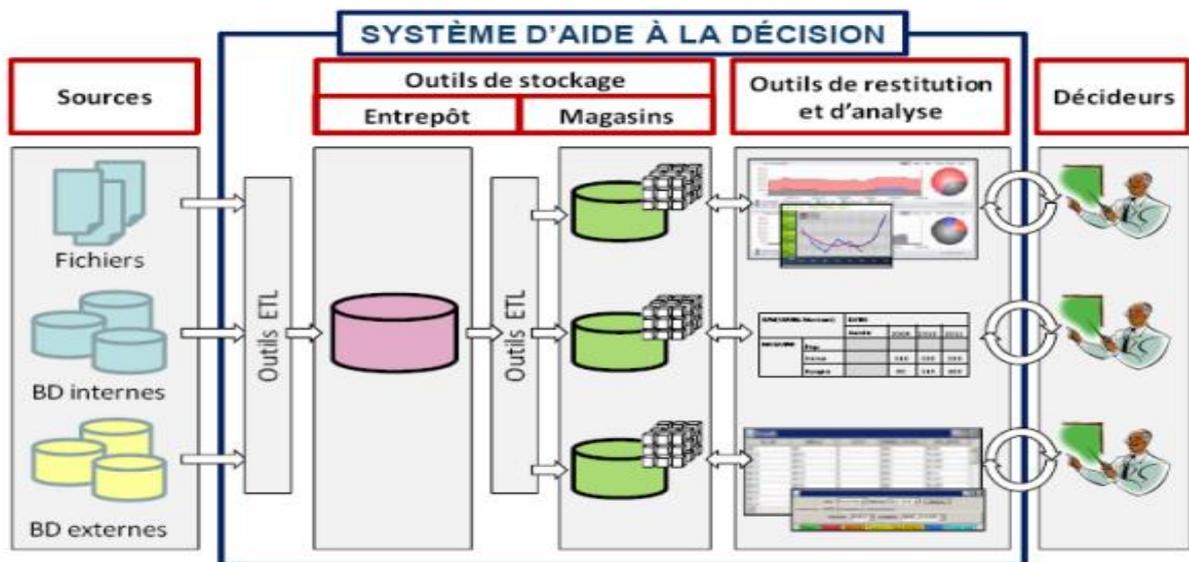


Figure 2.6 Architecture d'un SAD[30]

3- Outils de restitution et d'analyse de données décisionnelles sous une forme adaptée aux décideurs.

2.6 LA MATRICE DE PERFORMANCES

Une matrice de performance [31], dite aussi matrice d'évaluation, de décision ou tableau de performance, comme son nom l'indique, est une matrice où chaque ligne représente une action et chaque colonne un critère. L'intersection d'une ligne i avec une colonne j représente le jugement de l'action par rapport au critère j (performance). Le tableau 2.2 illustre la structure de la matrice de performances.

- Des actions ou alternatives (A) : $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$, n désigne le nombre d'alternatives.
- Des critères (C) : $C = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_m\}$, m : désigne le nombre des critères les S_{ij} ($i=1, m ; j=1, n$) sont des performances.

Tableau 2.2 Structure d'une matrice de performances[31]

Critères	Actions (Alternatives)				
	a1	a2	a3	-	an
C1	S11	-	-	-	S1n
C2	S21	-	-	-	S2n
...	-	-	-	-	-
Cn	Sm1	Sm2	Sm3	-	Smn

2.7 FONDEMENT METHODOLOGIQUE

2.7.1 Procédure d'agrégation multicritère (PAMC)

La procédure d'agrégation multicritère [5] est définie comme une règle ou un procédé exécutif qui cherche à exploiter la matrice de décision et les informations fournies sur le problème (objectifs, contraintes, préférences, exigences ...), pour construire une ou plusieurs structures de préférences sur un ensemble de solutions potentielles. Il convient de mentionner que certaines littératures confondent ce concept avec la notion de la méthode multicritère, alors qu'elle en fait partie, pratiquement. Une PAMC peut être vue comme un algorithme qui sert à incorporer mathématiquement les évaluations locales (par critère) des alternatives pour calculer leurs scores globaux.

2.7.2 Les MMC (méthodes multicritère)

Les méthodes multicritères se distinguent par la manière dont elles comparent les solutions, étape nommée agrégation des performances dans le domaine de l'aide à la décision.

Trois démarches d'agrégation sont différenciées : Agrégation complète, Agrégation partielle et Agrégation locale [31].

2.7.3 Agrégation complète

L'agrégation complète [31] est aussi appelée "approche du critère unique de synthèse évacuant toute incomparabilité". Il s'agit d'évacuer toute situation d'incomparabilité et d'introduire toutes les performances dans une seule fonction d'agrégation ou d'utilité (le modèle de préférences s'exprime à travers une fonction unique), en leur attribuant d'éventuels poids. Ce qui conduit à une compensation totale entre les critères ainsi qu'à une transitivité complète. La complète transitivité, la compensation entre critères et les difficultés liées au choix de la fonction d'agrégation (obligation d'y intégrer toutes les préférences des décideurs à part les poids) sont considérées comme des inconvénients de cette approche, ayant une gravité changeante selon la situation et la problématique traitée .

Les principales méthodes appartenant à cette approche sont : la Multi Attribute Utility Theory (MAUT), les Utilités additives (UTA), l'Analytic Hierarchy Process (AHP), la technique de Goal Programming, etc.

2.7.4 Agrégation partielle

Cette approche [31] se base sur une comparaison par paire des alternatives. Pour chaque paire, il est vérifié si une action surclasse l'autre selon des règles préétablies (relation de surclassement). Soient a et b deux alternatives, a surclasse b est équivalent à "a est au moins aussi bonne que b sur une majorité de critères sans être nettement mauvaise sur les autres" . Les principales méthodes ou familles de méthodes appartenant à cette approche sont : la famille ELECTRE (Elimination Et choix Traduisant la Réalité), la famille PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation), ORESTE, QUALIFLEX, etc. Les principaux avantages de ces méthodes résident dans leur capacité à traiter simultanément des critères qualitatifs et quantitatifs, ainsi que dans leur capacité à gérer des unités de critères très hétérogènes pour lesquelles un codage en une échelle commune est difficile ou artificiel. De plus, ces méthodes prennent en compte les seuils de préférences et de veto. Leurs inconvénients résident dans le fait que cette approche se résume dans la forme du résultat et dans le nombre important de comparaisons entre les actions (pour n actions, il faut effectuer n fois (n - 1) comparaisons) .

2.7.5 Agrégation locale

L'agrégation locale [31] s'applique aux problèmes où l'ensemble des alternatives est très grand. Cette méthode sélectionne dans un premier temps une solution de départ considérée comme "bonne", puis explore localement l'espace des alternatives autour de cette solution pour déterminer s'il en existe de meilleures. L'exploration complète de l'ensemble des alternatives est obtenue par itération du processus. Toutefois, cette technique est peu adaptée aux problématiques de classement des solutions. Les principales méthodes appartenant à cette troisième approche sont : STEM, Point de mire évolutive, cône d'amélioration. Dans le contexte de notre étude, nous nous intéressons aux méthodes d'agrégation partielle ou de surclassement, et pour cela, nous donnons dans ce qui suit un aperçu sur les méthodes des deux familles les plus connues, à savoir : PROMETHEE et ELECTRE.

2.7.6 Methodes d'agregation complete

Présentation de la méthode AHP

La méthode AHP (Processus d'Analyse Hiérarchique) [31] est une méthode multicritères, procédant par agrégation totale, qui permet de résoudre la problématique de rangement afin de classer l'ensemble des actions potentielles de la meilleure vers la moins bonne action.

- Le principe de la décomposition est appliqué pour structurer un problème complexe en une hiérarchie de critères, sous-critères, sous-sous critères ainsi de suite.
- Le principe de la comparaison des jugements est utilisé pour construire des comparaisons par paire de toutes les combinaisons d'éléments du même niveau En respectant le père de chaque niveau.
- Le principe de la synthèse des propriétés est de multiplier les priorités locales de chaque niveau par les priorités globales du niveau père pour obtenir les priorités globales de toute la hiérarchie par la suite on ajoute les priorités globales du niveau le plus bas (généralement Ce sont les alternatives).

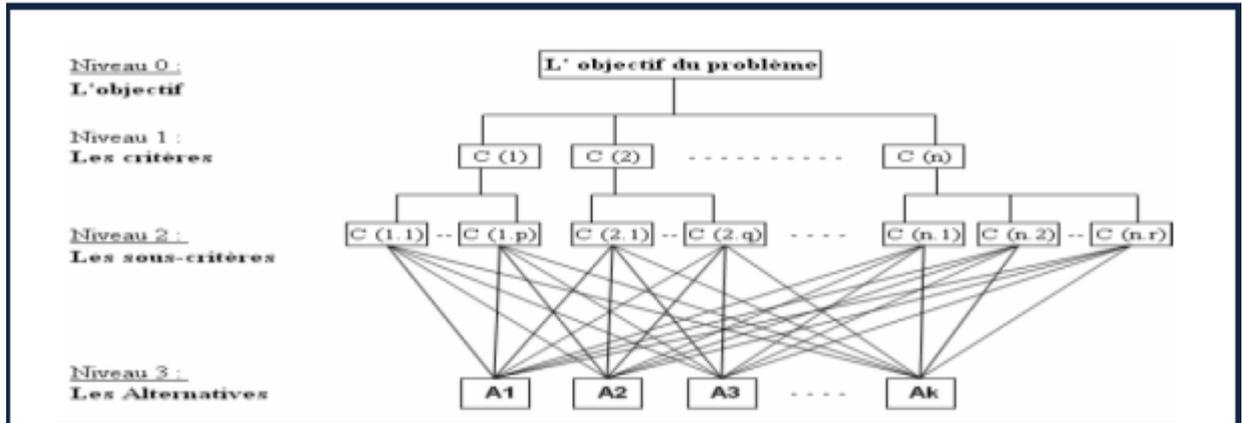


Figure 2.7 La structure hiérarchique[32]

Technique for order preference by similar to ideal solution (TOPSIS)

La méthode TOPSIS [32] est une méthode de prise de décision multicritère développée par HWANG et YOON en 1981. 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. Pour illustrer le fait que TOPSIS considère à la fois la distance à l'idéale et à l'anti idéale, il suffit d'examiner la figure si dessous :

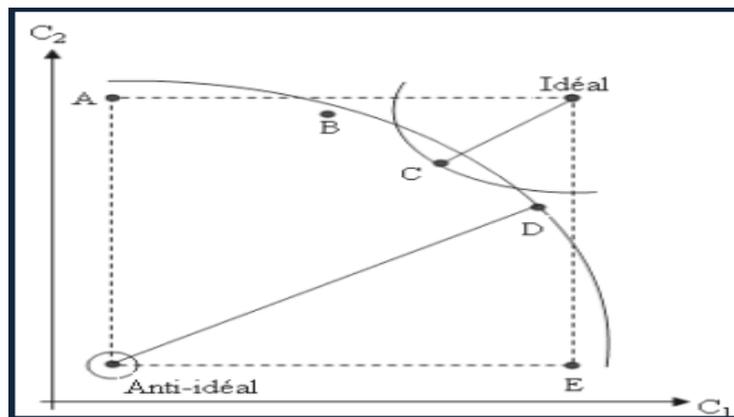


Figure 2.8 Illustration des distances à l'idéal et à l'anti-idéal [32]

Sur cette figure, les alternatives A, B, C, D, E sont représentées avec deux critères C1 et C2, ainsi que les points idéal et anti-idéal. En utilisant la distance euclidienne habituelle avec des poids égaux, on observe que C est le point le plus proche de l'idéal, tandis que D est le plus éloigné de l'anti-idéal. TOPSIS résout ce dilemme du choix entre l'idéal et l'anti-idéal en

calculant pour chaque alternative les distances pondérées à l'idéal et à l'anti-idéal. L'ordre de préférence des alternatives peut être déterminé par des comparaisons basées sur ces distances relatives.

Un critère de nature "entrée" ou "coût" préfère les éléments ayant les valeurs minimales. À l'inverse, un critère de nature "sortie" ou "bénéfice" favorise les éléments ayant les valeurs maximales. Un critère est qualifié d' "objectif" lorsqu'il peut être quantifié par des valeurs numériques pour chaque alternative considérée. En revanche, un critère est dit "subjectif" lorsqu'il ne peut pas être quantifié de manière numérique.

2.7.7 Methodes d'agregation partielle

Les méthodes PROMETHEE

La famille de méthodes PROMETHEE [5] fait partie des méthodes de surclassement consistant à enrichir l'ordre de dominance. Elle a subi plusieurs modifications en conséquence de la recherche et le développement continu, donnant naissance à plusieurs versions :

- PROMETHEE I - fournit une agrégation partielle et s'applique à la problématique de choix.
- PROMETHEE II - fournit une agrégation complète et s'applique à la problématique rangement.
- PROMETHEE III - élargit la notion d'indifférence et fournit un ordre d'intervalle.
- PROMETHEE IV - fournit une agrégation complète. C'est une extension naturelle de PROMETHEE II associé au cas d'un ensemble continu d'actions A.
- PROMETHEE V - fournit une agrégation complète ou partielle. C'est une extension de PROMETHEE I et II pour le cas où un sous-ensemble d'alternatives doit être sélectionné, sous un ensemble de contraintes.
- PROMETHEE VI - est une extension des résultats de PROMETHEE I et II qui donnent au décideur la liberté de penser aux poids comme des intervalles plutôt que des valeurs exactes.
- PROMETHEE-GAIA - est une procédure visuelle et interactive qui exploite les résultats de PROMETHEE I et II pour fournir au décideur une vue globale du problème de décision.
- PROMETHEE TRI - est une extension adaptée pour les problèmes de tri.

- PROMETHEE CLUSTER - est une extension adaptée pour les problèmes de classification nominale.

Bien que ces variantes diffèrent en termes de cas d'application et de la démarche d'agrégation adoptée, elles partagent toutes le même fondement de base originant des deux premières versions.

Celui-ci repose sur trois phases principales :

1. Construction de critères généralisés : cela se fait à travers la définition d'une fonction mathématique, par critère, exprimant le degré de préférence entre chaque couple d'actions. Cette fonction est définie à partir du sens d'optimisation du critère (c.-à-d. critère à minimiser ou à maximiser) et de la forme du type de critère.

2. Détermination d'une relation de surclassement entre les alternatives : cela signifie la définition d'un indice de préférence multicritère à partir des fonctions de préférence résultantes de la phase précédente.

3. Évaluation de cette relation afin de donner une réponse : c.-à-d. la synthèse des résultats sous forme de flux de préférence permettant de prioriser les alternatives.

Les méthodes Élimination Et Choix Traduisant la Réalité ELECTRE

Ces méthodes ont initié toute une série de méthodes appelées méthodes de classement [32], basées sur des comparaisons d'actions deux à deux. Celles-ci demandent peu d'information pour pouvoir être implémentée, 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 surclassement. Pour chaque couple d'actions (aj,ak), On détermine un degré de crédibilité du surclassement S(aj,ak). 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 terme 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.

2.7.8 Methodes d'agregation locales

La méthode de Goal Programing (GP)

Le Goal Programing [5] est une extension de programmation linéaire qui est capable de gérer des objectifs multiples et contradictoires, où il s'agit de minimiser en continu les déviations par rapport au but fixé pour chaque objectif. Ces déviations prennent des valeurs négatives (δ_j^-) lorsque le but fixé sur le critère j n'est pas encore atteint, et des valeurs positives (δ_j^+) lorsqu'il est dépassé, ce qui signifie qu'une solution de base ne peut pas être en dessus et en dessous du but

fixé, simultanément. Cela est formulé mathématiquement comme suit :

$$\min_{x \in A} \sum_{j=1}^n (\delta_j^+ + \delta_j^-) \quad (2.1)$$

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

$$gj(x) - \delta_j^+ + \delta_j^- = bj, \quad j = 1, 2, \dots, n$$

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

Où :

b_j représente le but fixé sur le critère j.

$g_j(x)$ représente l'évaluation de la solution x par rapport au critère j .

$Cl(x)$ représente le système de contraintes associées au problème.

Il est possible de personnaliser le modèle GP en associant respectivement les poids w_j^+ et w_j^- aux écarts de déviation positifs (δ_j^+) et négatifs (δ_j^-). Dans ce cas, on a affaire au Goal Programming pondéré ; noté WGP (Weighted Goal Programming). Le GP standard peut être considéré comme un cas particulier de WGP dans lequel $w_j^+ = w_j^- = 1$.

La méthode de Compromise Programming (CP)

Comme son appellation l'indique [5], Le Compromise Programming consiste à chercher une solution compromise en minimisant, sur chaque critère, les écarts par rapport à la solution idéale (la meilleur). Cela s'exprime mathématiquement comme suit :

$$\min_{x \in A} \left[\sum_{j=1}^n \alpha_j^r \left[\frac{g_j(\check{x}) - g_j(x)}{g_j(\check{x}) - g_j(\underline{x})} \right]^r \right]^{\frac{1}{r}} \quad (2.2)$$

Où :

$g_j(x^*)$ représente l'évaluation de la solution idéale (la meilleure) sur le critère j .

$g_j(x^*)$ représente l'évaluation de la solution anti-idéale (la moins bonne) sur le critère j .

α_j représente le coefficient d'importance du critère j (poids) et r la racine.

2.8 PROCESSUS D'ANALYSE MULTICRITERE DE LA DECISION

Le processus de décision [5] est un plan de travail qui permet de sélectionner une action à partir d'un ensemble d'alternatives, d'une manière systématique et logique. Pour des fins d'illustration, nous adoptons la représentation de Guitouni , qui est très explicite en ce qui concerne le déroulement de ce processus.

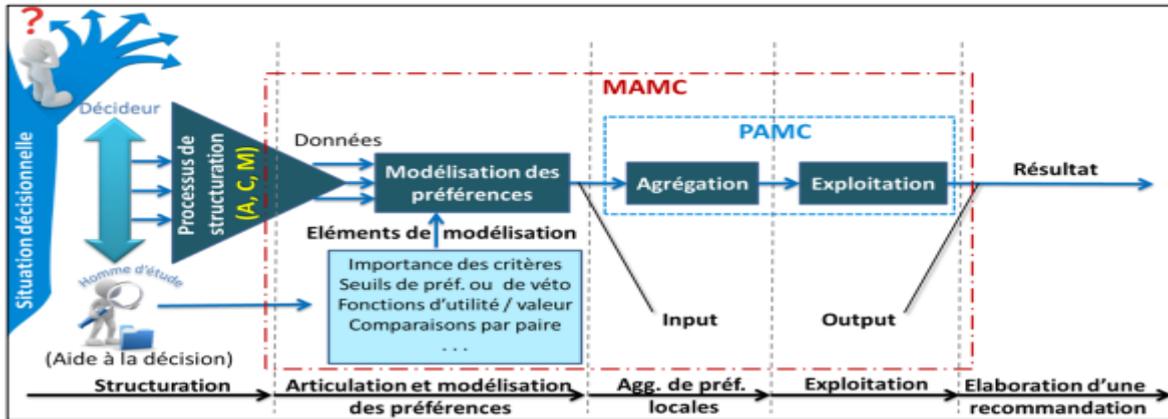


Figure 2.9 Représentation du processus de décision[5]

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

1. 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.

2. Articulation et modélisation des préférences : Il s'agit d'enrichir la structure de base précédemment obtenue, en introduisant les éléments de modélisation qui caractérise 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

2.9 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons exploré en profondeur les principes fondamentaux de la modélisation multicritère. En simplifiant un processus souvent complexe, nous avons décrit chaque étape de manière accessible, visant à faciliter son application au sein des opérations de maintenance. En outre, nous avons examiné de près les principales méthodes applicables dans ce contexte, jetant ainsi les bases nécessaires au déploiement efficace de notre contribution à l'optimisation des pratiques de maintenance.

Chapitre 3: Implémentation de la modélisation multicritère pour l'optimisation de la maintenance

3. INTRODUCTION

Dans ce chapitre dédié à l'implémentation de la modélisation multicritère pour l'optimisation de la maintenance, nous nous aventurons dans un domaine d'une richesse conceptuelle et pratique remarquable. La modélisation multicritère offre une approche holistique, prenant en compte une multitude de paramètres et de contraintes, afin de parvenir à des décisions éclairées et équilibrées. À travers une analyse minutieuse et approfondie, nous explorerons les tenants et aboutissants de cette méthodologie complexe, en mettant en lumière ses applications pratiques dans le domaine de la maintenance industrielle, en particulier, dans le déploiement des stratégies de maintenance. Nous aborderons également les défis et les opportunités liés à son implémentation, en mettant en évidence son apport à travers une étude de cas.

3.1 TRAVAIL CIBLE: CONTEXTE, MOTIVATIONS ET OBJECTIFS

3.1.1 Contexte :

Dans le contexte industriel actuel, où la compétitivité et l'efficacité opérationnelle sont des enjeux cruciaux, la maintenance des équipements est essentielle pour garantir leur disponibilité et leur fiabilité. La diversité des stratégies de maintenance - systématique, prédictive et conditionnelle - exige une sélection judicieuse pour maximiser la performance opérationnelle tout en minimisant les coûts. Ainsi, le but de ce travail est d'élaborer une approche optimisée pour l'affectation des stratégies de maintenance aux équipements industriels.

3.1.2 Motivations :

Comme toute approche visant à optimiser les stratégies de maintenance, les motivations de ce travail se présentent comme suit :

- Réduction des coûts : Une maintenance inefficace peut entraîner des coûts élevés liés aux réparations d'urgence, aux arrêts de production imprévus et à une utilisation inefficace des ressources. D'où, l'importance de la sélection appropriées des stratégies de maintenance.

- Prolongation de la durée de vie des actifs : En adoptant des stratégies de maintenance appropriées, il est possible de prolonger la durée de vie des équipements et accroître leur fiabilité.
- Optimisation de l'allocation des ressources : Le choix des stratégies de maintenance convenablement permet de planifier les activités de maintenance de manière efficace. Ainsi, les entreprises peuvent optimiser l'utilisation des ressources humaines, matérielles et financières.
- Amélioration de la satisfaction client : En minimisant les temps d'arrêt et en garantissant la qualité et la fiabilité des produits ou services fournis. Cela s'avère fortement liée au choix d'une stratégie adéquate de maintenance.
- Conformité réglementaire : Certaines industries sont soumises à des réglementations strictes en matière de maintenance et de sécurité, ce qui peut être assuré par la bonne stratégie de maintenance

3.1.3 Objectifs :

A la lumière de ce que précède, ils s'avèrent clairement que les objectifs indirectes de ce travail, à travers l'optimisation des stratégies de maintenance, sont : d'améliorer l'efficacité des opérations de maintenance, de réduire les coûts opérationnels, de minimiser les temps d'arrêt imprévus, et de prolonger la durée de vie des équipements. Cependant, la sélection des stratégies de maintenance, comme toute action agissant sur le matériel, dépend des ressources disponibles et des priorités identifiées. Ainsi les objectifs directs de cette étude sont définis comme suit :

- Quantification de la criticité des équipements, en tant facteur clé dans le pilotage de la politique globale de la maintenance et l'identification de ses priorités.
- Exploitation de la criticité, quantifiée au préalable, dans l'affectation des stratégies de maintenance.
- La prise en compte du facteur « Cout », étant donné que la mise en œuvre de chaque stratégie entraîne des couts plus ou moins importantes par rapport aux autres.

Les défis :

Compte tenu des objectifs fixés, les défis obstruant l'arrivée au but de notre étude se révèlent comme suit :

- Le facteur de « Criticité » est un facteur intangible qui peut être interprété de plusieurs perspectives souvent conflictuels. Ainsi, il demeure assez difficile à quantifier.
- L'incorporation de la relation entre la criticité et les stratégies de maintenance dans un modèle d'optimisation continue est relativement complexe.
- La fonction maintenance est généralement assez limitée en termes de ressources et notamment de budget, ce qui complique de plus la sélection des stratégies car elles doivent être à la fois efficaces, rentables et surtout réalisables dans la limite du budget disponible.

3.2 PRESENTATION DU CAS D'ETUDE :

Notre travail est basé sur l'étude de Evren can ozcan , dans laquelle les auteurs ont utilisé la méthode TOPSIS pour la priorisation d'équipements les plus critiques dans une installation hydroélectrique, conduisant à la hiérarchisation de 9 équipements critiques à partir d'un ensemble plus de 1400 équipements. Ensuite, une approche hybride AHP-GP a été menée sur les équipements identifiés pour assurer une sélection rigoureuse des stratégies de maintenance. La disposition des neuf équipements ciblés par cette approche est présentée d'une manière simplifiée comme suit :

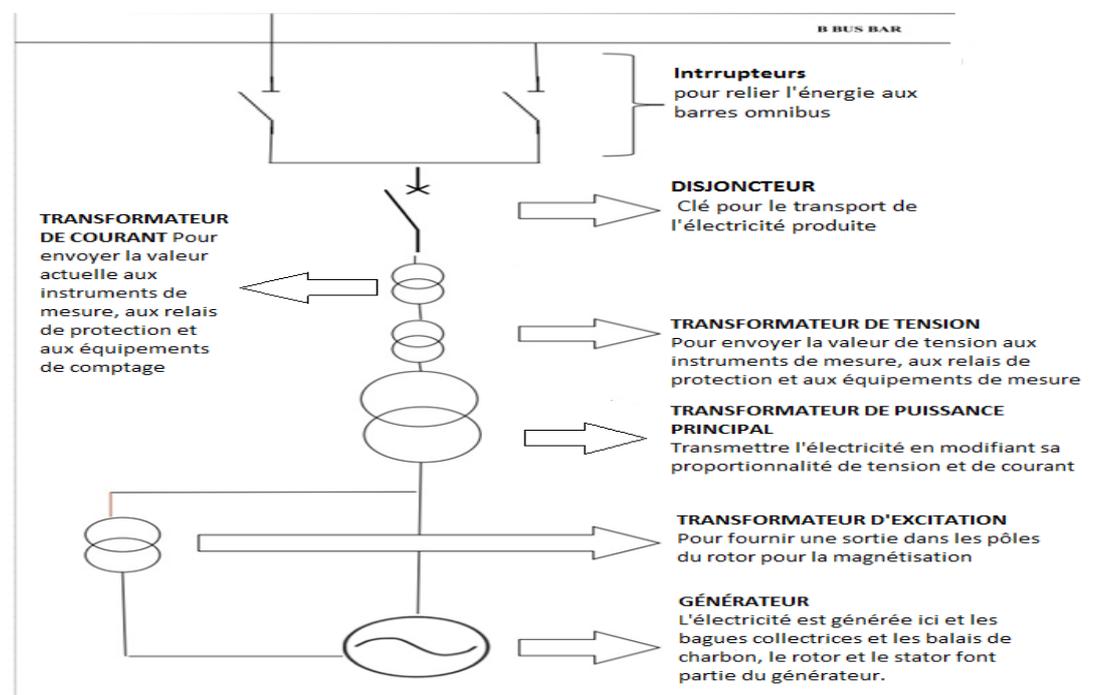


Figure 3.1 une représentation schématique des relations entre les équipements sélectionnés[37]

L'importance d'optimisation de la maintenance dans un tel cas réside dans la nécessité d'assurer la continuité de production pour pouvoir répondre à la demande d'énergie de plus en plus croissante en raison de l'augmentation de la population, de l'industrialisation en constante expansion et de développement continu. La production d'énergie ininterrompue dans ces centrales est donc d'une grande importance pour la sécurité de l'approvisionnement en énergie. Ainsi, les activités de maintenance à mener dans les centrales hydroélectriques doivent être gérées dans le cadre d'un système bien conçu pour une production d'électricité économique, efficace et surtout stable, d'où la nécessité de l'optimisation. Dans cette logique, nous proposons nous-même une approche hybride dans ce travail, combinant les deux méthodes TOPSIS et MILP pour l'affectation des stratégies optimales aux équipements de la centrale. Cette approche sera mise en œuvre sur la même sélection d'équipement adoptée dans [37], permettant ainsi de comparer et valider les résultats obtenus.

3.2.1 Critères retenus

En effet, l'objectif principal de l'emploi de la méthode TOPSIS dans ce travail est de quantifier la criticité des équipements en se basant sur une vision multicritère, vu qu'il s'agit d'un facteur intangible qui peut être traduit de plusieurs points de vue, souvent conflictuels. Ainsi, 3 critères principaux ont été retenus dans notre étude pour sa quantification :

- **La fiabilité** : Le critère de fiabilité évalue la capacité d'un produit, d'un système ou d'un service à fonctionner de manière constante et sans défaillance dans des conditions spécifiques pendant une période donnée.
- **La production** : Le critère de production évalue l'efficacité et l'efficacité du processus de fabrication d'un produit ou d'un service. Il englobe plusieurs aspects, notamment la quantité produite, la qualité des produits, et la capacité de l'entreprise à répondre à la demande du marché.
- **Le coût** : Le critère de coût se réfère à l'ensemble des dépenses engagées pour produire un bien ou un service. Il est essentiel pour évaluer la rentabilité d'une entreprise et optimiser ses opérations.

Le choix s'est porté sur ces critères, compte tenu qu'ils constituent des facteurs fondamentaux dans toute industrie ; d'autant plus que les données requises pour leur modélisation sont souvent disponibles dans l'historique industriel. Leur agrégation par la méthode TOPSIS résultera des scores de criticité qui seront effectivement incorporés dans le modèle MILP pour l'affectation des stratégies de maintenance aux équipements tout en

introduisant la contrainte budgétaire pour ajuster les stratégies en fonction des ressources disponibles.

3.2.2 Données utilisées

La quantification de la criticité suivant les critères présentés dans la sous-section précédente repose sur des données d'historique reflétant le comportement des équipements sur ces aspects. Ces données sont issues principalement de l'étude de Evren can ozcan. Pour le critère cout, le cout annuel global de maintenance (en euros, sans inclusion des pertes de production) a été choisi comme indicateur. Pour le critère production, la contribution dans la production perdue (en pourcentage %) sur une durée d'une année a été choisi comme indicateur. Pour le critère fiabilité, et vu que la source des données ne couvre pas cet aspect, nous avons dû estimer les taux de défaillances annuel du matériel en se basant sur les réfs [33-36] et les convertir en % de pannes annuelles par la suite. Bien que la disponibilité de données d'historique aurait assurer un degré de confiance plus élevé, on considère que ces estimations sont relativement acceptables, étant donné qu'il s'agit d'équipements d'installations électriques, qui sont généralement soumis à des conditions et des charges de sollicitation assez similaire sur le plan opérationnel, un peu partout.

En ce qui concerne les couts de mise en œuvre des différentes stratégies de maintenance, nécessaires pour évaluer leur impact économique sur le budget disponible, ils ont été relevés directement de l'étude [37] et convertis en euros (à l'origine fournis en livres turques), une monnaie plus courante à l'échelle nationale et internationale qui permet une valorisation plus envisageable. Ainsi, Le récapitulatif des données extraites se présente à travers les tableaux 3.1 et 3.2 ci-dessous.

Tableau 3.1 : Les données relatives à la criticité

	MATERIEL	FIABILITE	PRODUCTION	COUT
E1	Disjoncteur de jeu de barres de 380 kV	0.10869565	0.34983498	1006.459
E2	Disjoncteur de poste de 380 kV	0.2173913	0.13861386	712.1884
E3	Transformateur de courant de poste de 380 kV	0.10869565	0.052805281	340.76
E4	Transformateur de tension de poste de 380 kV	0.10869565	0.052805281	340.76
E5	Transformateur d'excitation	0.10869565	0.052805281	584.16
E6	Rotor de générateur	0.043478261	0.10561056	194.72
E7	Stator de générateur	0.032608696	0.10561056	194.72
E8	Transformateur principal	0.054347826	0.13531353	5382.3042
E9	Bague collectrice et balais en carbone	0.2173913	0.0066006601	79.105

Tableau 3.2 Les données relatives aux couts

Code	Composant	Cout_MC	Cout_MP	Cout_MS
E1	Disjoncteur de jeu de barres de 380 kV	7263,056	10876,329	29514,684
E2	Disjoncteur de poste de 380 kV	3649,783	10906,754	29173,924
E3	Transformateur de courant de poste de 380 kV	1825,0132	0	7299,566
E4	Transformateur de tension de poste de 380 kV	1825,0132	0	7299,566
E5	Transformateur d'excitation	3661,953	7263,056	29064,394
E6	Rotor de générateur	42,595	14526,112	87424,412
E7	Stator de générateur	42,595	14526,112	87424,412
E8	Transformateur principal	3661,953	16335,791	146040
E9	Bague collectrice et balais en carbone	0	1812,8432	29064,394

3.3 PRESENTATION DE LA METHODOLOGIE ADOPTEE :

Dans le processus de sélection des stratégies de maintenance pour une centrale hydroélectrique, les critères clés, spécifiquement la fiabilité, les coûts et la production doivent être pris en compte. Dans ce but, on utilise la méthode TOPSIS pour hiérarchiser les équipements en fonction de leur criticité, en exploitant les indicateurs identifiés dans la section précédente pour modéliser les critères. Ensuite, on utilise MILP pour sélectionner les meilleures stratégies de maintenance pour chaque équipement en fonction de sa criticité, tout en tenant compte des contraintes budgétaires et opérationnelles. Cette approche combinée permet d'assurer la disponibilité maximale de la centrale tout en minimisant les coûts de maintenance, contribuant ainsi à garantir un fonctionnement efficace et fiable du système énergétique.

Notre approche se compose donc de deux phases : la première consiste à quantifier la criticité à l'aide de la méthode TOPSIS, tandis que la deuxième vise à exploiter les résultats obtenus dans l'affectation des stratégies de maintenance à l'aide d'un modèle MILP. L'enchaînement des différentes étapes comprises dans cette démarche est représenté dans la figure ci-dessous.

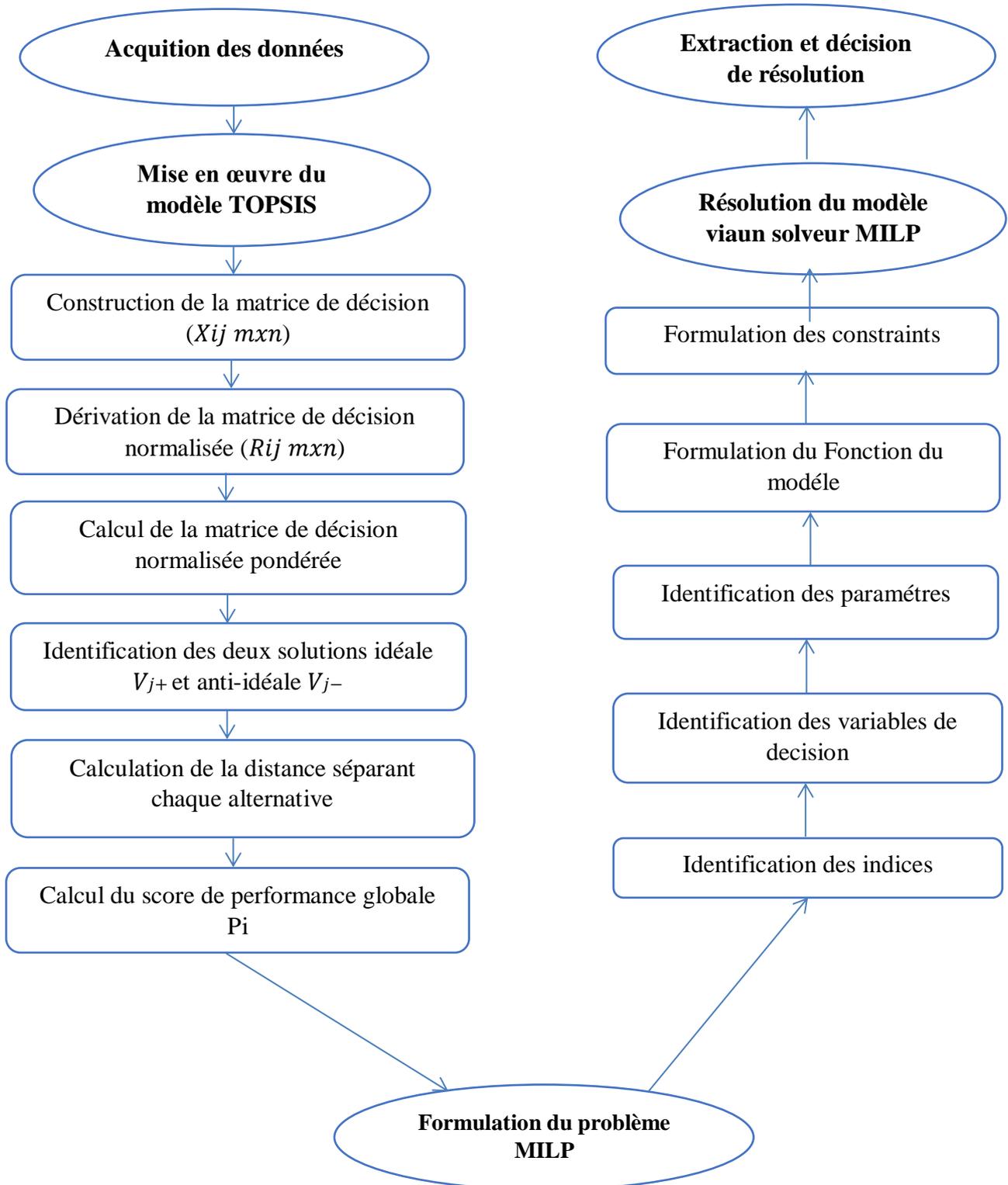


Figure 3.2 Shéma de la méthodologie adoptée

3.3.1 La méthode TOPSIS :

TOPSIS [5] est une méthode compensatoire fondée sur un principe purement géométrique (Figure 3.3), reposant sur l'agrégation totale des critères. Elle consiste à mesurer la distance euclidienne séparant chaque alternative des deux solutions : positive idéale et négative idéale, correspondants respectivement aux deux alternatives : la plus favorable et la plus défavorable. En conséquence, un score de performance est calculé, permettant de définir les préférences entre l'ensemble des alternatives disponibles.

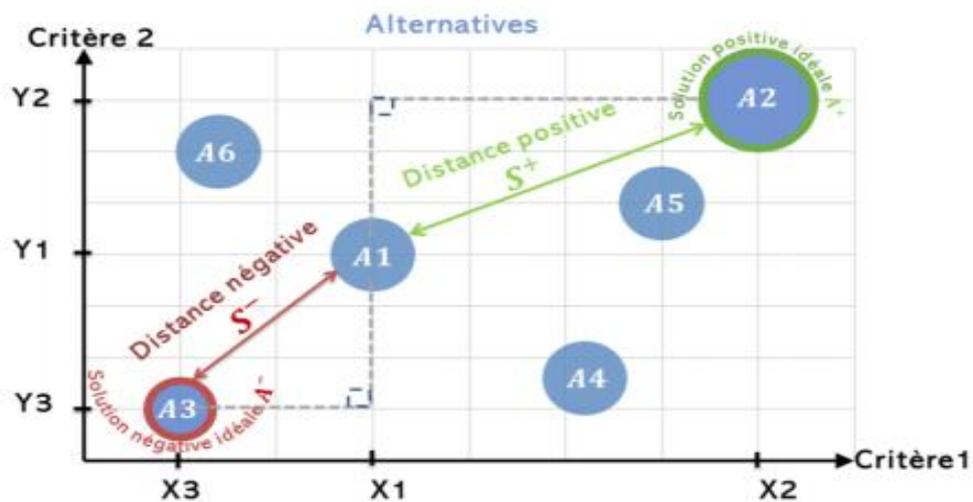


Figure 3.3 Représentation graphique du principe de la méthode TOPSIS [5].

Cela est traduit mathématiquement comme suit :

Étape 1 : Construction de la matrice de décision $(X_{ij} \text{ } m \times n)$ 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_i , 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 $(R_{ij}) \times n$ à travers la normalisation des données d'entrée suivant l'équation (3.1):

$$R_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n X_{ik}^2}} \quad (3.1)$$

Étape 3 : Calcul de la matrice de décision normalisée pondérée $(V_{ij}) \times n$ suivant l'équation (3.2):

$$V_{ij} = R_{ij} \times w_j \quad (3.2)$$

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 :

$$V_j^+ = (\max V_{ij} \mid j \in J^+), (\min V_{ij} \mid j \in J^-) \quad (3.3)$$

$$V_j^- = (\min V_{ij} \mid j \in J^+), (\max V_{ij} \mid j \in J^-) \quad (3.4)$$

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 (3.5) et (3.6), respectivement.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_i^+)^2} \quad (3.5)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_i^-)^2} \quad (3.6)$$

Où $i = 1, 2, 3, \dots, m$.

Étape 6 : Calcul du score de performance globale pour chaque alternative P , à travers l'équation (3.7), permettant d'effectuer un rangement en conséquence.

$$P_i = S_i^- / (S_i^- + S_i^+) \quad (3.7)$$

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

3.3.2 Description de la méthode MILP :

La méthode MILP (Mixed-Integer Linear Programming, ou Programmation linéaire en nombres entiers mixtes) [38] 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 :

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.

MILP pour la sélection des stratégies de maintenance

L'objectif principal de ce modèle MILP est d'optimiser l'affectation des stratégies de maintenance à l'ensemble d'équipements précédemment priorisé à l'aide de la méthode TOPSIS en fonction de leur criticité. Pour ce faire, nous définissons deux seuils de criticité $S1$ et $S2$ séparant trois stratégies possibles pour déterminer la stratégie de maintenance de chaque équipement : les équipements ayant des scores de criticité inférieurs à $S1$ suivent la stratégie de maintenance conditionnelle (MC), ceux dont les scores se situent entre $S1$ et $S2$ sont associés à la stratégie de maintenance prédictive (MP), et ceux avec des scores supérieurs à $S2$ suivent la stratégie de maintenance systématique (MS). Ainsi, l'objectif de cette section est de définir les meilleures valeurs de $S1$ et $S2$ permettant de sélectionner la stratégie adéquate pour chaque équipement et de favoriser les stratégies les plus efficaces (considérées ici comme MS et MP, dans cet ordre). Plus le seuil $S1$ est élevé, moins il y a d'équipements soumis à MP et MS, et vice-versa. Donc, le but est de minimiser les valeurs de $S1$ et $S2$ afin de maximiser les pratiques les plus efficaces de maintenance, tout en respectant le budget de maintenance alloué. La formulation mathématique de ce concept est basée sur le travail proposé dans [39]. Elle s'explique par les éléments suivants :

Indices utilisés :

i : Indice pour le nombre de l'équipement, où $i = 1, \dots, 9$.

j : Indice pour le nombre de la stratégie de maintenance, où $j = 1, 2, 3$ correspond à MC, MP, MS, à l'ordre.

Variables de décision :

X_{ij} : Variable binaire représentant les sorties du modèle, égale à 1 si la stratégie de maintenance j est choisie pour l'équipement i , et 0 sinon.

S1 : Le seuil au-dessous duquel MC est appliquée.

S2 : Le seuil en-dessous duquel MP est appliquée pour les équipements dont la criticité est supérieure à $S2$. Les équipements ayant une criticité supérieure à $S2$ suivront évidemment la stratégie MS qui est considérée dans ce cas comme la plus favorable pour les éléments critiques.

Paramètres :

Equipements : Ensemble d'équipements considérés dans l'étude, c'est-à-dire 9 équipements codés par des numéros de 1 à 9, du moins au plus critique.

Stratégies : Ensemble de stratégies considérées dans l'étude, c'est-à-dire les 3 stratégies codées par des numéros de 1 à 3, du moins au plus performante.

Cr_i : Criticité de chaque équipement, valorisée par les scores résultant de la méthode TOPSIS.

Cost_{ij}: Coût de maintenance de l'équipement i selon la stratégie j , fourni dans la source des données.

Fonction objective du modèle :

La fonction objective (l'équation ci-dessous) maximise une somme pondérée des équipements affectés à chaque stratégie de maintenance. Cette fonction favorise les stratégies les plus efficaces (souvent coûteuses) en attribuant des poids plus élevés à ces stratégies par rapport aux autres stratégies (moins favorables). On adopte dans cette étude les mêmes poids de priorisation estimés dans [39] à l'aide de la méthode TOPSIS, suite à une évaluation multicritère des stratégies. Ainsi, pour nos trois stratégies MC, MP et MS, les poids valent respectivement : 0.23, 0.66 et 0.77, favorisant ainsi les stratégies systématique et prédictive par rapport à la stratégie conditionnelle, dans cet ordre.

$$\text{Maximiser } 0.23 \times \sum_{i=1}^{i=9} X_{i,1} + 0.66 \times \sum_{i=1}^{i=9} X_{i,2} + 0.77 \times \sum_{i=1}^{i=9} X_{i,3} \quad (3.8)$$

Contraintes :

Contrainte budgétaire : Pour empêcher tout déficit financier, le coût total des stratégies de maintenance pour tous les équipements ne doit pas dépasser le budget alloué (estimé à 300 000 € dans notre cas). Cela s'exprime comme suit :

$$\sum_{i=1}^{i=9} \sum_{j=1}^{j=3} \text{Cout}_{i,j} X_{i,j} \leq 300\,000 \quad (3.9)$$

Contrainte imposant la politique d'affectation des stratégies : Chaque équipement doit suivre exactement une stratégie de maintenance. Cela se traduit mathématiquement comme suit :

$$\sum_{j=1}^{j=3} X_{i,j} = 1 \quad ; \quad \forall i = 1, \dots, 9 \quad (3.10)$$

Contrainte de préservation de l'ordre : Cette contrainte assure l'affectation des stratégies suivant l'ordre croissant de la criticité des équipements. Cela veut dire :

$$X_{i,1} + 2X_{i,2} + 3X_{i,3} \leq X_{i+1,1} + 2X_{i+1,2} + 3X_{i+1,3} \quad ; \quad \forall i = 1, \dots, 8 \quad (3.11)$$

Contraintes de définition des seuils S1 et S2 : Les seuils S1 et S2 doivent être définis pour assurer une bonne répartition des stratégies en fonction de la criticité. S1 représente le seuil de criticité entre MC et MP. S2 représente le seuil de criticité entre MP et MS. D'où, on écrit :

$$S1 \geq \sum_{i=1}^{i=8} Cr_i \times (X_{i,1} - X_{i+1,1}) \quad (3.12)$$

$$S2 \geq \sum_{i=1}^{i=8} Cr_i \times (X_{i,1} - X_{i+1,1} + X_{i,2} - X_{i+1,2}) \quad (3.13)$$

Contraintes de définition des limites pour S1 et S2 : Elle vise à différencier S1 de S2 et d'assurer que les deux seuils appartiennent à la plage de données fournies. Ce se traduit comme suit :

$$0.161 \leq S1 < S2 \leq 0.606$$

3.4 IMPLEMENTATION DE LA METHODOLOGIE :

3.4.1 Implémentation de la méthode TOPSIS :

Pour l'implémentation de la méthode topsis nous avons utilisé le DSS (Decision Support System) élaboré par MEHREZ Rayane LAALA Abdelhak, pour générer les résultats de ces étapes de TOPSIS, l'interface d'accueil de ce DSS est présenté comme suit :

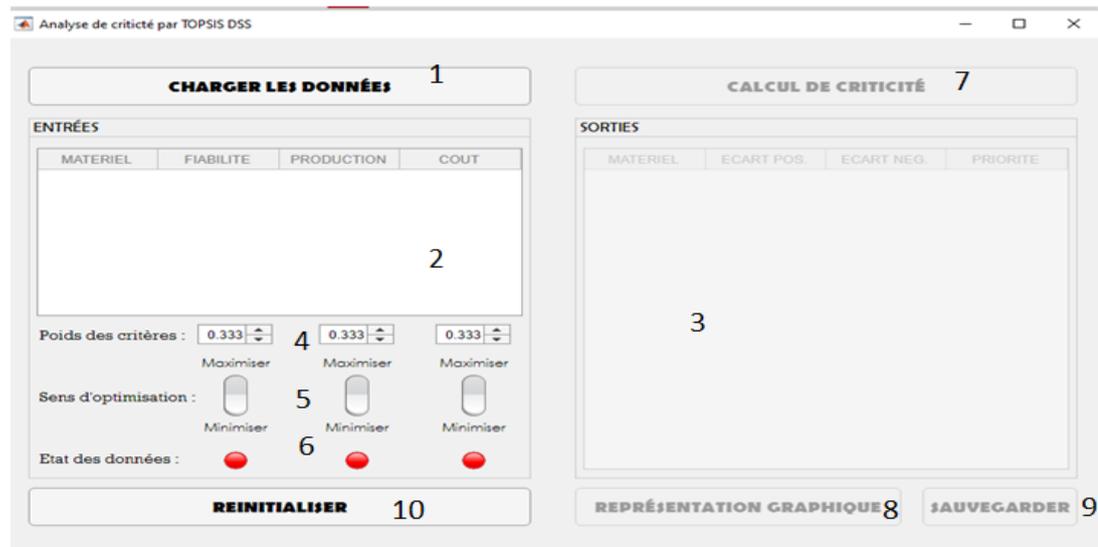


Figure 3.4 Interface réalisée par Matlab App Designer

L'utilisation de ce DSS s'explique comme suit :

- 1) Charger les données des équipements d'un fichier Excel
- 2) Visualisation des données introduites
- 3) Visualisation des résultats
- 4) Spinner pour introduire les poids des critères
- 5) Rocker switch pour choisir le sens d'optimisation
- 6) Témoin pour vérifier l'intégrité des données
- 7) Bouton pour lancer le calcul
- 8) Bouton pour la création d'une présentation graphique
- 9) Bouton pour sauvegarder les résultats
- 10) Bouton pour réinitialiser et relancer à nouveau

L'application de la méthode TOPSIS dans notre cas d'étude suit les étapes suivantes :

ETAPE 1 : consiste à établir la matrice de décision ($X_{ij} \text{ } m \times n$)

Tableau 3.3 Les données pondérées

ROW	MATERIEL	FIABILITE	PRODUCTION	COUT
E1	Disjoncteur de jeu de barres de 380 kV	0.10869565	0.34983498	1006.459
E2	Disjoncteur de poste de 380 kV	0.2173913	0.13861386	712.1884
E3	Transformateur de courant de poste de 380 kV	0.10869565	0.052805281	340.76
E4	Transformateur de tension de poste de 380 kV	0.10869565	0.052805281	340.76
E5	Transformateur d'excitation	0.10869565	0.052805281	584.16
E6	Rotor de générateur	0.043478261	0.10561056	194.72
E7	Stator de générateur	0.032608696	0.10561056	194.72
E8	Transformateur principal	0.054347826	0.13531353	5382.3042
E9	Bague collectrice et balais en carbone	0.2173913	0.0066006601	79.105

ETAPE 2 : permet d'obtenir la matrice de décision normalisée ($R_{ij} \text{ } m \times n$) suivant l'équation (3.1) :

Tableau 3.4 La Matrice normalisée

Row	MATERIEL	FIABILITE	PRODUCTION	COUT
E1	Disjoncteur de jeu de barres de 380 kV	0.28284	0.80126	0.18034
E2	Disjoncteur de poste de 380 kV	0.56569	0.31748	0.12761
E3	Transformateur de courant de poste de 380 kV	0.28284	0.12095	0.06106
E4	Transformateur de tension de poste de 380 kV	0.28284	0.12095	0.06106
E5	Transformateur d'excitation	0.28284	0.12095	0.10467
E6	Rotor de générateur	0.11314	0.24189	0.034891
E7	Stator de générateur	0.084853	0.24189	0.034891
E8	Transformateur principal	0.14142	0.30992	0.96444
E9	Bague collectrice et balais en carbone	0.56569	0.015118	0.014175

ETAPE 3 : Calcul de la matrice de décision normalisée pondérée suivant l'équation (3.2) :

Tableau 3.5 Calcul de la matrice de décision normalisée pondérée

Row	MATERIEL	FIABILITE	PRODUCTION	COUT
E1	Disjoncteur de jeu de barres de 380 kV	0.094187	0.26682	0.060055
E2	Disjoncteur de poste de 380 kV	0.18837	0.10572	0.042496
E3	Transformateur de courant de poste de 380 kV	0.094187	0.040275	0.020333
E4	Transformateur de tension de poste de 380 kV	0.094187	0.040275	0.020333
E5	Transformateur d'excitation	0.094187	0.040275	0.034856
E6	Rotor de générateur	0.037675	0.080549	0.011619
E7	Stator de générateur	0.028256	0.080549	0.011619
E8	Transformateur principal	0.047093	0.1032	0.32116
E9	Bague collectrice et balais en carbone	0.18837	0.0050343	0.0047201

ETAPE 4 : Identification des deux solutions idéale V_{j+} et anti-idéale V_{j-} suivant les colonnes (3.3) et (3.4) :

- Solution Idéale:

La solution idéale est définie en prenant les meilleures valeurs possibles pour chaque critère parmi toutes les options disponibles. Dans ce cas :

- Fiabilité : La valeur maximale est 0.18887 (E2, E9).
- Production : La valeur maximale est 0.26682 (E1).
- Coût : La valeur minimale (puisque le coût est un critère à minimiser) est 0.0047201 (E9).

- Solution Anti-Idéale :

La solution anti-idéale est définie en prenant les pires valeurs possibles pour chaque critère parmi toutes les options disponibles. Dans ce cas :

- Fiabilité : La valeur minimale est 0.028256 (E7).
- Production : La valeur minimale est 0.0050433 (E9).
- Coût : La valeur maximale est 0.32116 (E8).

ETAPE 5 : Calcul de la distance séparant chaque équipement des deux solutions idéale et anti-idéale, à travers les équations (3.5) et (3.6), ainsi que le score de criticité globale, à l'aide de l'équation (3.7). D'où on obtient :

Tableau 3.6 Distances et priorités-calculées

Row	MATERIEL	DISTANCE_POSITIVE	DISTANCE_NEGATIVE	CRITICITE
E7	Stator de générateur	0.395156709	0.075829602	0.161
E6	Rotor de générateur	0.391434995	0.076412301	0.163
E3	Transformateur de courant de poste de 380 kV	0.38818771	0.076370758	0.164
E4	Transformateur de tension de poste de 380 kV	0.38818771	0.076370758	0.164
E5	Transformateur d'excitation	0.377044517	0.080603524	0.176
E9	Bague collectrice et balais en carbone	0.410688134	0.16011726	0.281
E2	Disjoncteur de poste de 380 kV	0.321878134	0.192879176	0.375
E1	Disjoncteur de jeu de barres de 380 kV	0.27757176	0.275573183	0.498
E8	Transformateur principal	0.216171837	0.33185095	0.606

ETAPE 6 : hiérarchisation des équipements de l'installation par ordre de criticité

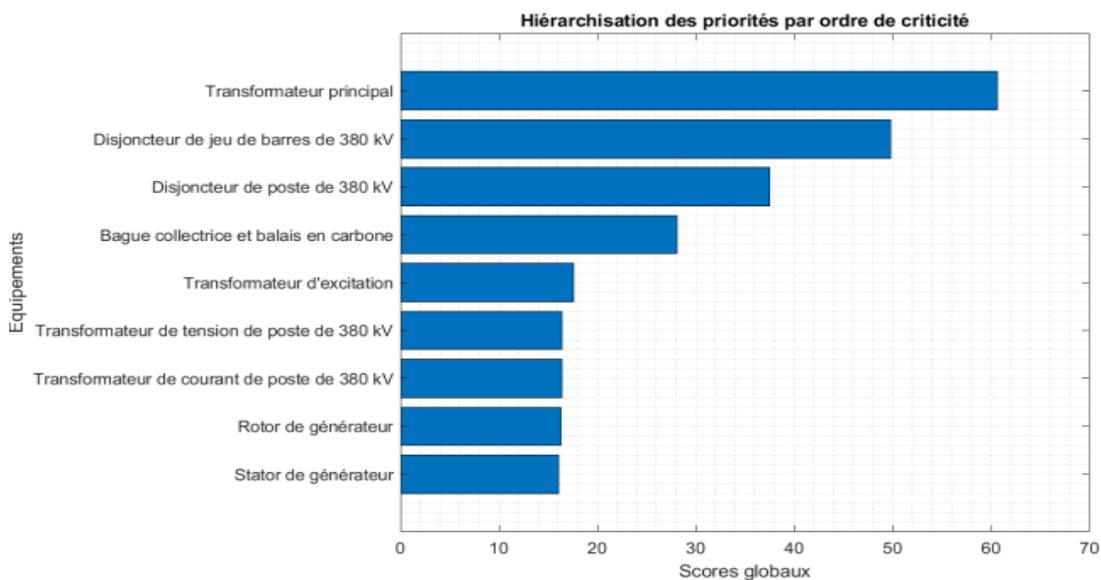


Figure 3.5 Classement de criticité obtenu

3.4.2 Implémentation du modèle MILP :

Pour l'implémentation du modèle MILP, on considère trois stratégies de maintenance, données par ordre croissant de préférence comme suit : maintenance conditionnelle (MC), maintenance prédictive (MP) et maintenance systématique (MS). Le budget disponible pour couvrir les charges de mise en œuvre de ces stratégies pour l'ensemble des équipements est estimé à : 300 000 €.

L'ensemble d'équipements retenu dans l'étude comporte les neuf équipements dont la criticité a déjà été quantifiée à l'aide de la méthode TOPSIS, et les coûts associés à chaque stratégie sont fournis dans la source des données [37]. Ainsi, leur récapitulatif s'affiche du moins critique au plus critique comme suit :

Tableau *Error! No text of specified style in document..7 Les équipements s'affiche du moins critique au plus critique*

Code	Composant	Criticité _Cri	Cout_MC	Cout_MP	Cout_MS
E7	Stator de générateur	0,161	42,595	14526,112	87424,412
E6	Rotor de générateur	0,163	42,595	14526,112	87424,412
E3	Transformateur de courant de poste de 380 kV	0,164	1825,0132	0	7299,566
E4	Transformateur de tension de poste de 380 kV	0,164	1825,0132	0	7299,566
E5	Transformateur d'excitation	0,176	3661,953	7263,056	29064,394
E9	Bague collectrice et balais en carbone	0,281	0	1812,8432	29064,394
E2	Disjoncteur de poste de 380 kV	0,375	3649,783	10906,754	29173,924
E1	Disjoncteur de jeu de barres de 380 kV	0,498	7263,056	10876,329	29514,684
E8	Transformateur principal	0,606	3661,953	16335,791	146040

Pour la résolution du modèle MILP, nous utilisons le logiciel LINGO v21 [41], dont l'interface d'accueil est illustrée dans la figure (3.6) ci-dessous.

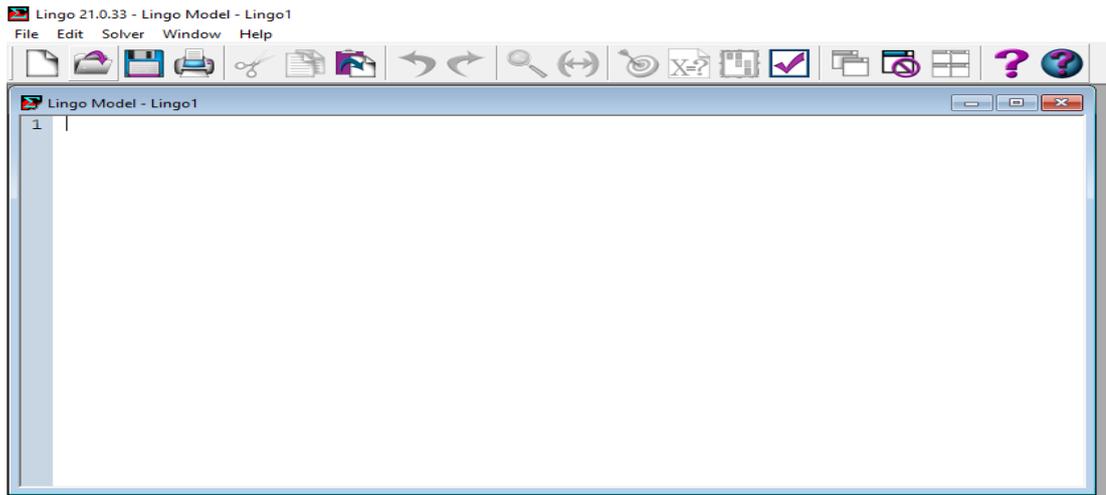


Figure 3.6 logiciel LINGO v21

Un solveur de type « Branch & Bound » est utilisé pour la résolution du modèle. Le temps de résolution est de 0.26 secondes sur une machine dotée d'un processeur AMD A9-9425 et d'une mémoire vive de 4GB, tournant sous Windows 10 version 21H2. La figure 3.7 illustre les spécifications du modèle suite à sa résolution, telles que son volume, le nombre des variables et de contraintes utilisées, et la valeur optimale de la fonction objective correspondant à la meilleure combinaison de solutions. La figure 3.7 montre également qu'aucun conflit n'a été détectés, ce qui confirme la justesse de la formulation du modèle.

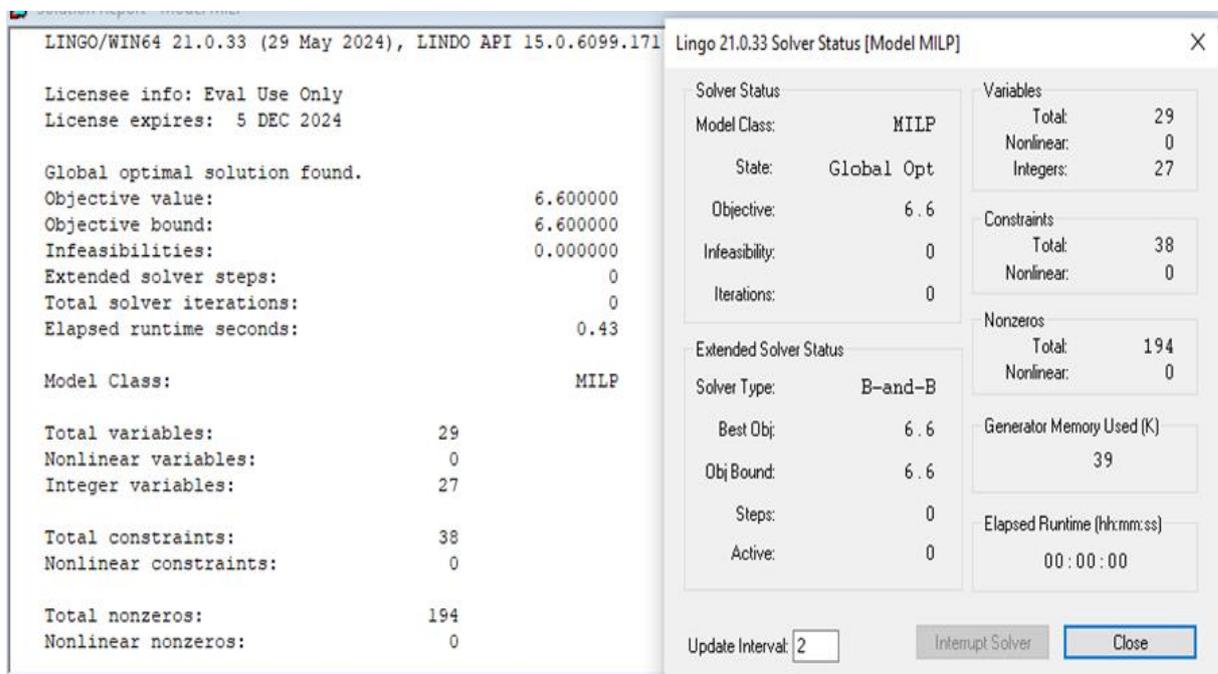


Figure 3.7 spécifications du modèle MILP

En effet les résultats peuvent être générés suivant plusieurs scénarios en fonction du nombre de stratégies à affecter à chaque équipement. Les variables de sorties du modèle se présentent par les valeurs des variables booléennes $X_{MC}(i)$, $X_{MP}(i)$ et $X_{MS}(i)$ indiquant si chacune des trois stratégies MC, MP et MS, respectivement, est appliquée (valeur 1) ou non (valeur 0) pour l'équipement i . Ainsi, on obtient:

Scénario 1: Chaque équipement ne peut recevoir qu'une seule stratégie.

$X_{MC}(1)$	0.000000	-0.2300000
$X_{MC}(2)$	0.000000	-0.2300000
$X_{MC}(3)$	0.000000	-0.2300000
$X_{MC}(4)$	0.000000	-0.2300000
$X_{MC}(5)$	0.000000	-0.2300000
$X_{MC}(6)$	0.000000	-0.2300000
$X_{MC}(7)$	0.000000	-0.2300000
$X_{MC}(8)$	0.000000	-0.2300000
$X_{MC}(9)$	0.000000	-0.2300000
$X_{MP}(1)$	1.000000	-0.6600000
$X_{MP}(2)$	1.000000	-0.6600000
$X_{MP}(3)$	1.000000	-0.6600000
$X_{MP}(4)$	0.000000	-0.6600000
$X_{MP}(5)$	0.000000	-0.6600000
$X_{MP}(6)$	0.000000	-0.6600000
$X_{MP}(7)$	0.000000	-0.6600000
$X_{MP}(8)$	0.000000	-0.6600000
$X_{MP}(9)$	0.000000	-0.6600000
$X_{MS}(1)$	0.000000	-0.7700000
$X_{MS}(2)$	0.000000	-0.7700000
$X_{MS}(3)$	0.000000	-0.7700000
$X_{MS}(4)$	1.000000	-0.7700000
$X_{MS}(5)$	1.000000	-0.7700000
$X_{MS}(6)$	1.000000	-0.7700000
$X_{MS}(7)$	1.000000	-0.7700000
$X_{MS}(8)$	1.000000	-0.7700000
$X_{MS}(9)$	1.000000	-0.7700000

Figure Error! No text of specified style in document..8 Les résultats obtenus pour une stratégie

Scénario 2 : Chaque équipement peut recevoir deux stratégies à la fois.

$X_{MC}(1)$	1.000000	-0.2300000
$X_{MC}(2)$	1.000000	-0.2300000
$X_{MC}(3)$	1.000000	-0.2300000
$X_{MC}(4)$	1.000000	-0.2300000
$X_{MC}(5)$	1.000000	-0.2300000
$X_{MC}(6)$	1.000000	-0.2300000
$X_{MC}(7)$	0.000000	-0.2300000
$X_{MC}(8)$	0.000000	-0.2300000
$X_{MC}(9)$	0.000000	-0.2300000
$X_{MP}(1)$	1.000000	-0.6600000
$X_{MP}(2)$	1.000000	-0.6600000
$X_{MP}(3)$	1.000000	-0.6600000
$X_{MP}(4)$	1.000000	-0.6600000
$X_{MP}(5)$	1.000000	-0.6600000
$X_{MP}(6)$	1.000000	-0.6600000
$X_{MP}(7)$	1.000000	-0.6600000
$X_{MP}(8)$	1.000000	-0.6600000
$X_{MP}(9)$	1.000000	-0.6600000
$X_{MS}(1)$	0.000000	-0.7700000
$X_{MS}(2)$	0.000000	-0.7700000
$X_{MS}(3)$	0.000000	-0.7700000
$X_{MS}(4)$	0.000000	-0.7700000
$X_{MS}(5)$	0.000000	-0.7700000
$X_{MS}(6)$	0.000000	-0.7700000
$X_{MS}(7)$	1.000000	-0.7700000
$X_{MS}(8)$	1.000000	-0.7700000
$X_{MS}(9)$	1.000000	-0.7700000

Figure Error! No text of specified style in document..9 Les résultats obtenus pour deux stratégie

3.5 PRÉSENTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

3.5.1 Interprétation des résultats de la méthode TOPSIS :

La figure 3.10 ci-dessous illustre les performances locales (par critère) des équipements, représenté à l'aide des données pertinentes, ainsi que leurs performances globales (criticité), estimé à l'aide de l'agrégation totale assurée par la méthode TOPSIS.

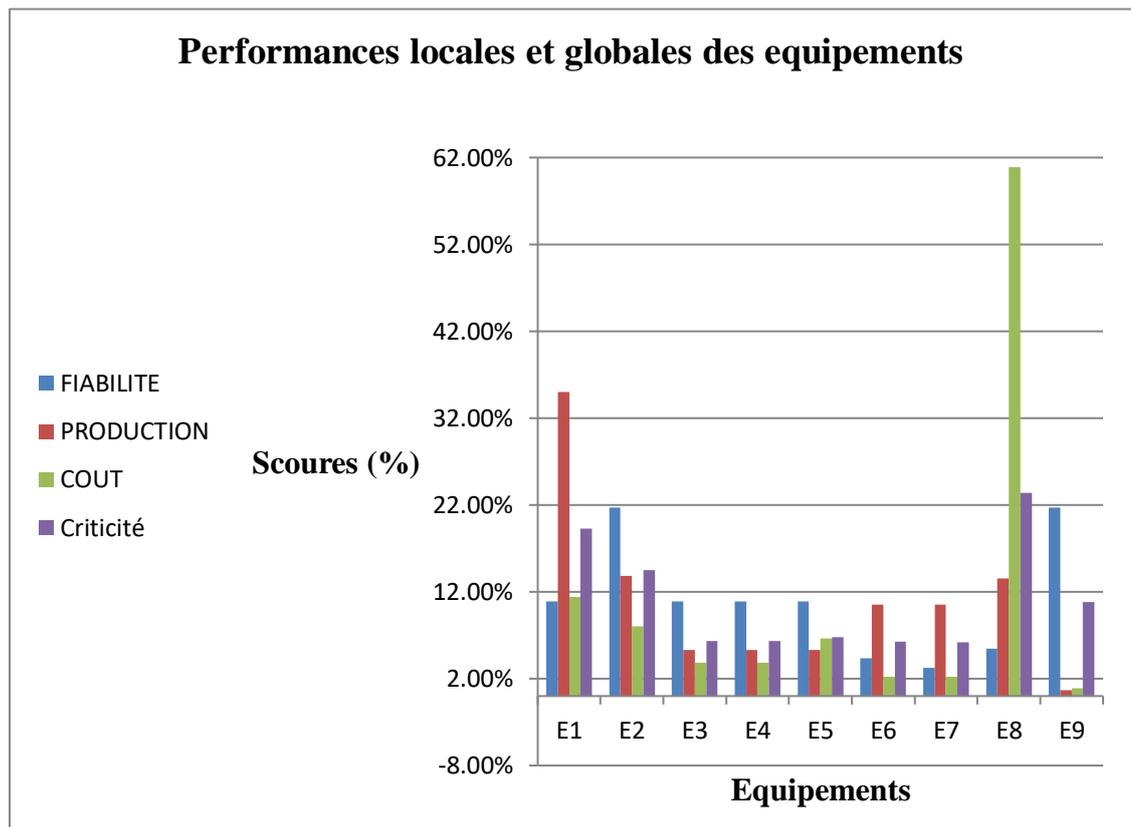


Figure 3.10 Performances locales et globales des équipements

A partir de cette représentation, on observe que l'ordre de performance des équipements varie d'un critère à un autre. Ainsi, il diffère de l'ordre obtenu au niveau global (criticité). L'équipement E1 se distingue principalement par des pertes de production élevées, tandis que l'équipement E8 se distingue par une consommation significative des coûts. D'autre part, E2 et E9 se caractérisent par un niveau de fiabilité relativement faible. Ce conflit clairement notable au niveau des performances locales est l'essence de la complexité de quantification de la criticité. C'est là où la méthode TOPSIS intervient pour gérer ces variations en produisant un score agrégé permettant une évaluation équilibrée et justifiée de la performance globale des équipements. Ainsi, cette évaluation montre que les équipements E8, E1, E2 et E9 sont les éléments les plus

critiques et doivent donc recevoir une attention particulière, y compris dans la mise en place des stratégies spécifiques de leur maintenance.

3.5.2 Interprétation des résultats de la méthode MILP :

Les résultats de notre approche :

Tableau *Error! No text of specified style in document..8* Les résultats de notre approche

Code	Composant	Scénario 1			Scénario 2		
		MC 1	MP 1	MS 1	MC 2	MP 2	MS 2
E7	Stator de générateur		✓		✓	✓	
E6	Rotor de générateur		✓		✓	✓	
E3	Transformateur de courant de poste de 380 kV		✓		✓	✓	
E4	Transformateur de tension de poste de 380 kV			✓	✓	✓	
E5	Transformateur d'excitation			✓	✓	✓	
E9	Bague collectrice et balais en carbone			✓	✓	✓	
E2	Disjoncteur de poste de 380 kV			✓		✓	✓
E1	Disjoncteur de jeu de barres de 380 kV			✓		✓	✓
E8	Transformateur principal			✓		✓	✓

Le tableau 3.8 révèle les résultats suivants :

Scénario 1 : Pour une seule stratégie par équipement, on obtient :

- MP (Maintenance prédictive) pour les équipements 1 à 3.
- MS (Maintenance systématique) pour les équipements 4 à 9.
- MC (Maintenance conditionnelle) aucun équipement.

Scénario 2 : Pour deux stratégies par équipement, on obtient :

- MP (Maintenance prédictive) pour les équipements 1 à 9.
- MS (Maintenance systématique) pour les équipements 7 à 9.
- MC (Maintenance conditionnelle) pour les équipements 1 à 6.

On observe que, dans les deux scénarios, les équipements les plus critiques sont toujours favorisés en leur affectant les stratégies les plus efficaces, Ainsi, plus leur criticité augmente

plus ils tendent à recevoir une maintenance systématique, sinon une maintenance prédictive. D'autre part, bien que la maintenance conditionnelle soit considérée dans ce cas comme choix standard pour les équipements les moins critiques, ces derniers peuvent bénéficier d'une stratégie plus efficace telle que la maintenance prédictive. C'est ce que l'on note également dans le scénario 1. Cela est justifié par la baisse des coûts qu'ils requièrent pour l'implémentation de cette stratégie et la suffisance du budget restant pour couvrir les nouvelles charges résultantes.

Vérification du respect du budget :

Dans le scénario 1 :

Le coût de maintenance prédictive:

$$\sum X_{Mp}(i) = X_{MP}(1) + X_{MP}(2) + X_{MP}(3)$$

$$\sum X_{Mp}(i) = 14526.112 + 14526.112 + 0 = 29052.224$$

Le coût de maintenance systématique:

$$\sum X_{MS}(i) = X_{MS}(4) + X_{MS}(5) + X_{MS}(6) + X_{MS}(7) + X_{MS}(8) + X_{MS}(9)$$

$$\sum X_{MS}(i) = 7299.566 + 29064.394 + 29064.394 + 29173.924 + 29514.684 + 146040 = 270156.962$$

$$\sum X_{MP}(i) + X_{MS}(i) = 29052.224 + 270156.962 = \mathbf{299209.186}$$

$299209.186 < 300\ 000$ donc le budget est respecté.

Dans le scénario 2 :

Le coût de maintenance conditionnelle:

$$\sum X_{MC}(i) = X_{MC}(7) + X_{MC}(6) + X_{MC}(3) + X_{MC}(4) + X_{MC}(5) + X_{MC}(9)$$

$$\sum X_{MC}(i) = 42.595 + 42.595 + 1825.0132 + 3661.953 + 0 = 6166.5612$$

Le coût de maintenance systématique:

$$\sum X_{MS}(i) = X_{MS}(1) + X_{MS}(2) + X_{MS}(8)$$

$$\sum X_{MS}(i) = 29173.924 + 29514.684 + 146040 = 204728.608$$

Le coût de maintenance prédictive:

$$\sum X_{Mp}(i) = X_{MP}(1) + \dots + X_{MP}(9)$$

$$\sum X_{Mp}(i) = 76246.9972$$

$$\sum X_{MC}(i) + X_{MS}(i) + X_{MP}(i) = 6166.5612 + 204728.608 + 76246.9972 = \mathbf{288372.7746}$$

287142.166 < 300 000 donc le budget est respecté.

On observe que, dans les deux scénarios, le modèle MILP respecte toujours le budget disponible dans l'affectation des stratégies de maintenance aux équipements.

3.5.3 Comparaison et validation des résultats :

Pour valider les résultats obtenus par le modèle MILP, une comparaison est menée avec ceux obtenus dans [37] à l'aide du modèle hybride équivalent AHP-GP (tableau 3.9).

Tableau 3.9 Les résultats obtenus par l'approche de référence [37]

Code	Composant	MC	MP	MS	M Corrective
E7	Stator de générateur	✓	✓	✓	
E6	Rotor de générateur	✓	✓	✓	
E3	Transformateur de courant de poste de 380 kV	✓	✓	✓	
E4	Transformateur de tension de poste de 380 kV	✓	✓	✓	
E5	Transformateur d'excitation	✓	✓	✓	
E9	Bague collectrice et balais en carbone	✓	✓	✓	
E2	Disjoncteur de poste de 380 kV	✓	✓	✓	✓
E1	Disjoncteur de jeu de barres de 380 kV	✓	✓	✓	✓
E8	Transformateur principal	✓	✓	✓	✓

On observe que le modèle AHP-GP, présenté dans [37], considère une stratégie supplémentaire qui est la maintenance corrective. Cependant, ses résultats manifestent une affectation de presque toutes les stratégies à tous les équipements à l'exception des équipements E7, E6, E3, E4, E5 et E9 qui ne reçoivent pas la stratégie corrective seulement tandis qu'ils bénéficient de toutes les autres stratégies. Cela est dû à la négligence de la contrainte cout dans le modèle GP et la non-incorporation de la criticité des équipements dans sa formulation, ce que ne limite pas vraiment les choix disponibles pour chaque équipement.

En résumé, cela montre que l'approche TOPSIS-MILP est privilégiée en termes de précision. La non-considération de la stratégie corrective dans sa formulation est justifiée par le fait qu'elle est une stratégie standard appliquée pour tous les équipements dans tout secteur industriel. D'où on accepte que les résultats de notre modèle sont non seulement valides, mais sont également plus proche de la réalité, étant donné qu'ils tiennent compte des contraintes budgétaires.

3.6 CONCLUSION

L'approche de modélisation multicritère avec MILP présente des implications pratiques significatives pour la gestion de la maintenance industrielle. En priorisant les décisions en fonction de plusieurs critères, elle permet une allocation efficace des ressources, réduisant ainsi les coûts tout en maximisant la disponibilité opérationnelle des équipements. Cette approche offre également une transparence accrue dans le processus décisionnel, favorisant ainsi une meilleure communication avec les parties prenantes et renforçant la confiance dans les stratégies de maintenance adoptées. Cependant, malgré ses avantages, il est essentiel de reconnaître les limites de cette approche. La complexité des modèles MILP peut rendre la résolution difficile, surtout pour des ensembles de données volumineux ou des problèmes avec de multiples contraintes et objectifs. De plus, la qualité des résultats dépend fortement de la qualité des données d'entrée et de la précision des paramètres du modèle, ce qui souligne l'importance d'une collecte et d'une validation rigoureuses des données ainsi que la nécessité de se disposer de systèmes d'information performants. D'autant plus que ce modèle es relativement exigeant en termes données. D'autre part, la formulation des fonctions objective et contraintes requises pour la mise en œuvre de cette approche nécessite une expertise technique avancée, ce qui peut constituer un obstacle dans certains cas. Ainsi, tout en capitalisant sur les avantages de cette approche, il est crucial d'aborder ces limites de manière proactive pour maximiser les bénéfices tout en atténuant les risques potentiels.

Conclusion générale et perspectives

La maintenance industrielle joue un rôle crucial pour les sociétés dans le but d'améliorer leurs résultats et de se conformer aux réglementations. Ce processus englobe plusieurs aspects tels que la planification, la gestion et la mise en œuvre de différentes stratégies de maintenance, telles que la systématique, conditionnelle, prédictive. Les décisions prises dans ce domaine ont un impact majeur sur les coûts, la fiabilité des équipements, la production.

Au fil du temps, les progrès technologiques et les nouvelles méthodes de gestion ont entraîné une évolution significative des méthodes et des outils de maintenance. Cette évolution a conduit à l'émergence de modèles contemporains qui proposent des solutions et des recommandations plus efficaces grâce à un traitement régulier des données. Parmi ces modèles, le paradigme multicritère se distingue comme une boîte à outils reconnue dans le domaine de l'assistance à la prise de décision.

Dans cette étude, il a été prouvé que la modélisation multicritère est efficace pour améliorer les processus de maintenance industrielle. En employant la méthode MILP et la méthode TOPSIS, mises en œuvre, respectivement, à l'aide du logiciel LINGO 21 et le système d'aide à la décision (DSS) . Nous avons réussi à examiner et à comparer diverses approches de maintenance. Selon les résultats, cette méthode permet de prendre en considération plusieurs critères en même temps, ce qui permet de proposer des solutions optimales adaptées aux besoins particuliers de l'industrie.

Comme futures perspectives, on propose d'enrichir le modèle MILP en intégrant d'autres contraintes et facteurs mis en jeu dans la sélection des stratégies de maintenance. Ainsi, on propose de reconstruire l'approche proposée dans ce travail sous MATLAB pour avoir plus de flexibilité dans les modifications et le paramétrage du modèle.

Références

1. A. F. d. Normalisation. (2001, June). Terminologie de la maintenance.
2. Halima, M. B. (2015). Analyse des stratégies de maintenance des systèmes de production industrielle (Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohammed Boudiaf, Faculté de Génie Electrique).
3. Lamouri, M. E. H., & Abdelkani, F. (2020). Réalisation d'un logiciel de diagnostic (Mémoire de Master, Université de Biskre).
4. Baba Arbi.N., & Salem, M.T . (2020). Implantation de la fonction documentation dans un logiciel GMAO (Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla).
5. Bouchaala, M. A. (2021). Modélisation et Analyse Multicritère de la Décision dans la Fonction Maintenance (Thèse de doctorat, Université d'Oran 2, Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle).
6. Bouchemal, M. (2022). Amélioration d'une politique de maintenance en milieu industriel par application d'une approche évaluative : Cas de la raffinerie SONATRACH RA2K Skikda (Mémoire de master, Université 8 Mai 1945 – Guelma).
7. Souaiaia, H. (2017). Étude de maintenance de système moteur voix rouleaux "TSS" SIDER-Annaba (Mémoire de master, Université Badji Mokhtar Annaba).
8. Brahim, M. (2017). Analyse de la fonction maintenance à l'unité TSS – SIDER ANNABA (Mémoire de master, Université Badji Mokhtar Annaba).
9. MILOUDI, R. (2015). Optimisation de la fiabilité des équipements au niveau de l'atelier de finissage "EATIT" Sebdou (Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen).
10. Daif, S. (2020). Analyse des coûts de maintenance et leur importance sur la stratégie de production d'une entreprise (Mémoire de master, Université Badji Mokhtar Annaba).
11. <https://fr.scribd.com/doc/306251723/07-La-Maintenance-Basee-Sur-La-Fiabilite-MBF>
12. Chapitre 2 Méthodes et techniques de maintenance calameo.com <https://www.calameo.com › books la maintenance industrielle>
13. Bouziane, K., & Delbaz, A. (2021). Contribution à l'étude de la maintenance basée sur la fiabilité. Étude de cas (Mémoire de master, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, Faculté des Sciences Appliquées).
14. PUB (15 janv 2024) <https://safetyculture.com/fr/themes/types-de-maintenance/>
15. Bahmani, Y. (2017). Optimisation multicritère de l'ordonnancement des activités de la production et de la maintenance intégrées dans un atelier Job Shop (Thèse de doctorat, Laboratoire d'Automatique et de Productique (LAP), Université de Batna).
16. Guetatlia, M. (2020). Amélioration de la sûreté de fonctionnement d'un système mécatronique : 'actionneur intelligent' (Mémoire de master, Université 8 Mai 1945 – Guelma).

17. <https://blog.aqmanager.com/criticite-des-equipements-industriels>
18. 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 en sciences, Université Abou Bekr Belkaid, Faculté des sciences économiques, commerciales et des sciences de gestion).
19. Boubkeur, R. (2017). Analyse multicritère d'aide à la décision (Mémoire de Master en Informatique, Université Abdelhamid Ibn Badis – Mostaganem, Faculté des Sciences Exactes et de l'Informatique).
20. Bedja, R., & Djaout, I. (2008). Sélection multicritère de fournisseurs basée sur les méthodes AHP et ANP : Application à Kraft Foods Algérie (Mémoire du Projet de Fin d'Etudes d'Ingénieur, École Nationale Polytechnique, Département de Génie Industriel).
21. Figueira J., Greco S. and Ehrogott M., (2005), Multiple Criteria Decision Analysis. In, International series in operations research & management science, Springer, 78(1), p.10-48, New York.
22. Moumeni, C. (2021). Évaluation de la sûreté de fonctionnement des systèmes industriels (Thèse de doctorat en sciences, Université Badji Mokhtar Annaba).
23. Schârlig A., (1985), Décider sur plusieurs critères, Panorama de l'aide à la décision multicritère. In, Collection : Diriger l'entreprise, Presse polytechnique et universitaire
24. Roy B., (1977), Critique et dépassement de la problématique d'optimisation. In , Cahiers Sema, 1, p. 35-42.
25. Zeleny, M. (1982). Multiple Criteria Decision Making. New York: McGraw-Hill.
26. Vincke, P. (1989). L'aide multicritère à la décision. Éditions de l'Université de Bruxelles.
27. Aouni, B. (1998). Le modèle de programmation mathématique avec buts dans un environnement imprécis: sa formulation, sa résolution et une application. Thèse de doctorat, Faculté des Sciences de l'administration, Université Laval, Canada.
28. Othmani, I. (1998). Optimisation multicritère : fondements et concepts. Modélisation et simulation. Thèse de doctorat, Université Joseph-Fourier - Grenoble I.
29. Laurent F. et Bougon B. (2005). Pratiques de la décision. Edition Dunod, Paris.
30. Bendib, S.-S. Cours Systèmes d'Aide à la Décision (SAD). Université Batna2-Faculté des Mathématiques et de l'Informatique, Département d'Informatique.
31. Hamdani, N. D. (2019). Un système d'aide multicritères à la décision de groupe : une approche basée sur le web services et les agents (Thèse de doctorat en sciences, Université d'Oran 1, Faculté des Sciences Exactes et Appliquées).
32. 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).
33. IEEE. (2007). IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Std 493-2007) (Gold Book). Institute of Electrical and Electronics Engineers. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2007.4280403>

34. CIGRE. (2015). Technical Brochure No. 642: Reliability of High Voltage Equipment. International Council on Large Electric Systems. Disponible via: <https://e-cigre.org/publication/642-reliability-of-high-voltage-equipment>
35. North American Electric Reliability Corporation (NERC). (2020). 2020 State of Reliability. NERC. Tiré à partir de : https://www.nerc.com/pa/RAPA/PA/Performance%20Analysis%20DL/NERC_SOR_2020.pdf
36. U.S. Department of Energy. (2010). Operations & Maintenance Best Practices Guide, Release 3.0. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. Tiré à partir de : <https://www.energy.gov/eere/femp/downloads/operations-maintenance-best-practices-guide-release-30>
37. Özcan, E. C., Ünlüsoy, S., & Eren, T. (2017). A combined goal programming–AHP approach supported with TOPSIS for maintenance strategy selection in hydroelectric power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 1410-1423.
38. Conforti, M., Cornuéjols, G., & Zambelli, G. (2014). *Integer Programming*. Springer.
39. Houria, Z. B., Masmoudi, M., Hanbali, A. A., Khatrouch, I., & Masmoudi, F. (2016). Quantitative techniques for medical equipment maintenance management. *European journal of industrial engineering*, 10(6), 703-723.
40. MEHREZ, R., & LAALA, A. (2023). Gestion stratégique de la maintenance à l'aide du paradigme multicritère [Mémoire de fin d'étude, Institut de maintenance et de sécurité industrielle, Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed]. <https://ds.univ-oran2.dz:8443/jspui/handle/123456789/7490>
41. https://www.lindo.com/index.php/products/lingo-and-optimization-modeling_2024