



Université d'Oran 2
Institut de Maintenance et de sécurité Industrielle

THESE

Pour l'obtention du diplôme de Doctorat « L.M.D »
En Electromécanique

**Modélisation et Analyse Multicritère de la Décision
dans la Fonction Maintenance**

Présentée et soutenue publiquement par :
Mr. BOUCHAALA Mohammed Abdelghani

Devant le jury composé de :

Mr. HACHEMI Khalid	Professeur	Université d'Oran 2	Président
Mr. NOUREDDINE Rachid	Professeur	Université d'Oran 2	Rapporteur
Mme. AISSANI Nassima	MCA	Université d'Oran 2	Examinatrice
Mr. BOUALEM Nouredine	Professeur	USTO-MB	Examineur
Mr. CHAKER Abdelkader	Professeur	ENPO-MA	Examineur

Modélisation et Analyse Multicritère de la Décision dans la Fonction Maintenance

Résumé :

La fonction maintenance est reconnue maintenant par les industriels et les scientifiques comme un levier incontournable pour maîtriser les risques et optimiser les performances de l'entreprise. Dans cette logique, l'importance et l'omniprésence du processus de décision dans la fonction maintenance est situé à plusieurs niveaux. Cette problématique de décision est usuellement prise en charge, dans les études de maintenance, par les outils liés à la sûreté de fonctionnement. Dans cette thèse, il s'agit principalement d'apporter une contribution significative dans ce contexte à l'aide du paradigme de l'analyse multicritère qui permet d'amener plus de précision. A cette fin, nous identifions d'abord les niveaux de maintenance tout en établissant le lien avec les concepts et les typologies de la décision. Ensuite, nous conduisons une recherche bibliographique sur les travaux connexes afin de déterminer les techniques et les méthodes utilisées dans ce contexte. Après avoir étudié les fondements de ces méthodes, nous avons implémenté la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) dans une problématique de priorisation des équipements critiques, qui constitue un niveau crucial de la prise de décision dans la fonction maintenance. Enfin, l'approche proposée est comparée aux alternatives similaires, ce qui permet de valider ses résultats et de mettre en évidence son apport, d'une part, et de répondre, d'autre part, aux préoccupations soulevées dans la littérature à propos de l'application adéquate des méthodes pertinentes, vu le grand nombre d'options disponibles et qui diffèrent en termes de précision et de robustesse des résultats fournis d'un problème à un autre.

Mots clés : Agrégation, Analyse Multicritère, Prise de Décision, Maintenance, PAMC.

Multi-Criteria Decision Modeling and Analysis within the Maintenance Function

Abstract:

The maintenance function is recognized today, by both industrials and scientists, as an essential lever for controlling risks and optimizing company performance. In this logic, the importance and the omnipresence of the decision-making process in the maintenance function is located at several levels. This decision problem is usually taken care of, in maintenance studies, using dependability analysis tools. This thesis is mainly concerned with providing a significant contribution, in this context, by relying on the multi-criteria analysis paradigm, which allows to bring improved accuracy. For this purpose, we first define the maintenance levels and link them to the decision concepts and patterns. Then, we conduct a literature review of relevant work to identify the techniques and methods used in this context. After thoroughly studying these methods, we have implemented the AHP (Analytic Hierarchy Process) method to deal with an 'equipment prioritization problematic, which constitutes a crucial decision level in the maintenance function. Finally, the proposed model is compared with similar approaches, allowing to validate its results and highlight its contribution, on the one hand, and to respond, on the other hand, to the concerns raised in the literature about the proper application of the methods used in this context, given the vast number of available options; especially that they differ in terms of the accuracy and robustness of the provided results from one problem to another.

Key words: Aggregation, Multi-criteria Analysis, Decision-Making, Maintenance, MCDM.

النمذجة و التحليل متعدد المعايير للقرار ضمن وظيفة الصيانة

الملخص:

تُعَرَّفُ وظيفة الصيانة اليوم من طرف الفاعلين في قطاع الصناعة والبحث العلمي على حد السواء على أنها مقبض رئيسي للتحكم في المخاطر وتحسين أداء المؤسسة. من هذا المنطلق، نلتزم بتواجد شامل وبالغ الأهمية لعملية صنع القرار في وظيفة الصيانة على عدة مستويات. عادة ما يتم معالجة مشكلة القرار هذه في دراسات الصيانة عن طريق أدوات معاينة الاعتمادية التشغيلية للمعدات. في هذه الأطروحة، يتعلق الأمر أساساً بتقديم مساهمة علمية نوعية في هذا السياق بالاعتماد على مقارنة التحليل متعدد المعايير، والتي تسمح بجلب المزيد من الدقة. من أجل هذا الهدف، يتم أولاً تحديد أولاً مستويات الصيانة مع إنشاء الرابط مع مفاهيم وأنماط القرار. بعد ذلك، يتم إجراء مسح للأعمال ذات الصلة في الأدبيات لتحديد التقنيات والطرق المستخدمة في هذا السياق. بعد دراسة الأسس الرياضية لهذه الطرق، خلصنا إلى تطبيق طريقة التحليل الهرمي (AHP) لمعالجة مشكلة تتعلق بتحديد أولويات المعدات، والتي تمثل مستوى حاسماً لصنع القرار في وظيفة الصيانة. أخيراً، تتم مقارنة المقاربة المقترحة مع النماذج المشابهة، مما يجعل من الممكن التحقق من صحة نتائجها وإبراز مساهمتها من جهة، والإجابة من جهة أخرى، على الانشغالات التي أثيرت في الأدبيات حول التطبيق الأنسب للطرق المستعملة في هذا السياق، بالنظر إلى تعدد الخيارات المتاحة؛ خاصة وأنها تتباين من حيث دقة وموثوقية النتائج المقدمة من مشكلة إلى أخرى.

كلمات مفتاحية: تجميع المعايير، تحليل متعدد المعايير، صناعة القرار، الصيانة، تقنيات دعم القرار.

Remerciements

Tout d'abord, je remercie le bon Dieu de m'avoir donné l'opportunité de vivre cette expérience unique dans le monde de la recherche scientifique, d'avoir éclairé mon chemin par les inspirations et les idées, et de m'avoir honoré par la contribution scientifique concrétisée par ce modeste travail.

Je remercie également tous les membres du comité de formation doctorale de l'Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle, qui m'ont appris les fondements de base de la recherche scientifique et ont contribué significativement à m'orienter et à m'instruire, leurs efforts ont eu un grand impact en faisant de moi le chercheur que je suis devenu aujourd'hui. Je remercie en particulier le chef du comité et mon directeur de thèse Mr. Noureddine Rachid pour son soutien et ses conseils ; sa clairvoyance et sa vaste expérience m'ont été d'une aide inestimable.

Je tiens à remercier les membres du jury qui ont gracieusement consacré leur temps à la révision de ce travail et qui m'ont également honoré par leur acceptation de l'évaluer, et surtout, de m'avoir donné l'opportunité de bénéficier de leur expertise pour progresser et développer mes perspectives.

Mes remerciements les plus sincères vont à ma famille pour leur présence dans les moments difficiles, les encouragements et l'ambiance agréable tout au long de mon parcours, à l'ensemble de mes amis pour le soutien moral et l'esprit positif qui m'ont motivé grandement, et à tous mes collègues ; les doctorants, qui m'ont reçu cordialement entre eux dès le premier jour et m'ont aidé à m'adapter dans le milieu de la recherche scientifique.

Enfin, un grand merci pour tous ceux qui ont aidé de près ou de loin pour l'élaboration de cette thèse.

Sommaire

Remerciements.....	i
Sommaire	ii
Liste des Figures	v
Liste des Tableaux.....	vi
Liste des Abréviations.....	vii
Introduction Générale	1
Chapitre 1: Généralités et Notions de Base	3
1.1 Décision.....	4
1.2 Terminologie relative a la science de décision	4
1.2.1 Alternative (action)	4
1.2.2 Critères et attributs	5
1.2.3 Objectifs	5
1.2.4 Contraintes.....	5
1.2.5 Procédure d'agrégation multicritère (PAMC).....	5
1.2.6 Méthode d'analyse multicritère (MAMC)	6
1.2.7 Matrice de décision	6
1.3 Acteurs de l'aide à la décision	6
1.4 Formulation de la décision : multicritère vs monocritère.....	8
1.5 Aide à la décision	9
1.6 Problématiques de décision et d'aide à la décision	9
1.7 Système d'aide à la décision (DSS)	10
1.8 Fonction maintenance	11
1.9 Types de maintenance	11
1.9.1 Maintenance corrective	11
1.9.2 Maintenance préventive	12
1.10 Opérations de maintenance.....	13
1.10.1 Opérations de maintenance corrective.....	13
1.10.2 Opérations de maintenance préventive.....	13
1.10.3 Opérations liées aux activités connexes	13
1.11 Prise de décision dans la fonction maintenance.....	14
1.11.1 Décisions administratives et managériales	14
1.11.2 Décisions techniques et technologiques	16
1.12 Processus d'analyse multicritère de la décision	17
1.13 Conclusion.....	18
Chapitre 2: Recherche Bibliographique.....	19
2.1 Méthodologie de la recherche bibliographique	20
2.2 Analyse des travaux de synthèse existants	21
2.3 Analyse des travaux de recherche existants	22
2.3.1 Identification des problématiques ciblées par les travaux	22

2.3.2	Synthèse des travaux de recherche examinés.....	25
2.4	Vue d'ensemble.....	28
2.4.1	Méthodes utilisées.....	30
2.4.2	Sélection des critères.....	33
2.4.3	Pondération des critères.....	41
2.4.4	Quantification des critères.....	41
2.4.5	Validation des résultats.....	42
2.5	Synthèse globale.....	44
2.6	Conclusion.....	45
Chapitre 3:	Méthodes d'Analyse Multicritère (MAMC).....	46
3.1	Classification des MAMC.....	47
3.2	Méthodes d'agrégation complète.....	48
3.2.1	La méthode AHP.....	48
3.2.2	La méthode ANP.....	51
3.2.3	La méthode TOPSIS.....	52
3.3	Méthodes Élémentaires.....	54
3.3.1	La méthode de la matrice de criticité agrégée.....	54
3.3.2	La procédure de la somme pondérée.....	55
3.4	Méthodes d'agrégation partielle.....	55
3.4.1	Les méthodes PROMETHEE.....	55
3.4.2	Les méthodes ELECTRE.....	60
3.5	Méthodes d'agrégation locales.....	62
3.5.1	La méthode de Goal Programing (GP).....	62
3.5.2	La méthode de Compromise Programing (CP).....	63
3.6	Critiques des MAMC.....	63
3.7	Choix d'une MAMC.....	65
3.8	Conclusion.....	66
Chapitre 4:	Contribution à la Mise en Œuvre des MAMC dans la Fonction Maintenance .	67
4.1	Contribution ciblée : Motivation et objectifs.....	68
4.2	Concept et méthodologie de recherche.....	71
4.3	Présentation du cas d'étude.....	73
4.4	Implémentation de l'approche proposée.....	74
4.4.1	Établissement du modèle hiérarchique de la méthode AHP.....	74
4.4.2	Comparaisons binaires (évaluation par paire).....	74
4.4.3	Synthèse des résultats.....	76
4.4.4	Extraction des rangements obtenus.....	76
4.5	Confrontation des résultats des deux modes.....	76
4.5.1	Discussion et interprétation des résultats.....	77
4.5.2	Comparaison de conservation de rang.....	80
4.6	Comparaison avec les approches similaires.....	81
4.6.1	Implémentation de la méthode TOPSIS.....	81
4.6.2	Similitudes et différences entre les classements obtenus.....	83
4.6.3	Analyse de la justesse des résultats.....	84
4.6.4	Comparaison de conservation de rang.....	85
4.6.5	Analyse de la sensibilité des résultats.....	86
	Sensibilité des résultats sous AHP-IDEAL.....	87

	Sensibilité des résultats sous PROMETHEE.....	88
	Sensibilité des résultats sous TOPSIS	89
	Synthèse.....	90
4.7	Conception d'un DSS à partir de l'approche proposée.....	90
4.8	Conclusion.....	94
	Conclusion générale et perspectives	96
	Bibliographie.....	98

Liste des Figures

Figure 1.1 Représentation typique d'une matrice de décision	6
Figure 1.2 Acteurs impliqués dans un processus de décision	7
Figure 1.3 Structure de la fonction maintenance	11
Figure 1.4 Les principaux champs d'action dans la fonction maintenance	14
Figure 1.5 Représentation du processus de décision (retravaillé à partir de [3])	17
Figure 2.1 Répartition des travaux analysés selon le secteur d'appartenance	22
Figure 2.2 Répartition des travaux selon les champs de décision ciblés	23
Figure 2.3 Synthèse de la modélisation des décisions de maintenance.....	44
Figure 3.1 Classification des MAMC (modifiée à partir de [176]).....	48
Figure 3.2 Modèle hiérarchique AHP	49
Figure 3.3 Le modèle du réseau issu de la méthode ANP.....	51
Figure 3.4 Représentation graphique du principe de la méthode TOPSIS	53
Figure 3.5 Les différents types de fonctions de préférence de PROMETHEE [8].....	57
Figure 4.1 Fréquence d'utilisation des MAMC dans les travaux de priorisation.....	68
Figure 4.2 Support méthodologique de l'approche proposée	72
Figure 4.3 Hiérarchie du problème	74
Figure 4.4 Rangement des équipements obtenu par les 2 modes de synthèse de la méthode AHP ...	76
Figure 4.5 Identification des priorités opposées provoquant les différences de classification	78
Figure 4.6 Comparaison par paire des équipements correspondant aux priorités opposées	78
Figure 4.7 Comparaison de la conservation du rang entre les deux modes	80
Figure 4.8 Détermination des priorités opposées émanant des 3 méthodes	84
Figure 4.9 Comparaisons des paires d'équipements correspondants aux priorités opposées	84
Figure 4.10 Comparaison de la conservation du rang entre PROMETHEE et TOPSIS	86
Figure 4.11 Analyse de sensibilité sous AHP-IDEAL.....	87
Figure 4.12 Analyse de sensibilité sous PROMETHEE	88
Figure 4.13 Analyse de sensibilité sous TOPSIS.....	89
Figure 4.14 Interface d'accueil du DSS développé	91
Figure 4.15 Chargement des données à partir d'EXCEL.....	92
Figure 4.16 Calcul des priorités locales et globales par le DSS	92
Figure 4.17 Affichage du rangement d'équipements par ordre de priorité	93
Figure 4.18 Confirmation de fermeture et sauvegarde des résultats	93

Liste des Tableaux

Tableau 2.1 Méthodes employées dans les travaux d'évaluation des risques	25
Tableau 2.2 Méthodes employées dans les travaux de planification préventive	26
Tableau 2.3 Méthodes employées dans les travaux de priorisation de maintenance	26
Tableau 2.4 Méthodes employées dans les travaux de sélection des stratégies	27
Tableau 2.5 Méthodes employées dans les travaux d'audit et évaluation de maintenance	27
Tableau 2.6 Méthodes employées dans les travaux de gestion de sous-traitances	28
Tableau 2.7 Méthodes employées dans les travaux de gestion des stocks de rechange	28
Tableau 2.8 Méthodes employées dans les travaux des choix techniques et technologiques	28
Tableau 2.9 Etude statistique sur l'emploi des MAMC dans les travaux examinés	29
Tableau 2.10 Critères retenus dans les travaux d'audit et évaluation de maintenance	34
Tableau 2.11 Critères retenus dans les travaux concernant la priorisation des équipements	35
Tableau 2.12 Critères retenus dans les travaux de gestion de sous-traitances	36
Tableau 2.13 Critères retenus dans les travaux d'évaluation des risques	36
Tableau 2.14 Critères retenus dans les travaux de planification de maintenance	37
Tableau 2.15 Critères retenus dans les travaux de gestion des pièces de rechange	37
Tableau 2.16 Critères retenus dans les approches des choix technologiques et techniques	38
Tableau 2.17 Critères retenus dans les travaux de sélection des stratégies de maintenance	39
Tableau 2.18 Distribution des études de cas traités dans les travaux examinés	43
Tableau 3.1 Echelle d'évaluation de la méthode AHP (échelle de Saaty)	49
Tableau 3.2 Formulation de la super matrice de la méthode ANP	52
Tableau 4.1 Seuils des 2 paramètres P et G par critère	73
Tableau 4.2 La table des performances résultante	74
Tableau 4.3 Matrice de jugement correspondante au critère fiabilité	75
Tableau 4.4 Matrice de jugement correspondante au critère production	75
Tableau 4.5 Matrice de jugement correspondante au critère coût	75
Tableau 4.6 Les résultats obtenus	76
Tableau 4.7 Comparaison des résultats des 2 modes de synthèse de la méthode AHP	77
Tableau 4.8 La matrice normalisée pondérée	82
Tableau 4.9 Identification des deux solutions idéales et anti-idéales par critère	82
Tableau 4.10 Les résultats obtenus par la méthode TOPSIS	82
Tableau 4.11 Confrontation des 3 méthodes : PROMETHEE II vs TOPSIS vs AHP-IDEAL	83

Liste des Abréviations

AHP / ANP: Analytic Hierarchy Process / Analytic Network Process
AIP: Aggregation of the Individual Priorities
AMDEC: Analyse des Modes Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité
AV: Averaging Technique
CI: Criticality index
CODAS: COmbinative DIstance-based ASsessment
COPRAS / COPRAS-G: COmplex PRoportional ASsessment of alternatives (“-G” désigne “Grey relations”)
CP: Compromise Programming
DEMATEL: DEcision MAking Trial and Evaluation Laboratory
DEA: Data Envelopment Analysis
DMG: Decision Making Grid
DSS: Decision Support System (Système d’aide à la décision)
ELECTRE: ELimination Et Choix Traduisant la REalité
FA: Factors Analysis
FMECA: Failure Modes Effects and Criticality Analysis (acronyme anglais pour « AMDEC »)
FPP: Fuzzy Preference Programming
FBC: Fuzzy Borda Count
Fuzzy: La logique floue (désigne aussi les versions floues des méthodes)
GAIA: Geometrical Analysis for Interactive Aid
GP / WGP: Goal Programming / Weighted Goal Programming
GRA: Grey Relational Analysis
GT: Group Technology theory
GTMA: Graph Theory and Matrix Approach
HRPV: Hybrid Risk Priority Value
JKD: Jack Knife Diagram
L/S Graph: Linear/Spider Graph
LRPN: Linguistic Risk Priority Number
MACBETH: Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique
MAGDM: Multi-Attribute Group Decision Making
MAMC: Méthodes d’Analyse Multi-Critère
MAUT / MAVT: Multi-Attribute Utility/Value Theory
MCA: Maintenance Criticality Analysis
MCCE: Multicriteria Classification of Critical Equipment
MELCHIOR: Méthode d’Élimination et de Choix Incluant les relations d’Ordre
MILP: Mixed integer linear programming
MOOP: Multi-Objective Optimization
NGT: Nominal Group Technique
ORESTE: Organisation, Rangement Et SynThèse de données relationnelles
PAMC: Procédure d’Agrégation Multi-Critère
PAMSSEM: Procédure d’Agrégation Multicritère de Surclassement de Synthèse avec Évaluations Mixtes
PROMETHEE: Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations
PSI: Preference Selection Index
RPN / RPI: Risk Priority Number / Index (marquant les méthodes basées sur l’AMDEC ou sa modification)
SAW: Simple Additive Weighting
SMART: Simple Multi-Attribute Rating Technique
SWARA / Z-SWARA: Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis (le “Z” symbolise la version basée sur la théorie Z)
TOPSIS: Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution
VIKOR: Vise Kriterijumska Optimizacija kompromisno Resenje (acronyme serbe qui signifie en français “solution compromise et optimisation multicritère”)

*Les techniques hybrides (combinaisons) sont symbolisées par un tiret (-) reliant ces abréviations.

Introduction Générale

La fonction maintenance a connu un développement majeur au fil des générations. Après avoir été limitée à des interventions correctives seulement à ses débuts ; qui se traduisent par des opérations de réparation et de remplacement après la survenance de la défaillance, elle s'est ensuite élargie pour inclure des programmes préventifs et prédictifs plus avancés, qui visent à anticiper le dysfonctionnement par des interventions avant son occurrence et prévoir les défaillances, permettant ainsi de prolonger la durée de vie de matériel et d'assurer la continuité de la production. Bien que cette évolution ait contribué grandement à accroître l'efficacité globale des entreprises, elle s'est accompagnée de nouvelles responsabilités qui ont fait de la gestion de maintenance un problème complexe, en raison du grand nombre de décisions découlant de toutes ces activités et les nombreux facteurs conflictuels qu'elles mettent en jeu.

Le dilemme décisionnel se pose à plusieurs niveaux dans la fonction maintenance, dont chacun concerne une sous-fonction liée à des aspects divers : économiques, humains, opérationnels ... etc. Plusieurs approches ont été proposées comme solutions dans ce contexte, l'approche classique (monocritère) a été jugée insuffisante, vu qu'elle néglige des aspects stratégiques pendant le traitement du problème. La nécessité de surmonter cette limitation majeure a conduit à l'apparition d'un nouveau type de modèles ayant la capacité de traiter le problème de plusieurs côtés, et permettant d'atteindre des solutions efficaces suivant une perspective multidimensionnelle. Ces modèles s'inscrivent sous le cadre de l'analyse multicritère de la décision.

Cette thèse vise à exploiter le cadre méthodologique de l'analyse multicritère, en tant qu'outil efficace d'aide à la décision, pour apporter une contribution significative au sein de la fonction de maintenance. Cela passe d'abord par l'acquisition des connaissances nécessaires qui relèvent de la science de décision et ensuite l'identification des centres décisionnels pouvant faire objet d'une éventuelle contribution ainsi que les méthodes et les techniques exploitables dans ce domaine. Le travail proposé dans cette thèse s'articule autour de la mise en œuvre de la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) dans le contexte de la hiérarchisation des équipements, ainsi que sa confrontation avec d'autres méthodes d'analyse multicritère (MAMC).

Le choix s'est porté sur l'axe de la hiérarchisation des équipements précisément pour le déploiement de notre contribution en raison du rôle fondamental qu'il joue dans le pilotage de la politique globale de maintenance. Etant donné que les priorités qui en émanent affectent de

nombreux autres axes de décision ; y compris la gestion des stocks de rechange, la planification des interventions, l'attribution des stratégies de maintenance ainsi que l'allocation des budgets et des ressources nécessaires pour ses actions, le moindre apport à ce niveau peut donc entraîner des gains globaux importants. C'est pourquoi la maîtrise des techniques dans ce contexte revêt une grande importance.

En raison des ressources assez limitées de la fonction maintenance, une hiérarchisation efficace des priorités est censée de focaliser les moyens et les efforts disponibles sur les équipements les plus critiques pour pouvoir remédier les faiblesses et assurer le maximum de rentabilité possible. Cela demeure assez intraitable en pratique car la criticité est définie suivant plusieurs aspects ; à leur tête : la stabilité opérationnelle, le rendement productif et l'impact économique, sur lesquels il est quasi-impossible de concilier les priorités. Leur conflictualité constitue donc le défi principal dans la résolution de ce problème et l'essence de sa complexité. Les chercheurs essaient constamment de trouver des formules adéquates pour faire face aux enjeux associés à ces aspects, dans la prise de décision, en exploitant les méthodes d'analyse multicritère pour développer des modèles et des approches dans ce but.

Cette thèse est structurée en 4 chapitres : Le chapitre 1 cherche à identifier les différentes notions et concepts relevant de la décision multicritère ainsi que sa projection sur les activités de maintenance. Le chapitre 2 vise à exploiter ces acquis pour conduire une recherche d'état de l'art portant sur les applications liées à la thématique étudiée, permettant d'esquisser la procédure de modélisation adoptée durant le processus et de déterminer les méthodes exploitées à cette fin. Une sélection de ces méthodes, impliquant les techniques les plus largement utilisées, est étudiée en détail dans le chapitre 3, tout en donnant des recommandations et des critiques. Le chapitre 4 vise à employer l'ensemble des connaissances acquises à travers cette étude pour identifier les lacunes de recherche et les cibler par une contribution scientifique, qui est démontrée en pratique à travers une étude de cas. Cela englobe principalement l'élaboration d'une approche améliorée d'aide à la décision au niveau de l'axe de priorisation d'équipements, ainsi que sa comparaison avec les approches similaires. Enfin, l'ensemble des constatations et accomplissements achevés par cette thèse sont synthétisés dans une conclusion générale tout en donnant quelques perspectives pour les futurs travaux.

Chapitre 1: Généralités et Notions de Base

L'ingénierie de maintenance et la science de décision sont deux disciplines indépendantes, dont chacune est caractérisée par ses propres concepts et une terminologie spécifique. Il est donc indispensable d'acquérir les connaissances de base, dans ce contexte, pour pouvoir procéder à l'étude de tout problème connexe. Dans ce chapitre, on décrit les définitions et les principes fondamentaux à ce stade. Ainsi, nous mettons en évidence les points d'intersection de la science de décision avec la fonction maintenance afin d'identifier les différents domaines d'action théoriquement concernés par les décisions multicritères, et qui serviront comme repères pour conduire une enquête d'état de l'art à propos de notre sujet d'étude, dans le chapitre qui suit.

1.1 DECISION

La décision [1] est une action exercée par un individu libre (le décideur) qui se manifeste par le choix d'une option à partir d'un ensemble de possibilités ou d'alternatives. L'action choisie est la résultante d'un processus dit de décision qui implique souvent l'intervention de plusieurs acteurs et la considération de multiples facteurs. « La science de décision » désigne la discipline qui cherche à faciliter la compréhension d'un problème décisionnel et assister le processus de décision, en exploitant des méthodes systématiques et des modèles mathématiques, dans le but de pouvoir aboutir à une solution adéquate. La décision devient multicritère lorsque cette solution doit satisfaire plusieurs points de vue en conflit qui sont liés au problème posé. Dans le cas contraire, elle est dite monocritère.

D'après cette définition, une décision peut prendre plusieurs formes :

- Un choix (ex : option A, option B, option C).
- Une évaluation (ex : critique, admissible, négligeable).
- Un jugement (ex : Bon, moyen, faible).
- Un classement (ex : 1^{er}, 2^{ème}, 3^{ème}, ...etc.).
- Etc.

1.2 TERMINOLOGIE RELATIVE A LA SCIENCE DE DECISION

Comme toute discipline, la science de décision est caractérisée par sa propre terminologie qui permet de référer aux différents éléments impliqués dans la décision d'une manière systématique et unifiée. Les concepts de bases, dans ce contexte, sont définis ci-dessous.

1.2.1 Alternative (action)

Selon Roy [2], une « alternative » ou « action » est la représentation d'une contribution possible à la décision globale qui peut être considérée de manière autonome par rapport à l'état de développement du processus de décision et qui peut servir de point d'application pour l'aide à la décision (ex : option A, option B, option C). Ce terme est donc valable pour toute action dont la réalisation sur le plan pratique est envisageable. Lors du traitement d'un problème décisionnel, il réfère aux solutions potentielles à évaluer par le décideur pour identifier la solution optimale ; qui satisfait ses besoins et répond le mieux aux exigences de la décision.

1.2.2 Critères et attributs

Un attribut est un signe distinctif qui caractérise une alternative, permettant de la décrire d'une manière qualitative (ex : performant / faible, couteux / économique, ...).

Le critère est un facteur d'évaluation construit généralement à partir d'un attribut (ex : performance, cout, ...). Il est exprimé d'une manière quantitative ou qualitative, reflétant relativement la performance sur un aspect défini du problème, et par laquelle les alternatives sont jugées sur cet aspect pour dégager les préférences. Un critère est souvent caractérisé par un coefficient exprimant son importance (un poids), ainsi qu'un sens d'amélioration : croissant ou décroissant selon son type ; bénéfique (ex : performance) ou non bénéfique (ex : cout), à l'ordre. Ainsi, Il est sujet d'un objectif défini par le décideur, lors de son évaluation.

1.2.3 Objectifs

L'objectif décrit la nature du changement souhaité sur un critère donné, lors de la prise décision, c'est-à-dire le comportement idéal envisagé par le décideur pour les actions sur ce critère. Les critères font généralement l'objet de trois objectifs : maximisation (cas des critères bénéfiques), minimisation (cas des critères non bénéfiques) ou le maintien dans une situation spécifiée qui s'accorde avec les préférences exprimées et les moyens fournis (cas des contraintes).

1.2.4 Contraintes

Une contrainte est une condition primordiale qui limite l'objectif de maximisation ou de minimisation afin d'imposer l'admissibilité des actions sur un critère donné (ex : un budget, un délai, ...). Les contraintes sont généralement introduites pour assurer la conformité avec les lois et les règlements applicables, ou en fonction des besoins du décideur et des moyens disponibles pour la mise en œuvre de la décision en pratique.

1.2.5 Procédure d'agrégation multicritère (PAMC)

Roy et Bouyssou [1] définissent la procédure d'agrégation multicritère 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.

1.2.6 Méthode d'analyse multicritère (MAMC)

Les méthodes d'analyse multicritères (ou Multi-Criteria Decision-Making methods) se distinguent comme des outils avancés d'aide à la décision destinés au traitement des situations complexes impliquant plusieurs facteurs. Guitouni [3] considère que les MAMC sont des approches systématiques ayant pour but de formuler le problème d'une façon analytique et logique, modéliser le comportement des alternatives suivant les différents critères et identifier les solutions les plus satisfaisantes à travers l'agrégation des préférences à l'aide d'une PAMC.

1.2.7 Matrice de décision

Une matrice de décision [4] est une matrice de dimensions $m \times n$ (où m et n sont les nombres des alternatives et critères, à l'ordre), remplie par les indices a_{ij} ; indiquant la performance de l'alternative A_i suivant le critère de décision C_j (pour $i = 1,2,3, \dots, m$ et $j = 1,2,3, \dots, n$). En supposant que chaque critère est associé à un poids w_j reflétant son importance dans le processus de décision, la représentation de cette matrice serait donc comme suit :

$$\begin{array}{c}
 \left[\begin{array}{cccccc}
 & C_1 & C_2 & C_j & \dots & C_n \\
 & w_1 & w_2 & w_j & \dots & w_n \\
 \hline
 A_1 & a_{11} & a_{12} & a_{1j} & \dots & a_{1n} \\
 A_2 & a_{21} & a_{22} & a_{2j} & \dots & a_{2n} \\
 A_i & \cdot & \cdot & a_{ij} & \dots & a_{in} \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
 A_m & a_{m1} & a_{m2} & a_{mj} & \dots & a_{mn}
 \end{array} \right]
 \end{array}$$

Figure 1.1 Représentation typique d'une matrice de décision

La représentation d'une décision multicritère sous forme matricielle permet donc de rassembler et représenter les données du problème d'une manière structurée et informative. En effet, cela constitue le socle du processus de décision. Ainsi, c'est l'étape de départ pour de nombreuses méthodes multicritères et donc la matière première qui alimente les modèles de décision.

1.3 ACTEURS DE L'AIDE A LA DECISION

La prise de décision est le résultat d'une interaction entre plusieurs acteurs (Figure 1.2). Le nombre et les qualités des acteurs impliqués dans un processus de décision varient selon les spécifications du problème décisionnel (mono décideur / multidécideurs, désaccord / accord entre les décideurs, présence / absence d'informations, etc.). Ces acteurs sont définis comme suit [5]:

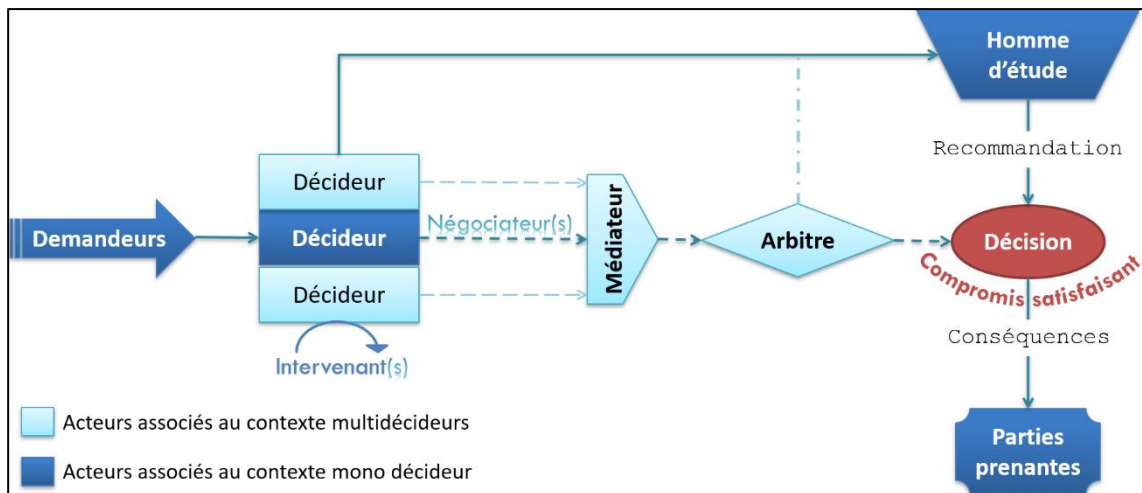


Figure 1.2 Acteurs impliqués dans un processus de décision

1. **Les demandeurs** : Ils prennent en charge la demande d'étude et l'allocation des moyens requis.
2. **Le décideur** : Il représente la partie concernée par l'aide à la décision. Ses attentes influent sur plusieurs niveaux du processus de décision, ce qui le place au centre par rapport aux autres acteurs. Selon la sensibilité et la complexité de la décision, le décideur peut se manifester comme un individu ou comme un groupe.
3. **L'intervenant** : Il joue le rôle d'un conseiller qui intervient pour influencer le décideur à une certaine étape du processus, en raison de la nature de ses préférences et valeurs.
4. **Le négociateur** : Il joue le rôle d'un représentant du décideur qui exprime son point de vue et sa position dans les négociations, tout en cherchant à parvenir à un compromis satisfaisant toutes les parties.
5. **Le médiateur** : Comme son nom l'indique, il cherche à réconcilier les points de vue et rapprocher les opinions entre les négociateurs (ou les décideurs, selon le cas) en vue de faciliter la recherche d'une solution compromise.
6. **L'arbitre** : C'est un acteur neutre et indépendant, il joue le rôle d'un juge qui s'engage à la place des autres acteurs dans la recherche d'une solution compromise.
7. **L'homme d'étude** : Il joue le rôle d'un analyste qui exploite les données et les informations fournies par les différentes parties, ainsi que l'expertise humaine existante, pour modéliser le problème décisionnel et fournir au décideur des recommandations et des conseils sur les solutions potentielles. L'homme d'étude est

caractérisé par son approche scientifique et analytique qui le différencie du négociateur et du médiateur.

8. **Les parties prenantes ou les agis (Stakeholders)** : Ils sont les parties affectées par les conséquences de la décision. Ils participent indirectement au processus à travers l'image stéréotypée que d'autres acteurs posent de leurs perceptions et préférences.

1.4 FORMULATION DE LA DECISION : MULTICRITERE VS MONOCRITERE

L'approche monocritère se focalise sur un seul aspect du problème, qui représente souvent le point de vue prédominant. Elle est donc mathématiquement bien posée ; elle suppose que la décision est suffisamment simple pour la formuler comme un problème d'optimisation classique où il s'agit d'identifier l'optimum parmi les solutions potentielles. Bien que cette formulation soit compréhensible et assez facile, elle est loin de simuler le raisonnement humain où diverses préférences sont mis en jeu dans la prise de décision, du fait qu'elle ne soit capable de considérer de multiples points de vue que lorsque ces derniers sont non-confliktuels (en les traitant par tournées ; un par un), ce qui n'est pas souvent le cas. Tout de même, elle peut être bien adaptée pour les problèmes de nature opérationnelle et récurrente, notamment ceux qui sont régis par un caractère instantané, imposant le décideur à déterminer ses priorités et se concentrer uniquement sur l'aspect le plus important.

En revanche, l'approche multicritère vise à tenir compte de tous les aspects du problème dans la prise décision, qui sont souvent conflictuels. Cela s'avère mathématiquement mal posé en raison de l'absence d'une solution objective qui constitue l'optimum sur tous les critères simultanément. Il s'agit donc de rechercher un compromis satisfaisant qui permet de bénéficier d'une efficacité relative de la décision sur chacun des aspects constituant le problème, conformément aux préférences du décideur. L'approche multicritère fait face donc à plusieurs défis : d'abord, elle est assez complexe et difficile à formuler à cause des intérêts contradictoires impliqués. Ensuite, elle requiert de concilier des points de vue hétérogènes et d'agréger des critères exprimés dans diverses unités de référence, ou même de nature intangible (difficile à mesurer quantitativement). Enfin, ses solutions sont souvent peu interprétables, ce qui met en évidence la responsabilité du décideur, surtout si on considère que ce dernier tend à devenir incertain de ses désirs, plus le nombre de critères retenus augmente. Mais en dépit de ces défis, cette approche reste parmi les moyens les plus efficaces pour traiter les décisions stratégiques ou sensibles, en particulier celles qui impliquent plus qu'un seul décideur ou plusieurs acteurs de divers secteurs et départements, où il s'agit de former une perspective élargie et unifiée.

Comme synthèse, l'approche monocritère impose au décideur d'adopter sa solution (supposée optimale), s'il voit qu'elle est vraiment une incarnation de la réalité, tandis que l'approche multicritère lui laisse une marge de liberté pour réviser ses priorités et imposer ses préférences. Elle est centrée sur la notion d'aide à la décision qui cherche à éclairer une situation floue et proposer une recommandation efficace plutôt qu'une solution optimale déterministe ; en raison de l'absence de cette dernière dans ce cas à cause de la conflictualité des critères.

1.5 AIDE A LA DECISION

Roy et Bouyssou [1] définissent l'aide à la décision comme « *l'activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponse aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision, éléments concourant à éclairer la décision et normalement à recommander, ou simplement à favoriser, un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution du processus d'une part, les objectifs et le système de valeurs au service desquels cet intervenant se trouve placé d'autre part* ». Il s'agit donc du rôle de l'homme d'étude, qui consiste d'employer des approches systématiques et des méthodes d'analyse multicritère pour structurer la décision et modéliser les préférences dans le but d'éclairer la situation décisionnelle et dégager les solutions répondant le mieux aux objectifs souhaités. La formulation du problème semble être la partie la plus délicate de ce processus. Einstein [6] affirme que la formulation d'un problème est souvent plus essentielle que sa solution, qui peut être simplement une question de compétence mathématique ou expérimentale. Cette étape doit donc suivre un raisonnement analytique qui obéit à la logique sur laquelle la situation repose. Cependant, cela passe d'abord par la prise de connaissance des typologies des problématiques et leurs caractéristiques.

1.6 PROBLEMATIQUES DE DECISION ET D'AIDE A LA DECISION

Une problématique de décision représente une situation dans laquelle nous nous trouvons à la croisée des chemins, c'est-à-dire devant plusieurs options, où nous ne pouvons en choisir qu'une seule. Cette situation peut se manifester suivant plusieurs typologies. Selon Roy [2], il existe 4 types principaux de problématiques de décision :

1. **Problématique de choix ($P. \alpha$)** : Il s'agit d'éliminer les mauvaises solutions dans un ensemble d'actions afin de créer un sous-ensemble, aussi restreint que possible, des meilleures alternatives. Dans le cas idéal, on obtiendra un sous-ensemble contenant une seule alternative (la plus satisfaisante), qui sera choisie évidemment.

2. **Problématique de tri ($P. \beta$)** : Comme son appellation l'indique, elle consiste à effectuer un tri résultant de l'affectation de chaque alternative à une catégorie prédéterminée. Elle cherche donc à partitionner l'ensemble des alternatives vers un nombre spécifié de partitions, chacune étant définie par une catégorie descriptive, où les catégories sont déterminées à priori selon les jugements qui peuvent être effectués dans le cas étudié. Ce type de problématiques est caractérisé par le traitement de chaque alternative selon ses spécifications intrinsèques, indépendamment des autres.
3. **Problématique de rangement ($P. \gamma$)** : Elle cherche à effectuer un rangement partiel ou total des alternatives suivant un sens spécifié, permettant d'obtenir un ordre de préférence, performance, dominance, priorité, etc. Ce type de problématiques est caractérisé donc par la différenciation entre les alternatives selon leur intérêt relatif.
4. **Problématique de description ($P. \delta$)** : Au contraire des 3 problématiques précédentes, celle-ci ne consiste pas à comparer les alternatives ou à favoriser entre elles. Plutôt, elle cherche à faciliter la compréhension de la situation décisionnelle en décrivant les alternatives et en éclairant leurs conséquences. Ce type de problématiques est associé aux cas dans lesquels le décideur est incertain de ses souhaits et ses objectifs.

Selon Costa et Carlos [7], chacune de ces problématiques peut se manifester suivant plusieurs formes (tri borné / tri nominal, choix successif / choix de la meilleure alternative ... etc.). Les auteurs précisent également qu'une problématique d'aide à la décision diffère d'une problématique de décision, étant donné que la première concerne le choix des méthodes, techniques et outils de décision qui peuvent servir le mieux pour la résolution du problème, pendant que la deuxième concerne le traitement du problème en soi ; c'est-à-dire évaluation des solutions potentielles à l'aide des méthodes et outils adoptés pour arriver à un compromis satisfaisant.

1.7 SYSTEME D'AIDE A LA DECISION (DSS)

Un système d'aide à la décision (ou DSS – Decision Support System) [8] est un système d'information interactif conçu pour résoudre des problèmes de décision peu ou mal structurés. Les modèles et les approches efficaces d'aide à la décision sont souvent intégrés dans des DSS après leur validation pour faciliter leur mise en œuvre dans les occasions à venir, notamment s'il s'agit d'un problème de nature périodique, d'un délai de résolution limité ou d'un énorme jeu de données impliquant des calculs complexes. Il est à noter qu'un DSS diffère d'un support logiciel d'une

MAMC ; vu que ce dernier est un outil de modélisation généralisé, alors qu'un DSS est une projection informatisée d'un modèle préétabli, qui est conçue pour traiter un problème spécifié d'une manière semi-automatisée et pratique. Il caractérise donc la décision, pas la méthode. Ainsi, il est censé d'être plus simple et plus facile à utiliser, étant donné qu'il est adapté pour la décision concernée en particulier.

1.8 FONCTION MAINTENANCE

La maintenance [9] est définie comme un ensemble d'actions permettant de rétablir ou de maintenir un bien dans état spécifié en vue d'assurer un service spécifié. La fonction maintenance désigne la structure qui prend en charge l'ensemble des processus administratifs et techniques relevant des activités de maintenance. Elle est composée de plusieurs sous-fonctions dont chacune est responsable de gérer un ensemble d'activités dans le cadre de sa mission. Il s'agit d'une structure dynamique qui interagit activement avec les autres fonctions de l'entreprise dans le cadre de la politique globale du travail. Une représentation typique de cette fonction est illustrée dans la figure 1.3 ci-dessous.

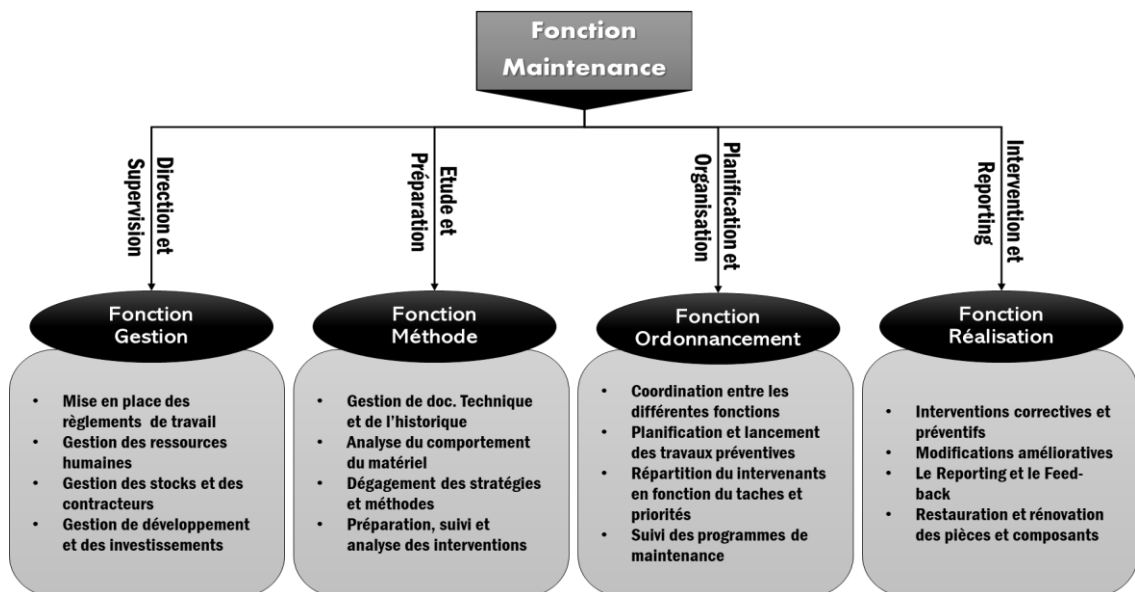


Figure 1.3 Structure de la fonction maintenance

1.9 TYPES DE MAINTENANCE

Selon les politiques et les stratégies adoptées, diverses méthodes de maintenance sont possibles. Ces méthodes sont décrites comme suit [9] :

1.9.1 Maintenance corrective

La maintenance corrective est associée généralement à la stratégie Run-To-Failure (RTF), qui signifie l'exploitation continue du matériel (sans entretien) jusqu'à l'échec. Il s'agit donc du

concept classique de la maintenance ; consistant à intervenir sur tout équipement qui cesse de fonctionner ou perd des propriétés nécessaires à l'accomplissement de sa mission, lors du service. La maintenance corrective est censée résoudre ce problème au plus vite pour réduire les pertes de production. Elle se divise en deux types :

- **Maintenance palliative** : Opérations de dépannage provisoire en mesure de récupérer temporairement la fonction perdue sous l'effet de la défaillance, jusqu'à l'exécution des réparations dans des meilleures conditions.
- **Maintenance curative** : Opérations de réparation définitive, permettant d'éliminer la défaillance et récupérer la fonction perdue, d'une façon permanente.

1.9.2 Maintenance préventive

La maintenance préventive consiste à éviter les pertes provoquées par la défaillance en intervenant avant son occurrence. Il s'agit d'établir une routine pour inspecter l'équipement périodiquement ou en continu, effectuer des opérations d'entretien régulier, et détecter les petits problèmes et les résoudre avant qu'ils s'aggravent. Bien que ce type de maintenance aide à prolonger la durée de vie productive des équipements et réduire les pannes critiques, il nécessite souvent un investissement et une planification pour sa mise en œuvre. La maintenance préventive se divise en 3 types :

- **Maintenance systématique** : Maintenance régulière effectuée, sans vérification a priori de l'état de l'équipement, suivant des déclencheurs basés sur l'utilisation réelle de l'équipement (intervalle périodique de temps, kilométrage parcouru, nombre de pièces produites...). Ses actions sont généralement définies par le constructeur du matériel et peuvent être personnalisées par le département de maintenance de l'organisme exploitant.
- **Maintenance conditionnelle** : Maintenance basée sur la mesure des paramètres significatifs de fonctionnement (niveau d'un consommable, viscosité d'une l'huile ...) et leur comparaison avec une référence qui reflètent les normes applicables. Elle est déclenchée par la détection d'une anomalie qui se traduit par le dépassement d'un seuil prédéterminé. Elle permet d'estimer l'état de l'équipement et de déterminer les opérations d'entretien nécessaires.
- **Maintenance prévisionnelle (prédictive)** : C'est une variante plus avancée de la maintenance conditionnelle. Comme son appellation l'indique, elle cherche à anticiper les défaillances à partir de l'analyse des signes distinctifs de dégradation, donnant la

possibilité d'intervenir au temps opportun à travers la planification des actions par ordre de priorité. A la différence de la précédente, elle permet de passer de l'état constaté à l'état futur du matériel.

1.10 OPERATIONS DE MAINTENANCE

Les opérations principales de maintenance sont identifiées, suivant les types de maintenance définis précédemment et les activités connexes, comme suit [9, 10] :

1.10.1 Opérations de maintenance corrective

- **Le diagnostic** : Conduire une investigation sur l'équipement pour localiser le composant défaillant ou déterminer la cause ayant provoqué le dysfonctionnement.
- **Le dépannage** : Remise en état provisoire suite à une défaillance partielle, avec l'intention de planifier une réparation définitive ultérieurement.
- **Réparation** : Elimination totale de la défaillance et remise en état définitive du matériel.
- **Echange standard** : Remplacement d'un composant défaillant par une pièce identique qu'elle soit neuve ou restaurée.

1.10.2 Opérations de maintenance préventive

- **Visite préventive (révision)** : Examen complet (visite générale) ou partiel (visite limitée) de l'équipement, planifié au préalable selon un échéancier. Sa complexité peut varier de la nécessité d'un simple démontage jusqu'à l'exigence d'une intervention. Les visites de contrôle visent non seulement d'entretenir l'équipement, mais aussi de prendre connaissance sur les lois de dégradation de ses composants.
- **Surveillance de fonctionnement** : Observation de l'état réel d'un matériel et le suivi de l'évolution de sa dégradation, qui s'effectuent en continu ou d'une façon prédéterminée.
- **Inspection** : Ensemble de mesures, observations et tests des caractéristiques significatives d'un équipement pour vérifier sa conformité.

1.10.3 Opérations liées aux activités connexes

- **Amélioration** : Il s'agit d'optimiser la sûreté de fonctionnement d'un équipement, sans altérer sa fonction requise, à travers des mesures administratives et techniques ou de gestion.

- **Modification** : Idem que l'amélioration, sauf que les mesures prises dans ce cas visent à changer la fonction de l'équipement.
- **Modernisation** : Le remplacement des composants et sous-ensembles par des alternatives modernes apportant, grâce à une nouvelle technologie, une expérience améliorée de l'utilisation de l'équipement.

1.11 PRISE DE DECISION DANS LA FONCTION MAINTENANCE

A partir de ce qui précède, on constate que la fonction maintenance prend en charge de nombreuses activités à travers ses différentes sous-fonctions. Parmi celles-ci, on s'intéresse en particulier aux actions concernées par la notion de décision multicritère ; c'est-à-dire celles impliquant des problèmes multidimensionnels ou multidécideurs. La figure 1.4 est une illustration des activités portant ce profil, élaborée à travers l'enrichissement de la représentation de [11] de la fonction maintenance.

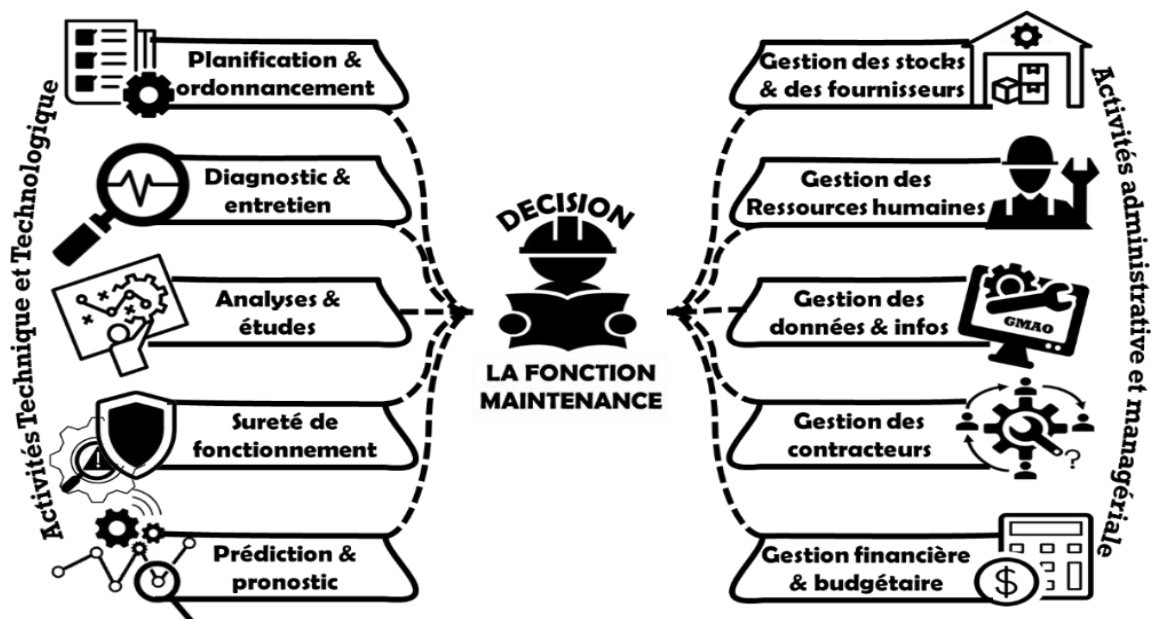


Figure 1.4 Les principaux champs d'action dans la fonction maintenance

En se basant sur les typologies de décision identifiées dans la section 1.6, on peut envisager les aspects de la décision mis en jeu dans les activités illustrées comme suit :

1.11.1 Décisions administratives et managériales

- **La gestion des données et des informations** : Une bonne maintenance nécessite la bonne gestion des données pertinentes telles que les historiques des interventions, les dossiers d'équipements et la documentation technique. La décision intervient à ce niveau à travers la sélection des systèmes d'information et des supports de traitement des

données à adopter à cet égard (progiciels, DSS, ...). Un exemple très connu qui incarne cette pratique est le choix d'un système de gestion de maintenance assisté par ordinateur (GMAO), où de nombreux facteurs sont mis en jeu tels que le coût, la facilité d'utilisation, les fonctionnalités incluses, ... etc.

- **La gestion des ressources humaines :** La décision intervient ici à travers l'attribution des affectations et des missions du personnel selon les compétences et les qualifications, afin de placer le bon homme dans la bonne place, y compris le recrutement des nouveaux employés. Cela comprend aussi l'évaluation des performances du personnel (suivant la discipline, la ponctualité, la qualité du travail réalisé...) dans le but d'identifier et remédier les faiblesses, d'une part, et de déterminer les bénéficiaires des promotions et primes, d'autre part.
- **La gestion des stocks et des fournisseurs :** Le magasin de maintenance est régi par les moyens et les ressources mis à sa disposition. Par conséquent, les articles de stock (pièces de rechange, consommables, outillage...) prioritaires à acquérir font objet d'un processus de décision qui prend en compte plusieurs caractéristiques telles que le coût, la demande et la criticité. De même pour la sélection des fournisseurs à travers l'évaluation de leurs offres, leur réputation, la ponctualité de livraison ... etc.
- **La gestion des contracteurs :** En raison du manque d'expérience, de ressources, de capacités ou de compétences, les responsables de maintenance recourent souvent à des services externes. Ces services peuvent aller d'une simple mise en place d'une installation ou d'un système de maintenance, à une formation du personnel, jusqu'à la prise en charge partielle ou totale des interventions (externalisation partielle ou complète). Le choix d'une offre de prestation de services constitue donc une décision délicate qui dépend de nombreux facteurs, à titre d'exemple : la réputation, les qualifications et le coût.
- **Gestion financière et budgétaire :** Il s'agit de l'affectation des budgets aux différentes sous-fonctions et services, ainsi que les décisions d'investissement dans des projets internes ayant pour but l'extension du département de maintenance en termes de moyens et de capacités. D'un point de vue économique, le choix d'une GMAO peut être aussi considéré comme un investissement. Cela s'applique également pour les décisions liées à l'acquisition de tout matériel pouvant être avantageux pour de la maintenance (outils, systèmes, matériels de surveillance ...), ainsi que le choix d'une formation professionnelle au profit du personnel de maintenance.

1.11.2 Décisions techniques et technologiques

- **La planification et l'ordonnement :** La décision ici concerne la hiérarchisation des interventions et leur planification. Vu que les travaux de maintenance, notamment ceux de nature préventive, ne peuvent pas cibler tous les équipements simultanément, un protocole de décision est généralement mis en place pour dégager les priorités par ordre de criticité. D'autre part, les travaux périodiques sont censés d'être effectués au temps opportun. La décision est donc aussi concernée par la sélection des intervalles de leur périodicité.
- **Le diagnostic et l'entretien :** Le but du diagnostic est de déterminer le problème ayant produit le dysfonctionnement du matériel, à partir de l'analyse des symptômes. Par conséquent, il peut être considéré comme un processus de décision multicritères où les critères sont les symptômes notés et les alternatives sont les causes potentielles de la défaillance ou les composants susceptibles de l'avoir provoqué. Ainsi, en substituant les critères, un processus similaire peut être conduit pour évaluer l'état des équipements et élaborer leur programme de maintenance en conséquence.
- **Les analyses et les études :** Il s'agit ici de la sélection des stratégies globales de maintenance (maintenance basée sur la fiabilité, maintenance totale productive ...) et de recommander les méthodes convenant le mieux à chaque équipement (maintenance corrective, maintenance systématique, maintenance conditionnelle ...). Cela nécessite des études approfondies, vu que chaque stratégie ou méthode est caractérisée par des propriétés spécifiques (degrés de complexité, cout d'implémentation, avantages...). D'où, on touche l'importance de l'aide à décision à ce niveau. D'autre part, les données de maintenance sont exploitées régulièrement par des audits et des évaluations globales ou partielles, dans le but d'identifier les aspects à optimiser. Ce qui peut faire objet d'une analyse multicritères centrée sur des facteurs exprimant les dépenses et le rendement.
- **L'évaluation de la sûreté de fonctionnement :** Cela comprend l'évaluation des risques (critique, admissible, négligeable ...), qu'ils soient liés aux défaillances ou à la sécurité des opérateurs et des machines. Cela passe par l'analyse des modes de défaillance affectant les composants d'équipements pour déterminer lesquels doivent être réparés, lesquels doivent être remplacés carrément et lesquels sont en état admissible. L'AMDEC est parmi les méthodes très connues qui ont été conçues pour s'occuper de ces analyses. Cette méthode repose déjà sur 3 critères, à savoir : la probabilité de

défaillance, sa détectabilité et sa gravité, ce qui met en évidence l'aspect multicritère de la décision à ce niveau.

- **La prédiction et le pronostic :** Il s'agit essentiellement ici de la sélection des méthodes de contrôle non destructif à utiliser pour vérifier l'intégrité d'un équipement (examen visuel, ressuges, radio, vibratoire ...). Cela implique également les choix des techniques et technologies de surveillance à adopter pour l'implémentation d'une maintenance prédictive.

1.12 PROCESSUS D'ANALYSE MULTICRITERE DE LA DECISION

Le processus de décision est un plan de travail qui permet de sélectionner une action à partir d'un ensemble d'alternatives, d'une manière systématique et logique. Pour des fins d'illustration, nous adoptons la représentation de Guitouni [3] (Figure 1.5), qui est très explicite en ce qui concerne le déroulement de ce processus.

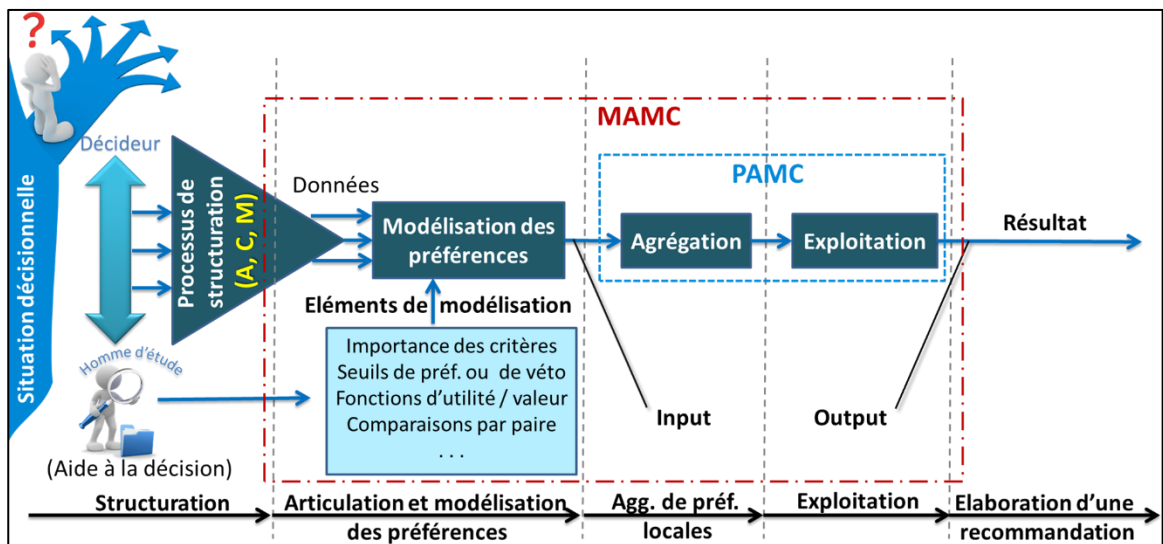


Figure 1.5 Représentation du processus de décision (retravaillé à partir de [3])

A travers la figure 1.5, 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.

1.13 CONCLUSION

A travers ce chapitre, nous avons défini les concepts de base de la décision, ainsi que ses formes et typologies, ce qui nous a permis d'envisager la manière avec laquelle elle agit sur les différentes activités de maintenance.

On aperçoit clairement un chevauchement entre les différentes activités qui ont été esquissées, ce qui signifie la multitude des acteurs impliqués, et donc la multiplicité des critères à retenir dans la prise des décisions pertinentes.

La décision multicritère est caractérisée par un degré de complexité plus élevé que celui de la décision monocritère, en raison des conflits qui se produisent entre les différents facteurs mis en jeu, ainsi que les acteurs impliqués dans le processus de décision.

L'aide à la décision se traduit par un processus d'analyse multicritère qui permet de modéliser le problème et assister le décideur en employant des méthodes systématiques bien structurées, permettant ainsi de fournir des recommandations et des éclaircissements.

Chapitre 2: Recherche Bibliographique

L'implication de plusieurs facteurs conflictuels dans le processus de décision fait partie des principales propriétés qui caractérisent l'ingénierie de maintenance et constituent sa complexité. Par conséquent, les praticiens de maintenance font souvent appel aux MAMC pour assurer l'efficacité des actions prises de leur part. Afin de faire face à la compétitivité croissante, les MAMC ont été introduites dans presque tous les centres d'action de la fonction maintenance, donnant naissance à plusieurs modèles sur les différents champs de décision dans cette fonction. Ce chapitre vise à évaluer le développement dans ce contexte à travers une analyse d'état de l'art, dans le but d'identifier des éventuels aspects de recherche à cibler dans cette thèse.

2.1 METHODOLOGIE DE LA RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

L'apport important de l'analyse multicritère dans la fonction maintenance l'a mis au centre d'attention des chercheurs. Cela est concrétisé par l'évolution très rapide de son produit scientifique, qu'on la note clairement à travers la variété des approches proposées ; que ce soit en termes de méthodes utilisées ou bien en termes de centres décisionnels abordés par cette technique. Dans ce chapitre, on cherche à conduire une analyse d'état de l'art actualisée sur le développement dans ce contexte, en passant en revue plus de 145 travaux scientifiques publiés entre 1992 et 2020 ; soigneusement sélectionnées afin de composer une base solide sur notre sujet de recherche. D'abord, une exploration généralisée des recherches connexes a été menée à l'aide des mots-clés combinant les notions de maintenance et de décision. Puis, la collection obtenue a été enrichie en exploitant les activités en relation ; que nous avons identifiées dans le premier chapitre, comme repères pour une fouille plus approfondie. Enfin, les études rassemblées ont été triées afin de ne retenir que celles à forte pertinence.

Les études concernant la phase qui précède la mise en service des équipements (tels que l'optimisation de la fiabilité lors de leur conception) ont été exclus. Bien que certains chercheurs les classent sous la case de la maintenance améliorative ; qui s'inscrit sous les activités connexes de maintenance, nous voyons qu'ils font partie des intérêts du constructeur ou, dans certains cas particuliers, du département de recherche et développement plutôt que de maintenance. La contribution de ce dernier dans cet aspect se limite sur le reporting et le feed-back, uniquement, ou des modifications mineures ciblant les équipements qui sont déjà mis en service. Dans le but de donner une vue plus large au lecteur, la variété et la multitude ont été prises en considération pendant la sélection des travaux, incluant tous les centres d'action dans la fonction maintenance qu'ils soient techniques et technologiques ou administratifs et managériaux, et rassemblant des cas d'étude à partir des départements de maintenance de divers secteurs (industriel, sanitaire, énergétique et de services). Dans la suite de ce chapitre, un code descriptif de classification est développé permettant d'identifier à la fois la décision concernée au sein de la fonction de maintenance, et la (ou les) MAMC utilisée(s) pour l'adresser dans chaque travail analysé. Ainsi, nous conduisons une étude statistique et analytique sur l'ensemble des travaux, révélant des lignes directrices pour la modélisation des décisions et fournissant des solutions pratiques pour surmonter les difficultés rencontrées au cours du processus ; telles que le manque de données et la présence d'incertitudes ainsi que la sélection, la pondération et la quantification des critères.

2.2 ANALYSE DES TRAVAUX DE SYNTHÈSE EXISTANTS

La littérature comprend déjà pas mal de « reviews » qui portent sur l'aide à la décision de dans la fonction maintenance, Dekker [12] a présenté un aperçu global sur les modèles d'optimisation de maintenance, y compris les toutes premières approches d'aide à la décision, pendant que Pintelon et Gelders [13] et Sherwin [14] ont évalué l'ensemble des modèles relevant à la prise de décision dans le management de maintenance. Cependant, aucun de ces travaux n'a porté sur les travaux basés sur les MAMC. Ces derniers faisaient encore leurs premières apparitions dans le domaine de maintenance ; leurs applications étaient limitées sur la gestion des stocks de rechange et la planification préventive. En effet, même après l'usage très répandu des MAMC dans les applications de maintenance de nos jours, seulement peu de revues connexes ont porté sur ce sujet et souvent partiellement. Parmi celles-ci, celle de Garg et Deshmukh [15], qui ont référé à la logique floue (Fuzzy) en tant qu'un outil de décision multicritères, tandis qu'ils ont adressé AHP plutôt comme une méthode d'optimisation. Par contre, Sharma et al. [16] ont abordé les deux techniques d'une perspective multicritères. Dans le même contexte, Mahfoud et al. [17] ont examiné exclusivement les approches d'optimisation de maintenance appliquées au secteur médical ; en mettant l'emphase sur les modèles multicritères, tandis que Roda et al. [18] ont discuté des modèles liés uniquement à la gestion des pièces de rechange. D'autre part, Chong et al. [19] ont passé en revue les critères et les méthodes de priorisation de maintenance, pendant que Hong et al. [20] ont présenté une revue des approches de sélection des stratégies de maintenance, en focalisant sur les modèles multicritères. Par ailleurs; Thor et al. [21] ont comparé les MAMC souvent employées dans ce contexte. Un travail similaire a été présenté dans Moya [22] synthétisant les méthodes utilisées et les critères retenus en se basant sur une sélection des travaux connexes, idem que Shafiee [23] qui a présenté une vue d'ensemble en s'articulant sur les statistiques et les classifications menées sur les approches examinées.

Notons que tous les travaux de revue précédemment cités sont centrés sur des problématiques décisionnelles spécifiques ; où il s'agit souvent de la problématique de sélection des stratégies de maintenance, alors qu'en réalité l'approche multicritère intervient à plusieurs niveaux de décision dans la fonction maintenance. En fait, peu de chercheurs ont conduit des revues généralisées dans ce contexte. Parmi ceux-ci, Sabaei et al. [24] ; qui ont évalué les MAMC fréquemment utilisées dans les travaux de maintenance dans l'ensemble. Ce travail comprenait des comparaisons entre ces méthodes ainsi que des classifications de plusieurs égards. Cependant, il se limitait à étudier seulement les méthodes AHP, PROMETHEE, ELECTREE et dans une moindre mesure MAUT. La revue présentée dans [25] semble à être la plus riche dans ce contexte,

vu qu'elle est basée sur l'évaluation de 186 articles scientifiques publiés entre 1978 et 2013, portant sur l'utilisation des modèles multicritères et les modèles multi-objectifs dans les études de maintenance et de fiabilité des équipements. Les auteurs ont fourni quelques statistiques et recommandations intéressantes concernant les méthodes utilisées dans les travaux examinés. Cependant, l'étude proposée repose sur un grand nombre de modèles d'optimisation de fiabilité qui concernent la phase de conception et développement des équipements, ce qui ne fait pas partie des missions de la fonction maintenance.

Nous évaluerons par la suite les recherches liées exclusivement aux activités de maintenance afin de fournir une analyse précise et détaillée sur l'utilisation des MAMC dans ce domaine. Cette étude vise à combler les écarts entre les revues précédemment citées en abordant les points manqués tels que l'identification des différents centres de décision étudiés, les MAMC récemment portées à la maintenance, les modèles hybrides et les solutions pour contourner les difficultés rencontrées lors du processus de modélisation (manque de données, incertitudes, validation des résultats...). Par ailleurs, une étude statistique et analytique détaillée est menée pour extraire les informations essentielles des études analysées, englobant non seulement les techniques utilisées, mais également une synthèse référencée des critères retenus dans ces études, ce qui permet d'identifier les facteurs impliqués à chaque niveau de décision dans la fonction maintenance.

2.3 ANALYSE DES TRAVAUX DE RECHERCHE EXISTANTS

2.3.1 Identification des problématiques ciblées par les travaux

Dans notre étude, 145 articles de recherche, ciblant des départements de maintenance appartenant à divers secteurs vitaux, ont été sélectionnés pour l'examen. La répartition des travaux par secteur ciblé est illustrée dans la figure 2.1.

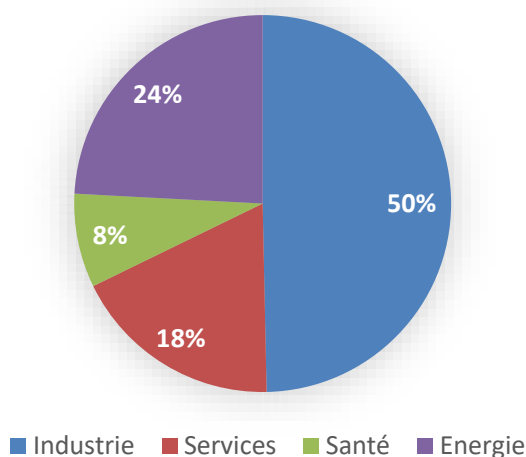


Figure 2.1 Répartition des travaux analysés selon le secteur d'appartenance

L'analyse préliminaire de ces travaux permet d'identifier les champs de décision concernés par les approches proposées et de les catégoriser en conséquence (Figure 2.2).

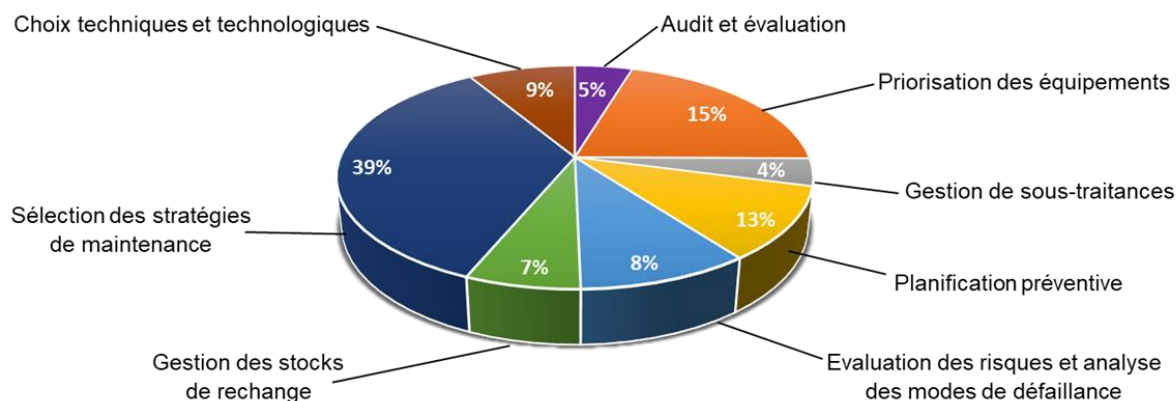


Figure 2.2 Répartition des travaux selon les champs de décision ciblés

La figure 2.2 montre que les travaux examinés sont regroupés suivant 8 champs de décision:

1. **Audit et évaluation de maintenance** : parmi les centres d'action dans lesquels les MAMC ont été récemment introduites, c'est pourquoi il est sujet de seulement 5% des travaux examinés. Ce champ englobe principalement les recherches liées à l'évaluation du déploiement de la fonction de qualité de maintenance, ainsi qu'à l'estimation de la performance globale de la fonction maintenance ou de ses sous-fonctions (ex : l'évaluation de la performance du personnel de maintenance).
2. **Gestion de sous-traitances** : objet de seulement 4% des études examinées, les décisions à ce niveau sont beaucoup plus administratives que techniques. Elles concernent le choix d'une stratégie d'externalisation de maintenance ou la sélection d'un contacteur (sous-traitant) de maintenance à partir d'une liste de candidats.
3. **Priorisation des équipements critiques** : objet de 15% des recherches proposées, il représente les approches ciblant la classification des équipements (ou composants pour systèmes complexes) par ordre de criticité, afin de définir les actions prioritaires de maintenance. Les décisions à ce niveau sont indispensables pour piloter les activités de maintenance telles que la planification préventive, l'approvisionnement en pièces de rechange et la sélection des stratégies de maintenance.
4. **Planification préventive de maintenance** : englobe les travaux concernant la sélection des intervalles des remplacements préventifs et des visites d'inspection ou le choix d'une politique de planification de maintenance (telle que [26]: la politique d'ordre global de maintenance, la politique d'ordre de fiabilité ou celle basée sur la

valeur). Ce centre de décision attire une attention croissante ; qui se reflète sur 13% des travaux examinés, vu qu'il contribue de manière significative à l'optimisation de l'efficacité de la maintenance et la rentabilité de ses actions.

5. **La sélection des stratégies de maintenance** : il s'agit d'attribuer la stratégie de maintenance qui s'adapte le mieux à chaque équipement afin d'optimiser sa performance, ce centre décisionnel est fortement lié aux centres 3 et 7. Les décisions à ce niveau affectent grandement la qualité de la maintenance et l'efficacité de ses activités, c'est pourquoi la majorité des recherches proposées (environ 39%) ont adressé ce sujet.
6. **Choix techniques et technologiques** : ciblé par 9% des approches évaluées, il représente la sélection des investissements de maintenance et ses projets technologiques ; ces décisions sont connues par leur complexité, car elles sont liées à plusieurs facteurs. Ce centre rassemble divers problèmes comme le choix d'un progiciel de gestion de maintenance assistée par ordinateur (GMAO) à implémenter, la sélection d'un système de nettoyage pour un équipement sensible, et la sélection des techniques de diagnostic appropriées et des technologies à adopter dans le cadre de la mise en place d'un programme de maintenance prédictive.
7. **Évaluation des risques et analyse des modes de défaillance** : il représente 8% des approches proposées, les décisions à ce niveau ciblent les équipements avec des faibles performances en mesure d'analyser leur sûreté de fonctionnement et investiguer leurs modes de défaillances ainsi que leurs causes et conséquences. Les approches proposées dans ce contexte sont généralement soit des modifications de l'AMDEC classique, soit des alternatives modernes qui permettent de prendre en compte des facteurs autres que les trois paramètres usuels de l'AMDEC (à savoir, le taux d'occurrence de défaillance, sa détectabilité et sa gravité).
8. **Gestion des stocks de rechange** : parmi les premiers centres de décision de maintenance qui ont été abordés par une perspective multicritère, il représente 7% des travaux analysés. Les décisions à ce niveau consistent soit à affecter une politique de stockage prédéfinie pour chaque pièce de rechange, soit à construire une politique personnalisée en définissant la quantité requise de chaque pièce selon les facteurs mis en jeu.

2.3.2 Synthèse des travaux de recherche examinés

Les tableaux 2.1 - 2.8 synthétisent les travaux examinés en fonction des techniques utilisées et des centres de décision adressés. Les méthodes utilisées comme techniques principales de modélisation sont indiquées par le symbole (●), pendant que celles introduites pour effectuer des fonctions complémentaires connexes sont indiquées par des lettres en italique ; ces fonctions comprennent principalement : la pondération des critères (*P*), l'ajout du support de multidécideurs (*G*), l'optimisation du modèle (*O*), la validation des résultats obtenus (*V*) et l'évaluation des critères complexes ou intangibles (*E*). Le signe (**X**) restant, correspondant aux références écrites en gras, marque les approches implémentées en parallèle et les démarches comparatives ; dans lesquelles des comparaisons sont établies soit entre un nouveau modèle développé et un autre déjà existant dans la littérature pour valider les résultats, ou bien entre de multiples modèles proposés en parallèle afin de les évaluer. Enfin, il est à noter qu'il existe des travaux ciblant plusieurs centres de décision simultanément à travers une approche multiniveau ; ces travaux représentent les références dupliquées dans les tableaux.

Tableau 2.1 Méthodes employées dans les travaux d'évaluation des risques

MAMC utilisées Travaux	AHP	ANP	GRA	Z - GRA	Z - SWARA	CP	PSI	MAUT	Fuzzy rules	VIKOR	RPN/RPI (EMECA)	TOPSIS	Fuzzy TOPSIS	AV - TOPSIS	ELECTRE II	PROMETHEE II	COPRAS -G	HRPV (LRPN + ANP + DEMATEL)
[27]	<i>P</i>								●									
[28, 29]	●																	
[30]											X	X	X					
[31, 32]												●						
[33]						X				X		X		X				
[34]	<i>P</i>										X	X			X			
[35]							X				X	X					X	
[36]								●										
[37]	<i>P</i>										X							
[38]			X			X										X	X	
[39]		<i>P</i>																●
[40]				●	<i>P</i>													

Tableau 2.2 Méthodes employées dans les travaux de planification préventive

MAMC utilisées	AHP	GP	VIKOR	TOPSIS	Fuzzy TOPSIS	Méthode de variance	Pareto Frontier	Fonction d' utilité /MAUT	PROMETHEE			ELECTRE		
									PROMETHEE II	PROMETHEE III	PROMETHEE -GAIA	ELECTRE II	ELECTRE III	
Travaux														
[41-43]								•						
[44-46]														
[47]	P			•		P								
[48]		•												
[26]	X			X										
[49]							O							
[50]	P							X					X	
[51]	P		X					E	X					
[52]										•				
[53]												V		
[54]							•							
[55]					•									

Tableau 2.3 Méthodes employées dans les travaux de priorisation de maintenance

MAMC utilisées	AHP	Fuzzy AHP	FPP	ANP	MCA	MCCE	Fuzzy rules	TOPSIS	Fuzzy TOPSIS	VIKOR	ELECTRE I	Méthode Agrégée	CM / CI (RPN/RPI)	FBC	GTMA	PROMETHEE		
																Fuzzy PROMETHEE-GT	PROMETHEE II	PROMETHEE - GAIA
Travaux																		
[56-63]	•																	
[64, 65]																		
[66]													X					•
[67]						•												X
[68]	X	X																•
[69, 70]	P	P	P															•
[71]								•										•
[72, 73]	P							•										•
[74]																		•
[75]								X		X	X	X						•
[76]		P							•									•
[77]	E				•													•
[78, 79]				•														•
[80]																		•
[81, 82]																		•
[83]	P																	•
[84]	X														X			•
[85]																		•
[86]	P																	•

*Le "P" doublé correspondant à la référence [71] indique la combinaison de plusieurs techniques de pondération

Tableau 2.4 Méthodes employées dans les travaux de sélection des stratégies

MAMC utilisées Travaux	Fuzzy rules	Fuzzy CODAS	AHP	Fuzzy AHP	ANP	Fuzzy ANP	VIKOR	Fuzzy VIKOR	MAUT	MPLP	MACBETH	PROMETHEE II	ELECTRE II	GP	FPP	Fuzzy SAW	COPRAS	DEMATEL	TOPSIS	Fuzzy TOPSIS	GRA - TOPSIS	C-B ratio	Integral value	Graph methods											
																								L/S Graph	DMG	IKD									
[87-89]				P																															
[90]				X								X																							
[72, 91, 92]				•										O																					
[93]				P			X														X		X										X	X	
[94]																																			
[95-97]		•										•																							
[98, 99]																																			
[82, 100-103]				•																															
[104]				X	X																														
[105]				X		X																													
[106]																																			
[107]		•		P									•																						
[58]																																			
[108]														O																					
[109]																																			
[110-112]						•																													
[113, 114]																																			
[115]					P														•																
[116]					P			X													X														
[117]						P																													
[118]						•																													
[119-121]																																			
[122]						•														O															
[123]	X			P																															
[124]			X	X	X	X									O																				
[125]								•																											
[126]																																			
[127]				X	P																														
[128]				P																															
[129]	X																X																		
[130]																																			
[131]		•																																	
[132]																																			
[133]				X	X																														
[134]				X																															
[135]				P									X																						
[136]																																			

Tableau 2.5 Méthodes employées dans les travaux d'audit et évaluation de maintenance

MAMC utilisées Travaux	AHP	Fuzzy AHP	MACBETH	Fuzzy GRA	MAUT	VIKOR
[137]		P			•	
[138]		•				
[139]			•			
[140, 141]	•					
[142]		P				•
[143]		P		E		•

Tableau 2.6 Méthodes employées dans les travaux de gestion de sous-traitances

MAMC utilisées	AHP	GRA	0 & 1 Programming (Weighted Objective Method)	Utility Functions / MAUT
Travaux				
[144] [145] [146] [147-149]	•	•	•	•

Tableau 2.7 Méthodes employées dans les travaux de gestion des stocks de rechange

MAMC utilisées	AHP	Fuzzy AHP	Fuzzy ANP	Fuzzy rules	Fuzzy TOPSIS	MAUT	Analyse ABC agrégée	Arbre / cube de décision	Pareto Frontier
Travaux									
[150, 151] [152] [153] [144] [154-156] [157] [54]	• <i>E</i>	•	<i>P</i>	X	•	•	X	•	•

Tableau 2.8 Méthodes employées dans les travaux des choix techniques et technologiques

MAMC utilisées	AHP	Fuzzy AHP	Fuzzy TOPSIS	GRA - TOPSIS	Fuzzy VIKOR	Fonctions d' utilité / MAUT	ELECTRE II	COPELAND
Travaux								
[158] [159] [160] [161] [162-166] [167] [168] [169] [170]	 <i>P</i> •	X • <i>P</i>	X • •	 X	 X	•	• •	 <i>G</i>

2.4 VUE D'ENSEMBLE

Le tableau 2.9 présente une étude statistique sur les travaux examinés, permettant de distinguer le taux d'utilisation de chaque méthode à la fois en tant que technique principale de modélisation (valeurs en gras) et en tant que technique secondaire (valeurs entre parenthèses) pour gérer une des fonctions complémentaires mentionnées précédemment (dans les modèles hybrides). À la lumière de ces statistiques, nous aborderons dans les sous-sections suivantes les principales

astuces et observations tirées des travaux examinés concernant le processus de modélisation de la décision multicritère.

Tableau 2.9 Etude statistique sur l'emploi des MAMC dans les travaux examinés

Centres décisionnels (Niveaux de décision)		Audit et évaluation	Priorisation des équipements	Gestion de sous- traitance	Planification préventive	Evaluation des risques	Gestion des stocks	Selection des stratégies	Choix techniques
AHP 52 (34)	AHP 40 (24)	2 (1)	11 (7)	3 (0)	1 (3)	2 (3)	2 (3)	14 (7)	5 (1)
	Fuzzy AHP 12 (11)	1 (3)	1 (2)	/	/	/	1 (0)	7 (5)	2 (1)
TOPSIS 34 (0)	TOPSIS 19 (0)	/	4 (0)	/	2 (0)	4 (0)	/	9 (0)	/
	Fuzzy TOPSIS 12 (0)	/	1 (0)	/	1 (0)	1 (0)	1 (0)	5 (0)	3 (0)
	AV-TOPSIS 1 (0)	/	/	/	/	1 (0)	/	/	/
	GRA-TOPSIS 2 (0)	/	/	/	/	/	/	1 (0)	1 (0)
PROMETHEE 17 (2)	PROMETHEE II 15 (0)	/	5 (0)	/	6 (0)	2 (0)	/	2 (0)	/
	PROMETHEE III 1 (0)	/	/	/	1 (0)	/	/	/	/
	PROMETHEE-GAIA 0 (2)	/	0 (1)	/	0 (1)	/	/	/	/
	Fuzzy PROMETHEE-GT 1(0)	/	1 (0)	/	/	/	/	/	/
Méthodes basées sur la logique floue (Fuzzy) ou l'analyse relationnelle grise (GRA) 12 (1)	Fuzzy rules 5 (0)	/	1 (0)	/	/	1 (0)	1 (0)	2 (0)	/
	Fuzzy distance 3 (0)	/	/	/	/	/	/	3 (0)	/
	FRMIC 1 (0)	/	/	/	/	/	1 (0)	/	/
	Valeur intégrale 1 (0)	/	/	/	/	/	/	1 (0)	/
	GRA 1 (0)	/	/	1 (0)	/	/	/	/	/
	Fuzzy GRA 0 (1)	0 (1)	/	/	/	/	/	/	/
ANP 11 (3)	ANP 7 (2)	/	2 (0)	/	/	0 (1)	/	5 (1)	/
	Fuzzy ANP 4 (1)	/	/	/	/	/	0 (1)	4 (0)	/
MAUT / fonctions d'utilité 10 (2)	1 (0)	/	1 (0)	4 (1)	1 (0)	1 (0)	1 (0)	1 (0)	1 (0)
VIKOR 9 (0)	VIKOR 7 (0)	2 (0)	1 (0)	/	1 (0)	1 (0)	/	2 (0)	/
	Fuzzy VIKOR 2 (0)	/	/	/	/	/	/	1 (0)	1 (0)
ELECTRE 7 (0)	ELECTRE I 1 (0)	/	1 (0)	/	/	/	/	/	/
	ELECTRE II 4 (0)	/	/	/	1 (0)	1 (0)	/	/	2 (0)
	ELECTRE III 2 (0)	/	/	/	1 (0)	/	/	1 (0)	/
Méthodes de programmation linéaire 5 (8)	0 & 1 Programming 1 (0)	/	/	1 (0)	/	/	/	/	/
	GP 1 (4)	/	/	/	1 (0)	/	/	0 (4)	/
	CP 1 (0)	/	/	/	/	1 (0)	/	/	/
	MILP 0 (1)	/	/	/	/	/	/	0 (1)	/
	FPP 0 (2)	/	0 (1)	/	/	/	/	0 (1)	/
Pareto-front 2 (1)	/	/	/	1 (1)	/	1 (0)	/	/	
MACBETH 5 (0)	1 (0)	/	/	/	/	/	/	4 (0)	/
Méthodes classiques 11 (0)	CM / CI (RPN / RPI) 8 (0)	/	4 (0)	/	/	4 (0)	/	/	/
	Analyse ABC agrégée 1 (0)	/	/	/	/	/	1 (0)	/	/
	C-B Ratio 2 (0)	/	/	/	/	/	/	2 (0)	/
Méthodes graphiques 6 (0)	Graph Linéaire/Spider 1 (0)	/	/	/	/	/	/	1 (0)	/
	Diagramme Jack-Knife 1 (0)	/	/	/	/	/	/	1 (0)	/
	Arbre/Grille de décision 4 (0)	/	/	/	/	/	3 (0)	1 (0)	/
Méthodes récentes 4 (0)	PSI 1 (0)	/	/	/	/	1 (0)	/	/	/
	MCCE 1 (0)	/	1 (0)	/	/	/	/	/	/
	MCA 1 (0)	/	1 (0)	/	/	/	/	/	/
	HRPV 1 (0)	/	/	/	/	1 (0)	/	/	/

Tableau 2.9 Etude statistique sur l'emploi des MAMC dans les travaux examinés (Suite)

Centres décisionnels (Niveaux de décision)		Audit et évaluation	Priorisation des équipements	Gestion de sous-traitance	Planification préventive	Evaluation des risques	Gestion des stocks	Selection des stratégies	Choix techniques
Méthodes avec taux d'utilisation: Comme méthode principale (Comme technique complémentaire)									
Autres méthodes 9 (3)	FBC 1 (0)	/	1 (0)	/	/	/	/	/	/
	Fuzzy SAW 4 (0)	/	/	/	/	/	/	4 (0)	/
	Méthode agrégée 1 (0)	/	1 (0)	/	/	/	/	/	/
	Copeland 0 (1)	/	/	/	/	/	/	/	0 (1)
	COPRAS 1 (0)	/	/	/	/	/	/	1 (0)	/
	COPRAS-G 1 (0)	/	/	/	/	1 (0)	/	/	/
	Fuzzy CODAS 1 (0)	/	/	/	/	/	/	1 (0)	/
	Z – SWARA 0 (1)	/	/	/	/	0 (1)	/	/	/
	DEMATEL 0 (1)	/	/	/	/	/	/	0 (1)	/
GTMA 1 (0)	/	1 (0)	/	/	/	/	/	/	

Dans la sous-section suivante, une interprétation de ces statistiques est présentée avec une brève explication du concept de chaque méthode. En raison du grand nombre de méthodes, nous nous limitons ici à expliquer leur principe et quelques constatations intéressantes qui servent de lignes directrices d'application. Les méthodes phares seront discutées en détail dans le chapitre qui suit, y compris leurs formulations mathématiques. Quant au reste des méthodes, ces compléments peuvent être facilement trouvés dans la littérature (à titres d'exemple, la réf. [171]).

2.4.1 Méthodes utilisées

Le tableau 2.9 montrent qu'AHP est la méthode la plus utilisée à la fois en tant que modèle unique et dans les modèles hybrides, cela peut être dû à sa flexibilité qui l'aide à s'adapter facilement à des problématiques diverses que ce soit la nature des critères retenus (qualitatifs ou quantitatifs), ce qui justifie sa présence dans tous les 8 centres de décision. Une raison de plus est sa facilité de mise en œuvre qui s'articule sur la décomposition d'un problème complexe sous forme d'une hiérarchie simplifiée de plusieurs niveaux, allant des alternatives (le niveau inférieur), passant par les critères (le niveau intermédiaire), et arrivant enfin à l'objectif (le niveau supérieur), où les éléments de chaque niveau sont évalués par rapport aux éléments du niveau supérieur à travers des comparaisons binaires. Cela permet non seulement d'évaluer les alternatives par rapport aux critères, mais aussi de pondérer ces derniers par rapport à l'objectif ciblée. Ainsi, grâce à la compatibilité d'AHP avec les entrées floues (Fuzzy), il est possible d'ajuster la précision des jugements / poids résultants en utilisant des nombres flous au lieu des valeurs nettes. Ces avantages sont les raisons principales derrière son large emploi comme technique complémentaire aussi (dans les modèles hybrides). Notons qu'il existe une généralisation de la méthode AHP connue sous la

nomination ANP qui permet l'interdépendance entre les éléments de la hiérarchie ; constituant un réseau dans lequel les critères sont aussi évalués par rapport aux alternatives. Cette méthode s'applique donc dans certains cas spécifiques nécessitant cette fonctionnalité ; où le changement des alternatives oblige le décideur à réviser ses priorités, Ce qui justifie pourquoi ses applications dans la maintenance sont très limitées par rapport à AHP. TOPSIS par contre, vient en deuxième position selon le tableau 2.9, elle est souvent combinée avec la logique floue (Fuzzy), GRA ou AV en mesure d'adresser les incertitudes. L'avantage principal en faveur de cette méthode est sa capacité de traiter les données d'une manière fiable et directe sous des critères tangibles, permettant de parvenir à une solution satisfaisante, quel que soit leur nombre d'éléments à évaluer [47]. Cela est achevé à travers la mesure de la distance euclidienne entre les alternatives de telle façon que la solution choisie soit la plus proche de la solution dite positive idéale (la meilleure sur tous les critères) et la plus loin de la solution dite négative idéale (la mauvaise sur tous les critères). Ensuite, on retrouve PROMETHEE avec ses 3 versions ; dont la 1ère (PROMETHEE I) consiste à ranger les actions suivant un préordre partiel qui mène à l'incomparabilité, la 2ème (PROMETHEE II) permet de ranger les actions potentielles selon un préordre total (modèle traditionnel) pendant que la 3ème (PROMETHEE III) conduit à un ordre d'intervalle (modèle à seuil variable). C'est une famille de méthodes largement utilisée non seulement dans la maintenance, mais dans toutes les disciplines, malgré sa complexité par rapport aux méthodes précédentes, elle reste quand même facile à implémenter grâce au support informatique assez convivial qu'elle possède [64] et au bon rapport qu'elle fournit entre la facilité de mise en œuvre et la fiabilité des résultats par rapport à son homologue plus complexe ; la famille de méthodes ELECTRE. Cette dernière possède un degré de confiance élevé dans les cas avec un grand nombre d'alternatives et peu de critères [172], cependant son fondement mathématique, reposant sur la mesure des concordances et discordances entre les actions, demeure assez compliqué, c'est la raison pour laquelle son utilisation est faible en comparaison avec PROMETHEE. Comme cette dernière, elle figure dans les travaux examinés en 3 versions aussi ; dont la 1ère s'applique aux problématiques de choix pendant que les deux autres s'adressent aux problématiques de rangement. Loin des méthodes de surclassement de synthèse, on aperçoit que la logique floue (Fuzzy) et l'analyse relationnelle grise (GRA) s'affichent dans de nombreuses applications à travers un ensemble de techniques assez performantes, en particulier pour le traitement des situations avec des données manquantes ou des critères qualitatifs, vu qu'elles permettent de compenser les incertitudes présentes dans les jugements subjectifs des experts d'évaluation. La technique de moyennage (AV) peut être employée aussi dans ce sens pour agréger les valeurs imprécises des scores d'évaluations fournis par les experts individuels [33]. La capacité de ces

techniques d'optimiser les résultats en termes de précision et de justesse à travers la compensation des incertitudes est la raison pour laquelle elles sont souvent combinées avec diverses méthodes (Fuzzy AHP, AV-TOPSIS, GRA-TOPSIS, ... etc.). Cependant, elles présentent quelques difficultés dans la détermination des échelles d'évaluation des critères ; vu qu'elles n'utilisent pas des valeurs nettes, leur implémentation peut donc être relativement compliquée. C'est un inconvénient qu'elles partagent avec la méthode MAUT. Cette dernière est critiquée pour ses exigences informationnelles intensives. Mais, celles-ci sont souvent répondues à l'aide de la modélisation probabiliste (la distribution exponentielle, Weibull, etc.), ou les modèles générés sont exploités pour la formulation des fonctions d'utilité élémentaires que présente chacune des actions potentielles aux yeux des différents critères, permettant ainsi de mesurer l'utilité totale de chaque alternative, d'une manière fiable et purement objective, à travers l'agrégation de ses utilités élémentaires. Autrement, il est possible d'intégrer les fonctions d'utilité obtenues dans des modèles hybrides, c'est le cas dans [51] par exemple ; où elles ont été exploitées pour construire la fonction de préférence globale de PROMETHEE. Un autre exemple est présent dans [145] où elles ont été introduites dans un modèle de « 0 & 1 Programming » pour quantifier les critères. Dans ce contexte, il convient de mentionner que les modèles de programmation linéaire, dont ce dernier fait partie, sont utiles pour traiter les problèmes d'optimisation, vu qu'elles sont basées sur des algorithmes itératifs à objectifs multiples, où l'itération cible la maximisation de la performance de la décision sur un objectif spécifié, tout en conservant les performances sur les objectifs restant au-dessus d'un seuil prédéfini. D'un autre côté, on constate que la méthode VIKOR attire d'une attention croissante, malgré qu'elle soit parmi les procédures de décision récemment portées à la maintenance. Cela peut être dû à sa capacité de gérer les situations dans lesquels le décideur est incertain de ses préférences [75]. La MACBETH par contre n'est pas si préférée car elle est purement subjective ; elle requiert l'exploitation d'une expertise humaine pour comparer chaque paire d'actions potentielles en spécifiant la différence d'attractivité entre les deux, à l'aide d'une échelle verbale. D'autre part, il existe quelques méthodes classiques qui figurent dans les travaux examinés. Celles-ci sont souvent basées sur un calcul arithmétique simple. Elles sont principalement utilisées comme repères de comparaison dans les démarches comparatives pour valider les résultats des approches modernes. Parmi celles-ci, l'analyse ABC agrégée et le rapport coût-bénéfices ; qui sont souvent associés à la gestion des pièces de rechange, tandis que la matrice de criticité et le nombre de priorité du risque (RPN/RPI) ; issues de l'AMDEC classique (FMECA) ou ses variantes modifiées, sont souvent utilisés dans la hiérarchisation des équipements critiques et l'évaluation des risques. Il existe aussi d'autres techniques récentes développées spécifiquement pour le traitement de ces deux centres d'action ; il s'agit des méthodes MCCE et PSI,

respectivement. Cependant, leurs applications restent assez limitées jusqu'à présent. Idem pour les méthodes graphiques qui sont rarement utilisées, vu qu'elles sont beaucoup plus centrées sur l'aspect descriptive que l'aspect prescriptive. Parmi celles-ci, il est noté que le plan GAIA de PROMETHEE est utile pour visualiser les dépendances entre les alternatives et les critères d'une manière simple et interactive, il peut donc servir à analyser la sensibilité des résultats, tandis que l'arbre de décision est utile pour comprendre la structure du problème et associer des solutions appropriées à des scénarios potentiels à travers les diagrammes logiques. Son exploitation peut être donc utile pour expliquer les étapes méthodologiques sous des conditions variables, d'une manière organisée, claire et compréhensible. Une autre méthode qui peut être classée dans la même catégorie est l'abaque de Noiret (bien qu'elle ne figure pas dans les travaux examinés). Cependant, ses applications dans les travaux de recherches sont rares, vu qu'elle est conçue uniquement pour la sélection de stratégies de maintenance. Les méthodes restantes répertoriées dans le tableau sous la catégorie « Autre » sont des méthodes récemment portées à la gestion multicritère des décisions de maintenance, c'est pourquoi leurs applications sont encore limitées. Enfin, il convient de mentionner qu'il existe des techniques structurées conçues pour rechercher un compromis modéré entre les résultats de plusieurs méthodes, un exemple concret est disponible dans [75] où la méthode agrégée a été exploitée à cette fin.

2.4.2 Sélection des critères

La modélisation d'un problème de décision doit impérativement respecter les différents aspects stratégiques auxquels il est lié. La littérature est une source inspirante pour identifier ces aspects ; le décideur peut se référer aux études de cas similaires pour sélectionner les critères qui répondent à ses préférences et traduisent le mieux les enjeux du problème. En fait, cela pourrait même lui faire prêter attention à des dépendances qu'il les a ignorées par inadvertance. Certaines « reviews » des travaux portant sur les applications MAMC dans la maintenance comprennent déjà une synthèse référencée des critères retenus, qui peut être exploitée dans ce contexte. Parmi celles-ci, le travail présenté par Moya [22] ; qui est assez détaillée et informatif, mais ne concerne que les critères retenus dans les approches de sélection des stratégies de maintenance. D'autre part, les travaux proposés par Shafiee [23] et de Almeida et al. [25] ont fourni une liste généralisée rassemblant les critères les plus éminents dans les décisions de maintenance en général. Cependant, en réalité, chaque centre d'action est caractérisé par ses propres particularités nécessitant de considérer des critères spécifiques, différents des critères génériques communs. Afin d'identifier ces critères, nous avons adopté une démarche similaire à celle présentée dans [22], en impliquant tous les champs de décisions ciblés par les travaux passés en revue. La

première étape était l'extraction de tous les critères retenus dans les travaux collectés, répartis suivant les champs de décision. Ensuite, tous les doublons ont été supprimés ; vu que certains critères identiques peuvent avoir des appellations différentes. Enfin, les critères ont été regroupés par pertinence. Les résultats sont présentés par centre de décision dans les tableaux 2.10 - 2.17.

Tableau 2.10 Critères retenus dans les travaux d'audit et évaluation de maintenance

Applications	Pertinence	Critères considérés
Evaluation du déploiement de la fonction de qualité de maintenance [138, 140] (Application dans une station-service automobile)	Maison de qualité	Client / Technologie / Concurrents
	Système de décision	Facteur du personnel / Valeur des décisions / Fiabilité des décisions
	Maintenance productive totale (TPM)	Maintenance autonome / Amélioration individuelle / Maintenance planifiée / Maintenance de qualité / Education et formation / Gestion du développement / Bureau TPM / Santé, sécurité & environnement
	Paramètres de maintenance	Efficacité globale de l'équipement / Temps moyen entre pannes / Temps moyen de réparation / Efficacité des performances / Temps d'arrêt moyen / Disponibilité
	Paramètres de qualité	Maintenance améliorée / Bénéfice accru / Compétence de base améliorée / Ecart d'acquisition amélioré
Audit du personnel de maintenance [142] (Application dans un service de maintenance d'aéronefs)	Profession	Connaissances de base / Charge de travail de maintenance d'aéronef / Charge de travail
	Innovation	Développement personnel / Compétence en résolution de problèmes / Attitude en matière de résolution de problèmes
	Équipe de travail	Responsabilité / travail d'équipe
	Discipline	Qualité du travail / fiabilité / taux de présence
Évaluation des aspects stratégiques de la maintenance [141] (Application sur 2 cas d'études)	Éléments de décision structurelle	Capacité / Installations / Technologie / Intégration verticale
Évaluation d'un système de maintenance [143] (Application sur 4 systèmes de fabrication)	Environnement physique	Contrôle du bruit / Contrôle des vibrations / Contrôle de la température / Éclairage / Propreté
	Environnement de l'organisation	Coopération / Communication / Relations patronales-syndicales / Taux de promotion / Taux de licenciement
	Performances de la machine	Efficacité globale de l'équipement / Temps d'arrêt moyen / Temps moyen de réparation / Temps moyen de défaillance / Disponibilité
	Attributs humains	Stress / Fatigue / Travail d'équipe / Agilité des travailleurs / Taux de roulement / Réactivité / Pression de travail
	Coût de maintenance	Bonus / Salaires des travailleurs / Rémunération / Formation / Pièces détachées
Audit d'un programme de maintenance prédictive [139] (Application dans un établissement hospitalier)	Efficacité du programme	Stratégie / Attitude / Ressources / Ressources humaines / Enregistrements / Planification / Ordonnancement / Ordres de travail / Achats / Magasin / Stocks / Procédures / Calibration / Compétences techniques / Efficacité / Contrôle
Evaluation global de la maintenance [137] (Application sur 3 cas)	Performances de maintenance	Coûts de maintenance / Gestion de la maintenance / Qualité, environnement et sécurité / Contrôle / Organisation / Informatisation / Formation / Externalisation

Tableau 2.11 Critères retenus dans les travaux concernant la priorisation des équipements

Pertinence	Critères considérés	
Critères opérationnels	Effets sur le travail et impact social [60, 67, 85]	
	Age [57, 69, 83]	
	Fonction [57, 62, 63, 69, 79, 83]	
	Importance [57, 63-65, 67, 74, 80]	
	Charge de travail de l'équipement (taux d'utilisation) [62-64, 67, 69, 77, 80, 83]	
	Conséquences potentielles d'une défaillance [72, 78, 79]	
Critères techniques	Taux de défaillances / MTBF [58, 59, 63, 64, 67, 68, 70, 72, 73, 75, 78-81, 84, 86]	
	Existence d'une installation de secours (redondance) [62-64, 67, 69, 83]	
	Temps d'arrêt / MTTR [58, 60, 62-64, 67, 68, 72, 73, 75, 77, 78, 80, 84, 86]	
	Nombre d'arrêts [75]	
	Disponibilité d'équipements de mesure et surveillance de défaillances [72, 86]	
	Obsolescence technologique [69]	
	Fiabilité [66, 74]	
	Maintenabilité [29, 60, 79]	
	Déteçtabilité de défaillance [63, 67, 72, 78, 81]	
	Exigences de maintenance [57, 62, 69, 72, 83]	
	Rappels, erreur d'utilisation et alertes de risques [57, 63, 69, 83]	
	Dangers liés à l'utilisation [83]	
	Nombre total de composants [68, 79]	
	Temps passé depuis le dernier entretien [60]	
	Index des modes de défaillance [77]	
	Index de nombres d'échec [77]	
Complexité de défaillance [63, 65, 86]		
Disponibilité [65, 84]		
Critères liés aux pièces de rechange	Quantité de pièces de rechange consommées / stocks du magasin [70, 72, 73]	
	Disponibilité des pièces requises [80, 85]	
Critères liés à la production (ou service)	Impact des défauts sur la production [58, 59, 66, 75, 78, 79, 85, 86]	
	Contribution à la production globale (ou service fournie) [64, 73, 78, 86]	
	Taux de rejets (nombre de produits défectueux) [64]	
	Perte de qualité (perte de Taguchi) [60, 75, 81]	
	Consommation des ressources de production [75]	
	Indice de flux de production [65, 77]	
Heures d'inventaire de production [65]		
Critères Economiques et commerciales	Coût de maintenance [56, 59, 62-64, 66-68, 77-79, 85, 86]	
	Coût du matériels concernés [79]	
	Pertes économiques [74]	
	Coût d'investissement des composants [68]	
	Coût des pièces de rechange [58, 70]	
Gêne pour le client [56]		
Critères liés au personnel et HSE	Sécurité [59, 60, 63, 64, 74, 79, 81, 85, 86]	
	Indice d'incendie et d'explosion [74]	
	Impact environnemental [56, 59, 78, 79, 81, 85, 86]	
	Impact patrimonial (sécurité économique)[67, 72, 78, 79]	
	Risques [57, 62, 67, 69]	
	Etat de dépuraton de l'effluent [67]	
Disponibilité du personnel de réparation [80]		
Critères spécifiques aux cas étudiés	Application sur des moteurs d'avions [71]	États de défaut / États de performance / États de temps / États initialisés
	Application sur des transformateurs électriques [61]	Teneur en humidité / Acidité / Tension de claquage / Facteur de dissipation / Totaux des gaz combustibles dissous / Degré de polymérisation
	Application sur les composants de turbines à gaz [76]	Variations du signal RPM / Chute et fluctuations de la valeur de pression / Débit d'air comprimé insuffisant / Changement excessif de la température des gaz d'échappement / Vibrations de la turbine

Tableau 2.12 Critères retenus dans les travaux de gestion de sous-traitances

Applications	Pertinence des critères	Critères considérés	
Selection d'une stratégie de sous-traitance (Type de contrat)	Liés à l'entreprise	Coût	Coût du manque d'entretien [145-147]
			Coût de maintenance [145-147]
		Compétences en maintenance [147]	
		Complexité [147]	
		Obsolescence [147]	
		Mécanismes efficaces de contrôle et de suivi de l'organisation [146]	
		Manque de confidentialité associé aux activités de sous-traitance [146]	
		Accent accru sur les activités clés [145, 146]	
		Manque d'équipement de maintenance et de test [146]	
	Instabilité et heures supplémentaires des réparations [146]		
	Liés au secteur industriel	Soutenir les réglementations gouvernementales [146]	
		Risque élevé de maintenance [146]	
		Dimension et taux de croissance [146, 147]	
		L'intensité du capital [147]	
		Localisation géographique [147]	
		Présence de prestataires et fournisseurs [147]	
	Liés au contracteur	Tendance d'externalisation [147]	
		Nombre de contracteurs disponibles [146, 147]	
		Typologie des grades [147]	
Compétences (qualité) [145-147]			
Selection d'un sous-traitant (Contracteur de maintenance)	Principes de travail	Enthousiasme dans la résolution de problèmes [148]	
		Outils et équipements [148]	
		Qualité de travail [148]	
	Performance technique	Temps de restauration du système [144, 148, 149]	
		Expérience / compétence du personnel [144, 148, 149]	
		Action et présence dans les activités de dépannage [144, 148, 149]	
	Coût [144, 145]		
	Plan HSE [149]		
	Historique de travail (expérience et savoir-faire) [149]		
	Temps de réponse [148]		
	Temps de réparation [148]		

Tableau 2.13 Critères retenus dans les travaux d'évaluation des risques

Pertinence	Critères considérés
Liés aux défaillances	Probabilité d'occurrence de défaillance [28-35, 37-40]
	Causes potentielles de défaillance [35]
	DéTECTABILITÉ [27-35, 37-40]
	Gravité (conséquence de défaillance) [28, 30, 32-34, 37-40]
	Impact opérationnel [27]
	Pièces de rechange [29, 31, 35]
	Maintenabilité [29, 31, 35]
	Importance de la fiabilité [29]
	Temps de maintenance [40]
Finance et gestion	Impact sur les ressources humaines (taux d'absentéisme) [27]
	Perte de qualité [29]
	Pertes financières (y compris le cout de maintenance) [27, 28, 31, 35, 36, 40]
Sécurité et environnement	Sécurité économique [29, 31, 35]
	Protection de l'Equipment [37, 38]
	Environnement [27, 36]
	Sécurité du personnel [36]

Tableau 2.14 Critères retenus dans les travaux de planification de maintenance

Application	Pertinence	Critères considérés
Sélection du temps d'intervalle entre les remplacements préventifs ou les visites d'inspection	Financières & commerciales	Coût [41, 42, 44-55, 173]
		Impact sur la réputation [173]
	Techniques	Temps d'indisponibilité [41, 45, 47, 49-51, 53, 55, 173]
		Fiabilité [42, 44-48, 50, 52, 53]
		Durée de vie résiduelle [54]
		Fréquence de maintenance (Taux correctif) [43, 54]
		Retard de maintenance [43]
	HSE	Criticité de la maintenance [43]
		Santé et sécurité [55, 173]
	Sélection des politiques de planification de maintenance [26]	Opérationnelles
Temps total affamé		
Techniques		Temps total bloqué
		Performance
		Facteur de sortie moyen
Financières		Utilisation
		Coût des biens
		Coût d'exploitation de l'équipement

Tableau 2.15 Critères retenus dans les travaux de gestion des pièces de rechange

Pertinence	Critères considérés
Pièces de rechange	Criticité [150, 157]
	Effets sur la qualité [154]
	Pertes de production [152, 154]
	Criticité de l'équipement (priorité) [155, 156]
	Disponibilité de l'équipement [156]
	Conséquences de la rupture de stock [151, 153-155]
	Sécurité et environnement [154]
	Temps d'installation [156]
Caractéristiques d'approvisionnement	Temps masqué [154]
	Substituabilité [150, 152, 154, 156]
	Délai de livraison des pièces de rechange [150-157]
	Nombre de fournisseurs potentiels [153-156]
	Type de la pièce (disponibilité) [151-153, 156]
	Réparation interne [150, 154]
	Disponibilité des spécifications techniques [155]
	Risque (probabilité de pénurie d'approvisionnement) [144]
Problèmes d'inventaire	Coût [54, 144, 150, 152, 154, 156, 157]
	Espace requis [154]
	Obsolescence [150, 154]
	Problèmes de détérioration [154]
Taux d'utilisation	Nombre de pièces identiques dans l'usine [154, 157]
	Demande (prédictibilité) [150, 152, 153, 156]
	Valeur de consommation [157]
	Type de maintenance [155, 156]
	Plan de quart (Redondances) [153, 154, 156]
	Fréquence (probabilité) de défaillance [154-156]
Durée de vie résiduelle [54]	

Tableau 2.16 Critères retenus dans les approches des choix technologiques et techniques

Applications	Pertinence	Critères considérés		
Selection d'une GMAO [159, 160, 163, 166]	Coût	Coût d'achat et de mise en œuvre [160, 163, 166]		
		Coût des mises à jour [160, 163, 166]		
	Performance	Caractéristiques techniques (fonctionnalité)	Flexibilité [159, 160, 166]	
			Modules (utilitaires) [159, 163, 166]	
			Intégration de modules [159, 166]	
		Facilité d'utilisation [159, 163, 166]		
			Fiabilité (réputation et stabilité) [159, 160]	
	Implémentation		Intégrabilité [160, 166]	
			Facilité de mise en œuvre [159, 166]	
			Personnel qualifié [163]	
			Ressources informatiques [163]	
			Influences négatives sur les ressources humaines [163]	
	Autre		Sécurité du système (sécurité) [160, 166]	
			Nombre de points d'accès (multi / mono site) [160, 166]	
		Concordance avec les normes et les enregistrements [166]		
		Capacité et services techniques du fournisseur [159]		
Sélection d'un système de maintenance [165, 168] (Cas d'un système de nettoyage de moteurs)	Spécifications du système	Coût / productivité / capacité de charge / efficacité / effets nocifs		
Evaluation des investissements et projets de maintenance [169]	Environnement	Indice de pertes physiques / Nombre de secteurs de manœuvre / Niveau du système d'automatisation		
	Economie	Coût de maintenance corrective / Coût d'investissement en formation / Coût d'investissement du programme de maintenance préventive		
Diagnostic de défauts des machines tournantes [170]	Enregistrements vibratoires	Fréquence d'accélération des vibrations du rotor Amplitude moyenne des vibrations		
Selection de technologies ou techniques de maintenance prédictive [158, 161, 162, 164]	Coût [161, 162, 164]	Coût d'achat [158]		
		Coût d'installation		
		Coût de maintenance		
	Degré du service		Réputation [158]	
			Maintenabilité [158, 161, 162, 164]	
			Période de garantie et service d'assistance [158]	
			Services après-vente [158]	
			Portabilité [161, 162, 164]	
		Ressources humaines		Formation requise [158, 161, 162, 164]
				Facilité d'utilisation [158, 161, 162, 164]
			Influences négatives sur le personnel [164]	
	Caractéristiques techniques	Adaptation	Intégrabilité [158, 161, 164]	
			Concordance avec les règlements de sécurité [158]	
		Fonctions de diagnostic	Qualité & capacité [161, 162, 164]	
			Temps [161, 162]	
			Caractéristiques matérielles et logicielles [158]	
		Durée de vie utile de la technologie [158]		
	Critères managériales		Comportement des fonctionnalités d'entreprise [161, 162]	
			Bénéfices non quantifiables [162]	

Tableau 2.17 Critères retenus dans les travaux de sélection des stratégies de maintenance

Critères et sous-critères considérés (regroupés par pertinence)		
Caractéristiques techniques de l'équipement	Fonctionnalité	Résultats de diagnostic de l'équipement [101] Impact de défaillance sur l'activité (assurance de fonctionnement) [95-97]
	Risk [88, 90, 92, 131]	Fréquence d'occurrence de défaillances [58, 72, 91, 94, 101, 107, 128, 134]
		Détektabilité de défaillances [72, 91, 128, 134]
		Gravité des défaillances [72, 91, 128, 134]
		Durée des défaillances (temps d'indisponibilité) [58, 107, 128, 129]
	Disponibilité des données sur la qualité des produits [119]	
	Consistance de la qualité des composants [119]	
	Caractéristiques de défaillance du système [88, 90]	
	Rappels et erreurs d'utilisateur [128]	
	Classe d'équipement [128]	
	Age d'équipement [101, 128]	
	Temps moyen entre défaillance (MTBF) [101]	
	Recommandations du fabricant de l'équipement [101]	
	Conditions de fonctionnement de l'équipement	Conditions environnementales [109]
Étouffement [87, 116, 127]		
Radiation et température ambiante [119]		
Saleté dans les environs [119]		
Degré d'importance de la mission de l'équipement		Existence d'un équipement de secours [98, 128]
		Utilisation (charge) [87, 116, 119, 123, 127-129]
Dégâts engendrés [101]		Endommagement de l'installation/l'équipement [82, 88, 90, 103, 133, 135]
		Dommages au produits (perte de qualité et rejet des produits) [82]
		Dommages aux personnes (accident survenu) [82, 101, 103, 133]
		Dommages aux planning du travail [133]
		Dommage environnemental [82, 103, 133]
		Pertes de production [82, 133]
Impact sur l'écart d'acquisition et l'image [82, 103, 105]		
Mode de fonctionnement (continu ou intermittent) [119]		
Séquence inapproprié (vitesse de fonctionnement) [87, 116, 119, 127]		
Température de fonctionnement [119]		
Qualité et température du lubrifiant [119]		
Qualité du service [119]		
Personnel	Formation requise [110]	Connaissance du travail (compétence) [87, 116, 123, 127, 129, 131, 133]
		Coût de formation [87, 88, 90, 109, 116, 124, 126, 127, 131, 132, 134, 135]
		Difficulté de formation [87, 116, 127]
	Adéquation des actions de maintenance (acceptation des travaux) [89, 95-97, 100, 102, 104, 105, 110, 112, 120, 124-126]	
	Utilisation de la main-d'œuvre (durées de maintenance) [72, 91]	
	Passion pour la maintenance [102]	
Degré de préparation aux missions associées [102, 110]		
Facteurs économiques	Profit [100, 105]	
	Coût opérationnel (matériaux, main d'œuvre...)[72, 88, 90-93, 95-97] [82, 99-101, 105, 108-111, 114, 120, 121, 123, 126, 129, 130, 135, 136]	
	Pertes opérationnelles associées [88-90, 101, 103, 104, 107, 108, 115, 123, 124, 126, 131, 132, 136]	
	Frais de consultation d'expertise ou un conseiller [105, 106, 133]	
	Stocks de rechange requis [82, 88, 90, 100-105, 107, 108, 111, 113-115, 120, 121, 123, 124, 126, 131-133]	
	Coût d'investissement (matériel, logiciel...) [93, 96, 98, 99, 101, 103-106, 108-114, 117, 118, 121, 122, 124-126, 129, 131-135]	
	Coût d'achat (coût en capital de l'équipement) [99, 136]	
Coût d'assurance [82, 103]		

Tableau 2.17 Critères retenus dans les travaux de sélection des stratégies de maintenance (suite)

Critères et sous-critères considérés (regroupés par pertinence)	
HSE	Personnel [88, 90, 95, 97, 98, 101, 102, 104-106, 108-110, 112-115, 121, 123, 126, 131-133, 135]
	Machines / installations [88, 90, 98, 101, 104-106, 108-110, 112-115, 121, 123, 126, 131-133, 135]
	Environnement [88, 90, 97-99, 101, 104-106, 108-110, 112-115, 121, 123, 125, 126, 130-133, 135]
	Réduction des fuites / déchets [103, 112, 113, 125, 133]
Sécurité intrinsèque [82, 115]	
Valeur ajoutée (Bénéfices) [111, 122]	Flexibilité [99, 123, 129]
	Difficulté d'implémentation [87, 116, 127, 128, 131]
	Facilité de manipulation des tâches [87, 116, 127, 130]
	Amélioration de la fiabilité [82, 88, 90, 99-102, 104, 106, 108-110, 112-114, 117, 118, 120, 121, 123-126, 129, 135, 136]
	Maintenabilité [109, 117, 118, 126]
	Reduction de consommation des ressources & d'Energie [125]
	Planifiabilité des actions de maintenance [93, 102]
	Affaires et compétitivité (y compris la livraison à temps) [93, 100, 102, 105, 112, 120]
	Augmentez la disponibilité / réduction des temps d'arrêt [93, 94, 98, 101, 102, 114, 117, 118, 121, 123-125, 136]
	Efficacité procédurale [93, 110, 115, 123, 124, 126, 129, 130, 135]
	Productivité (capacité) [99, 101, 123, 125, 129]
	Amélioration de la qualité des produits / services [82, 96, 100, 101, 105, 106, 108, 113-115, 120, 121, 124, 131, 133]
	Satisfaction du client [112]
	Poussé vers l'innovation [102, 125]
	Fournir plus de connaissances (identification des défauts) [82, 104, 109, 123, 126, 131, 132]
Applicabilité / Faisabilité [108, 109, 111]	Ressources disponibles [129]
	Ressources humaines qualifiées disponibles [98, 102, 115, 132]
	Ressources monétaires (matérielles) disponibles [88, 90, 133]
	Exigences de maintenance [82, 89, 110, 122, 123]
	Technologie de maintenance [89, 105, 113, 115, 125, 132, 133]
	Disponibilité des prérequis informationnels [102]
	Compatibilité systématique [125]
	Ajustement au profil de la mission (fonction) [102] [128]
	Conformité aux politiques et prescriptions existantes [102]
	Acceptation par la direction supérieure [105, 125, 135]
	Acceptation par les organismes de réglementation [135]
	Charge de réparation [123, 129]
	Longueur moyenne de la file d'attente [123]
	Taille moyenne des activités de réparation par groupe [123]
Retard de maintenance associé [123, 124]	
Maintien des installations dans des bonnes conditions [124]	

Autrement, les décideurs peuvent faire appel à des experts et des spécialistes pour sélectionner les critères traduisant le mieux les dépendances de la décision. Les travaux passés en revue montrent plusieurs techniques structurées, qui sont exploitées principalement pour réduire les incertitudes et surmonter les conflits entre les différents points de vue humains. Les solutions les plus courantes dans ce contexte sont les méthodes DELPHI et NGT [174], dont la première vise à itérer les avis des experts jusqu'à ce qu'un consensus soit atteint sur l'objet de l'enquête, tandis que la deuxième vise à forcer tous les experts à participer dans des conditions égales où toutes les idées ont la même importance et seront jugées de manière impartiale par le group. Enfin,

il est possible de gérer l'interdépendance entre les critères, lorsqu'ils sont très nombreux, à l'aide de la technique d'analyse de facteurs (FA), afin de ne garder que les plus éminents.

2.4.3 Pondération des critères

Une fois les critères sont déterminés, il est nécessaire de leur attribuer des poids reflétant leur importance relative dans le processus de décision. Cette étape est très sensible, car elle influe grandement sur les résultats. Les travaux examinés exploitent de nombreuses techniques à cette fin ; certains adoptent la pondération directe par une expertise humaine à l'aide de la méthode DELPHI ou la méthode d'insertion. D'autres optent pour la pondération indirecte en faisant appel aux MAMC qui supportent cette fonctionnalité. Parmi celles-ci, on retrouve AHP qui permet une pondération subjective à travers l'évaluation des critères par paire selon leur importance aux yeux de l'objectif ciblé. Le même principe est adopté dans la méthode ANP, la seule différence est que cette dernière prend en compte l'interdépendance entre les critères et les alternatives (voir chapitre 3 pour plus de détails). L'autre option est d'opter pour les techniques de pondération objective telles que la variance statistique et la méthode d'entropie. Au contraire des autres techniques, celles-ci sont basées sur des formulations mathématiques plutôt que sur des jugements humains. La programmation linéaire fournit également des techniques adaptées pour la génération des poids optimisés. Idem pour la logique floue (Fuzzy) qui permet la prise en compte des incertitudes présentes à ce niveau. Un exemple qui combine ces deux techniques est la programmation floue de préférence (FPP). Il est à noter qu'il est possible de combiner à la fois les techniques de pondération objective et subjective pour obtenir des pondérations raisonnables. D'autres techniques des deux types peuvent être trouvées dans [175, 176].

2.4.4 Quantification des critères

Ensuite vient l'étape de quantification des critères dans laquelle les alternatives sont évaluées suivant les différents aspects de la décision. Comme la pondération du critère, les travaux examinés montrent que cela peut être également effectué d'une manière objective, subjective ou un mélange des deux, selon le cas. Le lecteur peut se référer aux références citées dans les tableaux 2.10 - 2.17 pour s'inspirer et s'informer sur la quantification de certains critères spécifiques. En général, l'évaluation objective est recommandée, vu qu'elle s'appuie sur les données d'historique pertinentes, reflétant le comportement réel des alternatives suivant les différents critères ; ce qui garantit des résultats plus précis. Dans le cas où les données sont absentes, il est souvent fait appel à certaines techniques spécifiques pour compenser ce manque informationnel. Parmi celles-ci, les chaînes de Markov qui servent à exprimer des indicateurs de fiabilité (temps moyen entre défaillances, taux de pannes, ...etc.). La modélisation probabiliste permet également d'exprimer

l'évolution de la variable étudiée suivant une distribution prédéterminée. Ainsi, la formulation d'une expression mathématique exprimant l'indicateur concerné permet de générer un jeu de données à travers l'exécution d'une simulation. L'approche bayésienne s'avère aussi utile dans ce contexte, vu qu'elle utilise des informations qui s'accumulent au fil du temps pour fournir des données sur les paramètres de distribution des défaillances [44]. Elle permet la possibilité d'incorporer l'opinion d'un expert sur le système concerné dans le modèle de maintenance [53]. Cependant, pour les critères intangibles ; qui sont difficiles à quantifier, l'évaluation s'appuie complètement sur l'expertise humaine. Elle se fait donc d'une manière purement subjective. Dans ce cas, les jugements sont exprimés par des termes linguistiques. Une échelle appropriée doit être élaborée pour les convertir en valeurs numériques. L'utilisation des ensembles flous au lieu de valeurs nettes dans les échelles d'évaluation est préférable afin de réduire les incertitudes. GRA et la théorie de Dempster Shafer font également partie des techniques qui sont exploitées dans ce but (l'approche proposée par Emovon [34] comme exemple). En effet, les situations incertaines sont parmi les principaux facteurs qui constituent la complexité de la prise des décisions multicritères, elles se manifestent dans l'imprécision des évaluations et le manque de connaissance ou l'ignorance sur le phénomène évalué [133]. En cas de présence de plusieurs décideurs, il est nécessaire d'agrèger les jugements obtenus. Certaines MAMC supportent cette fonctionnalité (AHP par exemple). Il existe également des techniques dédiées pour y parvenir telles que AIP et MAGDM, comme illustré en pratique dans [124] et [136], respectivement. D'autres techniques similaires peuvent être trouvées dans [177]. Une autre option consiste à répéter l'évaluation pour chaque décideur indépendamment, puis utiliser une MAMC qui est bien adaptée à la recherche des compromis tel que la méthode CP.

2.4.5 Validation des résultats

Après l'élaboration d'un modèle d'aide à la décision, il est nécessaire de le soumettre à une série d'analyses pour s'assurer de la fiabilité de ses résultats. Les travaux examinés proposent 4 façons principales pour la validation des modèles élaborés :

- **Exécuter une simulation** : Il s'agit d'injecter le modèle développé par des paramètres présumés pour analyser les résultats sortants et évaluer leur justesse. Cette méthode est souvent utilisée en conjonction avec les modèles probabilistes pour valider les résultats obtenus dans les cas où elles ne peuvent pas être vérifiées sans les adopter en réalité ; comme le cas de la sélection des intervalles des remplacements préventifs.
- **Effectuer une analyse de sensibilité** : Il s'agit d'une approche descriptive qui consiste à étudier le comportement du modèle sous des scénarios de pondération variés, dans le

but de vérifier l'accord entre les poids choisis et les résultats obtenus. Cette technique est largement utilisée, elle est beaucoup plus associée aux problématiques de rangement, où les alternatives doivent avancer ou reculer dans le classement conformément à leurs évaluations sur les critères dont les pondérations ont été modifiées.

- **La comparaison :** Il s'agit de comparer les résultats obtenus par le modèle développé avec ceux d'un modèle usuellement employé pour le traitement du problème étudié. C'est l'une des meilleures façons d'évaluer l'apport du modèle élaboré et de démontrer son applicabilité. Cela permet ainsi d'identifier les techniques convenant le mieux au traitement d'un problème spécifique.
- **Etude de cas :** Effectuer un test des données réelles pour vérifier l'applicabilité du modèle et évaluer son apport. Cette méthode équivaut une étude de faisabilité de l'approche proposée avec un degré de confiance élevé, vu qu'elle repose sur des paramètres réels. Diverses études de cas ont été traitées par les travaux passés en revue dans ce chapitre, comme indiqué dans le tableau 2.18 ci-dessous :

Tableau 2.18 Distribution des études de cas traités dans les travaux examinés

Secteur	Type d'activité	Travaux (références)
Energie	Installations d'Hydrocarbures	[27, 39, 66, 74, 82, 86, 91, 92, 103, 106, 149, 155, 161, 162, 164]
	Stations électriques et hydroélectriques	[41, 42, 48, 52, 56, 59, 61, 68, 72, 76, 78, 84, 95, 104, 110, 130, 132, 144, 146]
	Energies renouvelables	[40, 134]
Santé	Établissements hospitaliers et centres de santé	[57, 62, 63, 69, 83, 96, 97, 128, 139, 158, 160, 163]
Industrie	Industrie métallurgique, sidérurgique et minière	[35, 43, 55, 75, 77, 94, 112, 115, 117, 118, 133, 153, 157]
	Industrie pharmaceutique	[137, 150, 162]
	Fabrication des matériaux de construction	[101, 137, 147]
	Fabrications alimentaires	[64, 124, 143, 148, 162, 167]
	Fabrication du papier	[29, 31, 46, 81, 119, 126, 154, 166]
	Industrie du textile	[87, 116, 127, 141]
	Industries des automobiles et leur pièces détachés	[37, 38, 58, 65, 107, 111, 122, 125, 141, 156]
	Industries des équipements électrique et électronique	[28, 30, 32, 99, 109, 113, 152]
	Autres industries	[26, 36, 53, 54, 70, 80, 94, 108, 120, 123, 129, 145, 151, 159, 162] [49, 60, 79, 85, 98, 100, 114, 121, 131, 170]
Services	Transport Aérien	[45, 71, 73, 93, 142]
	Transport maritime	[33, 34, 47, 50, 51, 88-90, 102, 135, 136, 165, 168]
	Transport ferroviaire	[94]
	Approvisionnement en eau	[67, 119, 169]
	Autres services	[44, 105, 137, 138, 140]

*Les travaux dupliqués rassemblent des études de cas de plusieurs secteurs ou activités.

2.5 SYNTHÈSE GLOBALE

À partir de ce qui précède, on aperçoit qu'il existe plusieurs champs d'action dans la fonction maintenance dont chacun est régi par des particularités spécifiques qui imposent la prise en compte des critères pertinents et l'attribution de poids reflétant le mieux les dépendances de la décision. Le traitement d'un problème décisionnel de maintenance, peu importe son objet, dépend donc de plusieurs éléments autres que la méthode de modélisation qui est souvent mise au centre d'attention. L'ensemble de ces éléments est schématisé dans le diagramme ci-dessous.

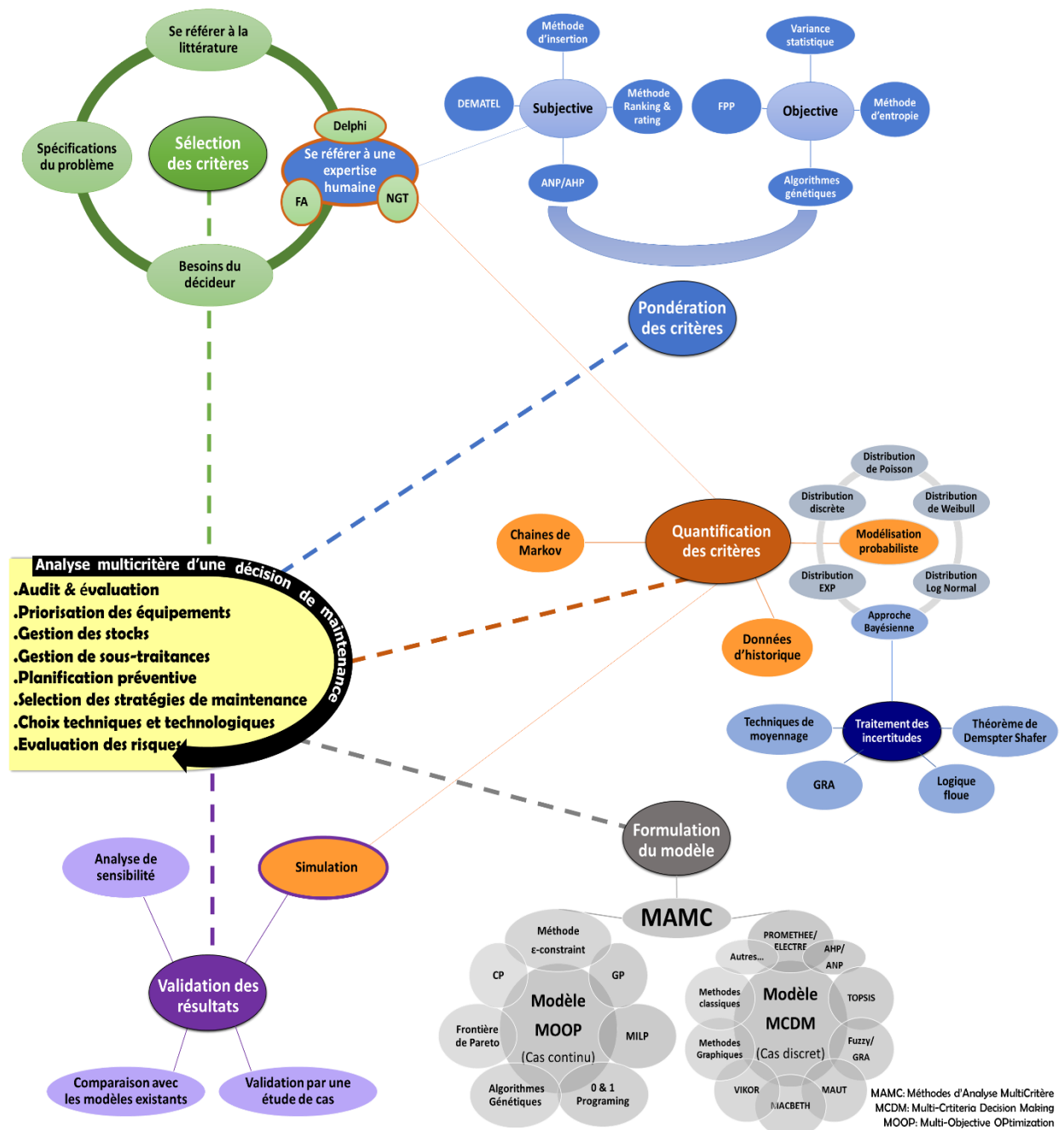


Figure 2.3 Synthèse de la modélisation des décisions de maintenance

2.6 CONCLUSION

Le concept de la prise de décision multicritère attire une attention croissante depuis son introduction à la fonction maintenance. Ceci est noté à travers les études proposées dans ce contexte, qui se caractérisent par la diversité méthodologique ainsi que la variété des décisions de maintenance adressées. Dans ce chapitre, nous avons identifié les domaines d'action et les méthodes de modélisation liée à cette thématique. Une enquête d'état de l'art a été également menée sur l'utilisation du MAMC dans la maintenance, permettant de marquer plusieurs constatations intéressantes concernant les différentes étapes de modélisation d'un problème décisionnel, y compris les moyens et techniques souvent exploités pour surmonter les difficultés rencontrées au long du processus telles que la sélection des critères, l'absence des données quantitatives et la présence d'incertitudes.

Les travaux analysés se manifestent suivant 3 types : les travaux de revue (synthèse) ciblant l'évaluation des travaux existants, les démarches comparatives cherchant à confronter les MAMC associées à la résolution d'un problème donné, et les études de cas proposant de nouvelles approches ; qu'elles soient simples ou hybrides. Nous avons constaté qu'AHP, TOPSIS et PROMETHEE sont les méthodes les plus fréquemment utilisées dans les travaux passés en revue, en raison de leur facilité de mise en œuvre et leur capacité à intégrer efficacement les critères tangibles et intangibles, suivies par les techniques basées sur la logique floue et l'analyse relationnelle grise (Fuzzy et GRA, respectivement), qui sont exploitées principalement pour la quantification des informations qualitatives et la compensation des incertitudes. Les études récentes montrent une tendance vers les modèles hybrides, étant donné qu'ils permettent de bénéficier des avantages de multiples techniques dans le cadre d'une démarche structurée. Idem pour les approches multiniveaux : qui ciblent plusieurs champs d'action simultanément dans le but d'incorporer leur interaction dans le processus décisionnel.

Enfin, nous avons conduit une étude analytique et statistique en mesure d'identifier les potentialités de recherches qui peuvent être éventuellement ciblées par des contributions scientifiques dans cette thèse telles que les centres décisionnels manifestant une pénurie de travaux, le manque des études purement comparatives par rapport à la diversité et la multiplicité des techniques disponibles, et l'adaptation des MAMC aux applications de maintenance (soit en modifiant ou combinant des techniques existantes, soit en apportant ou développant de nouvelles techniques).

Chapitre 3: Méthodes d'Analyse Multicritère (MAMC)

Le chapitre précédent révèle de nombreuses MAMC qui sont exploitables pour la résolution des différents problèmes décisionnels présents dans la fonction maintenance. En fait, ces méthodes ne sont pas exclusives aux applications de maintenance, mais relèvent plutôt de la science de décision, qui imprègne diverses disciplines et domaines d'études. La modélisation correcte d'un problème donné dépend en premier lieu de l'adoption de la méthode qui s'adapte le mieux avec les particularités constituant la complexité de la décision. Cependant, ce choix est régi par la bonne compréhension des modèles et méthodes applicables, ainsi que la bonne maîtrise de leur implémentation. Dans cette logique, ce chapitre est consacré à l'étude des différentes classifications et typologies des MAMC. Vu que nous ne puissions pas discuter toutes les MAMC existantes en raison de leur nombre important, nous nous limitons à expliquer certaines méthodes de chaque famille, tout en expliquant leurs fondements mathématiques et méthodologies d'implémentation. Ce chapitre constitue le fond théorique des contributions proposées dans la suite de cette thèse.

3.1 CLASSIFICATION DES MAMC

Les méthodes multicritères peuvent être classées suivant plusieurs perspectives. La classification la plus largement adoptée est celle basée sur le principe d'agrégation des méthodes, permettant de distinguer 4 catégories principales [178, 179]:

1. **Les méthodes d'agrégation complète** : elles représentent les méthodes relevant de l'approche américaine. Elles cherchent à réduire un ensemble de critères en un critère unique, à travers le jugement transitif, permettant d'évaluer les alternatives en conséquence.
2. **Les méthodes d'agrégation élémentaire** : ensemble de méthodes basées sur un raisonnement intuitif qui conduit vers un calcul arithmétique simple (moyenne, somme pondérée, ...), permettant de définir les priorités et les préférences. Bien qu'elles adoptent généralement une agrégation complète, elles diffèrent des méthodes de la catégorie précédente par leur simplicité remarquable, qui peut s'avérer excessive, vu qu'elles tentent de réduire un problème complexe par des calculs basiques, qui risquent de négliger de nombreuses lacunes émanant de la conflictualité des critères. Du point de vue de la science de la décision, les variantes multicritères des outils d'analyse de la sûreté de fonctionnement (analyse ABC agrégée, matrice de criticité agrégée...), représentant l'approche classique d'aide à la décision dans la maintenance, peuvent être aussi classées dans cette catégorie.
3. **Les méthodes d'agrégation partielle** : ensemble de méthodes qui représentent l'approche européenne basée sur l'agrégation partielle des critères où on doit respecter l'incomparabilité en employant des relations de surclassement, à travers lesquelles les préférences sont définies.
4. **Méthodes d'agrégation locale** : ensemble de techniques d'optimisation basées sur des procédures itératives ; elles consistent à prendre une action potentielle comme solution de départ puis procéder à une itération pour trouver une meilleure solution à travers une optimisation multi objectifs. La plupart de ces méthodes sont soit des algorithmes génétiques, soit des modèles de programmation linéaire.

La figure 3.1 illustre quelques exemples des MAMC appartenant à chaque catégorie.

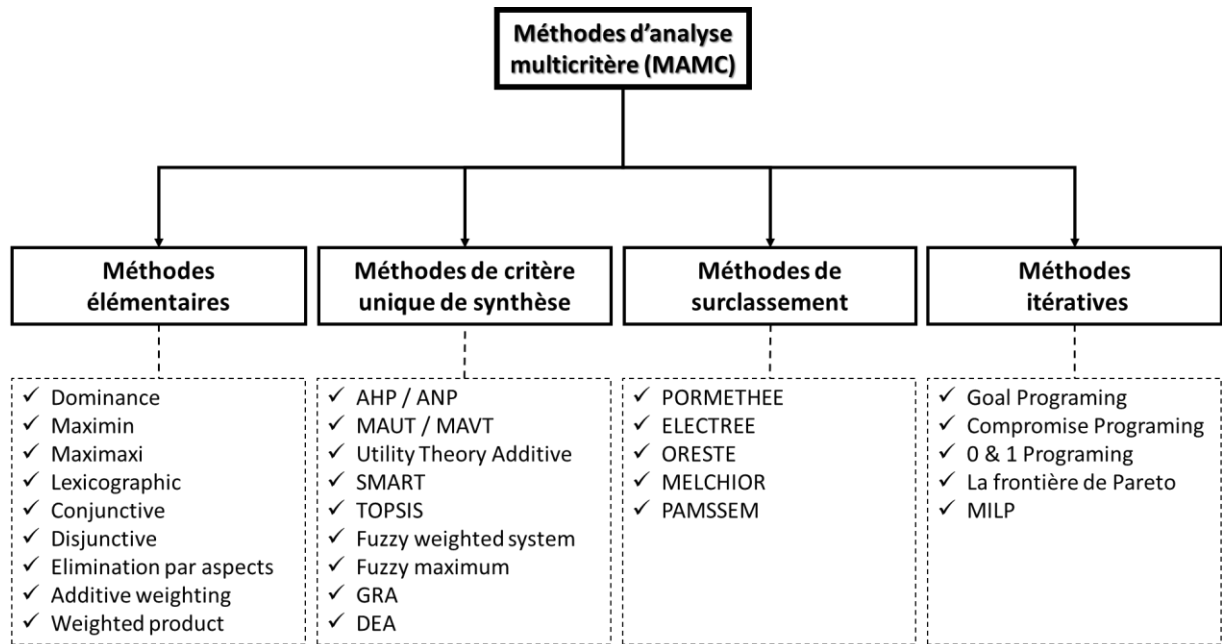


Figure 3.1 Classification des MAMC (modifiée à partir de [176])

Les méthodes multicritères peuvent être classées également en fonction de leurs caractéristiques, par exemple certaines d'entre elles permettent l'échange entre les critères et elles sont donc marquées comme des méthodes compensatoires ; c'est souvent le cas pour les méthodes des 2 premières catégories dans la classification ci-dessus. En revanche, les méthodes de la troisième catégorie sont généralement des méthodes non compensatoires, tandis que les méthodes de la dernière catégorie varient entre les deux.

D'autre part, les méthodes des trois premières catégories sont valables seulement pour un ensemble fini d'alternatives (cas discret), au contraire des méthodes itératives qui supportent les ensembles infinis (cas continu). De la même façon, d'autres caractéristiques peuvent être utilisées pour classer les méthodes : qualitatives / quantitatives / mixtes, floues / nettes, déterministes / stochastiques, décisions individuelles / décisions de groupe...etc.

3.2 METHODES D'AGREGATION COMPLETE

3.2.1 La méthode AHP

La méthode AHP se distingue dans l'agrégation complète, parmi les MAMC qui relèvent du critère unique de synthèse. Elle peut être décrite suivant les étapes ci-dessous [180]:

Étape 1 : La première étape de la méthode AHP consiste à décomposer le problème sous forme d'une hiérarchie simplifiée composée de plusieurs niveaux (Figure 3.2) ; allant de l'objectif (au sommet), passant par les critères et les sous critères (au milieu) et arrivant aux alternatives (actions) qui sont placées dans le niveau inférieur.

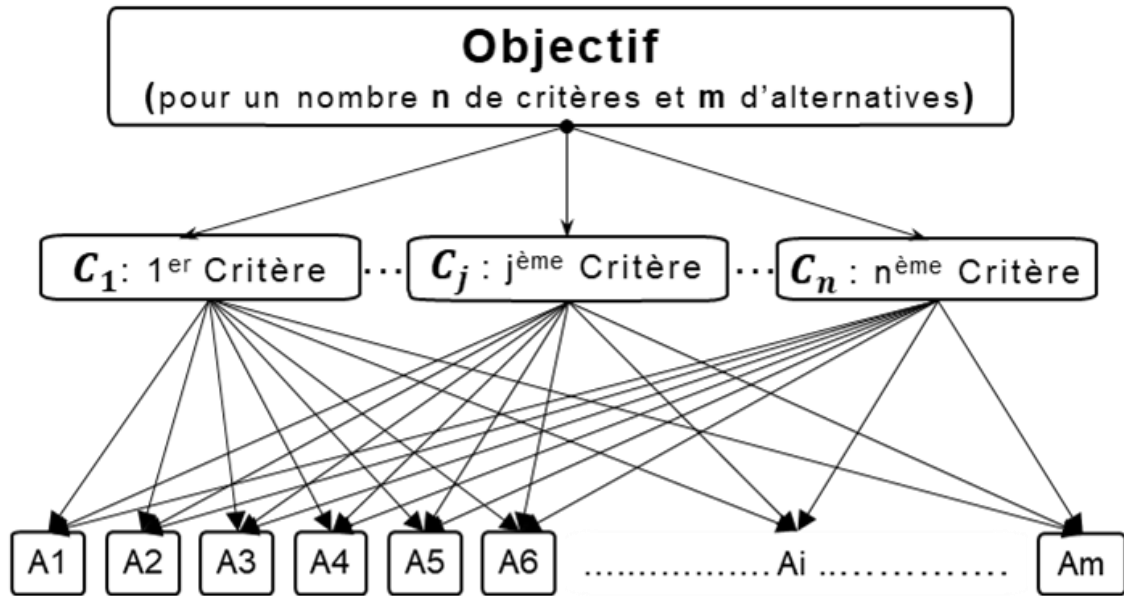


Figure 3.2 Modèle hiérarchique AHP

Étape 2 : Comparaison des paires d'éléments constituant chaque niveau par rapport aux éléments du niveau supérieur. En autres termes, il s'agit de l'évaluation des critères vis-à-vis de l'objectif ciblé, et ainsi le jugement des différentes alternatives aux yeux de chaque critère, où il en résulte des matrices de jugement. Dans cette étape, le décideur est amené à spécifier l'importance de chaque critère dans le processus de décision par rapport aux autres, ainsi que l'avantage de chaque alternative par rapport à l'autre, par critère, via des comparaisons binaires qui sont généralement achevées à l'aide d'une échelle linguistique (Tableau 3.1), permettant l'évaluation relative des alternatives et des critères. Cela permet également le traitement des critères quantitatifs et critères qualitatifs d'une manière uniforme.

Tableau 3.1 Echelle d'évaluation de la méthode AHP (échelle de Saaty)

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

Étape 3 : Vérification de la cohérence des jugements dans chaque matrice en calculant l'index de consistance (C_I) et le ratio de consistance (C_R) à travers les équations (3.1) et (3.2), respectivement :

$$C_I = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3.1)$$

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

$$C_R = \frac{C_I}{R_I} \quad (3.2)$$

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

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

Étape 5 : Synthétisation des priorités locales suivant deux modes de synthèse [181]:

- Le mode distributif : il consiste à normaliser les scores des alternatives, en divisant le score de performance de chacune par la somme totale des scores de performance sous le même critère. Il est recommandé quand le décideur est concerné par l'ampleur auquel chaque alternative domine toutes les autres alternatives sous ce critère.
- Le mode idéal : il consiste à comparer les priorités normalisées des alternatives avec un repère fixe, qui est généralement choisi comme le score de la meilleure alternative par critère (la plus grande valeur sur chaque colonne). Il est recommandé quand le décideur est concerné par la performance de chaque alternative par rapport à ce repère.

Étape 6 : Enfin, les priorités globales P_i des alternatives peuvent être calculées à l'aide de l'équation (3.3), ce qui permet d'effectuer un rangement suivant la préférence des alternatives :

$$P_i = \sum_j w_j \times l_{ij} \quad (3.3)$$

3.2.2 La méthode ANP

La méthode ANP est pratiquement une généralisation de la méthode AHP, qui permet de prendre en compte les interdépendances entre les critères et les alternatives. Elle est donc conçue pour modéliser des décisions plus complexes. Elle procède comme suit [78]:

Étape 1 : Modélisation du problème sous forme d'un réseau au lieu d'une hiérarchie (Figure 3.3), dans lequel les interdépendances entre les deux blocs des critères et des alternatives peuvent être prises en compte, et de même pour les interrelations possibles entre chaque paire de critères.

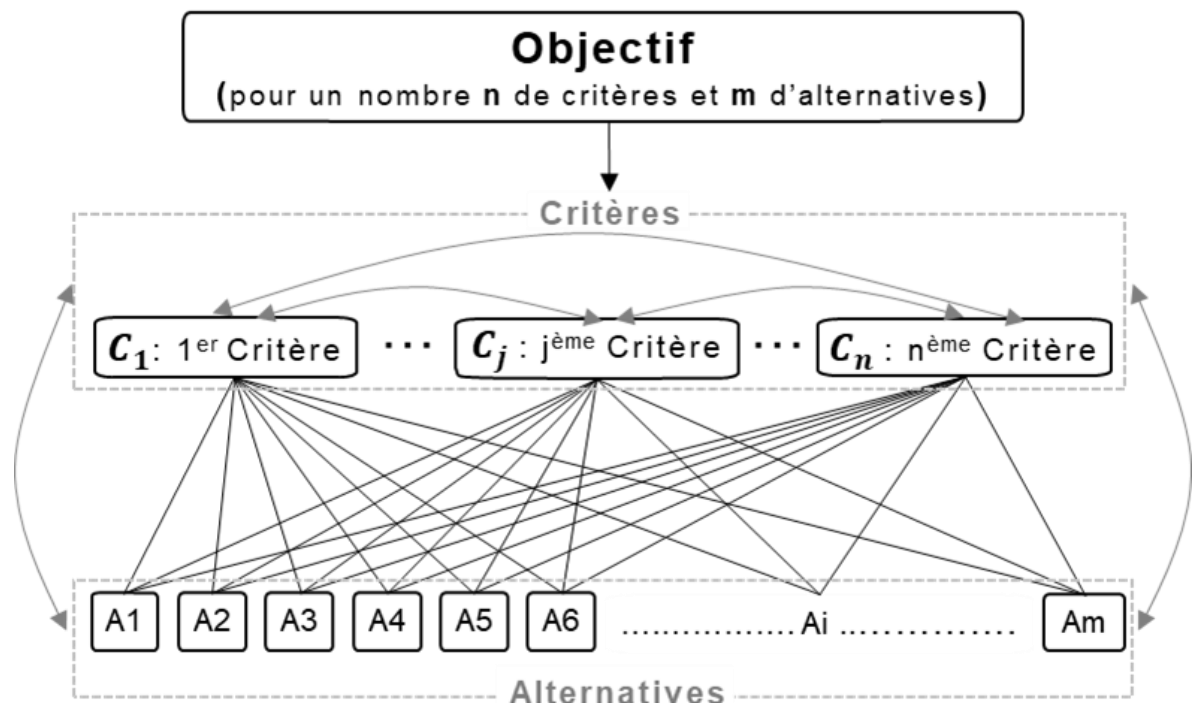


Figure 3.3 Le modèle du réseau issu de la méthode ANP

Étape 2 : Le contenu de chaque bloc est évalué par rapport au contenu de l'autre. Cette étape est similaire à la 2ème étape de la méthode AHP, sauf que les comparaisons binaires comprennent ici l'évaluation des critères par rapport aux alternatives aussi. Cela signifie que les alternatives peuvent influencer la pondération des critères et donc la prise de décision aussi.

Étape 3 : Les matrices de jugement résultantes de l'étape précédente sont ensuite soumises à une vérification de cohérence avant d'être exploitées pour dériver les priorités locales de la même manière que les étapes 3 et 4, respectivement, de la méthode AHP. La seule différence est qu'en plus des vecteurs de priorité des alternatives par critères (Vp_{A_j}) et le vecteur des poids des critères par rapport à l'objectif ciblé (V_W), il en résulte aussi un vecteur de priorité des critères pour chaque alternative (Vp_{C_i}).

Étape 4 : Conversion du réseau représentant le problème vers la matrice dite « super matrice ». Celle-ci est une matrice carrée dans laquelle chaque élément des trois blocs constituant le réseau (l'objectif, les critères et les alternatives) est représenté par une ligne et une colonne respective, permettant d'insérer les vecteurs obtenus de l'étape 3 dans les cellules qui conviennent. Le reste des cellules est rempli par des zéros, à l'exception des intersections des critères interreliés qui est remplie par une valeur de 1. La formulation de la super matrice est illustrée dans le tableau 3.2, où n et m représentent le nombre des critères (C_j) et alternatives (A_i), respectivement.

Tableau 3.2 Formulation de la super matrice de la méthode ANP

	Objectif	C_1	C_j	C_n	A_1	A_i	A_m
Objectif	0	0	0	0	0	0	0
C_1	V_W	0	0	0	$V_{p_{C1}}$	$V_{p_{Ci}}$	$V_{p_{Cm}}$
C_j		0	0	0			
C_n		0	0	0			
A_1	0	$V_{p_{A1}}$	$V_{p_{Aj}}$	$V_{p_{An}}$	0	0	0
A_i	0				0	0	
A_m	0				0	0	

*On suppose dans cette démonstration qu'il n'y a pas d'interrelations entre les critères

Étape 5 : Dérivation de la super matrice pondérée à travers la normalisation des colonnes afin que la somme de chacune soit égale à 1.

Étape 6 : Élévation de la super matrice pondérée à une puissance arbitraire significativement grande pour obtenir la matrice limite caractérisée par l'égalité des valeurs constituant chaque ligne. Ces valeurs représentent les priorités globales des ensembles de critères - alternatives par rapport à l'objectif ciblé.

3.2.3 La méthode TOPSIS

TOPSIS est une méthode compensatoire fondée sur un principe purement géométrique (Figure 3.4), 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.

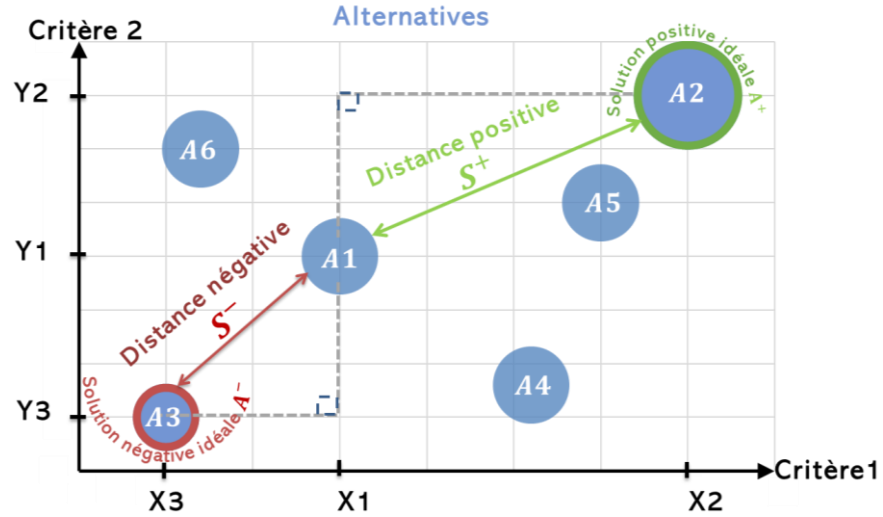


Figure 3.4 Représentation graphique du principe de la méthode TOPSIS

Cela est traduit mathématiquement comme suit [72]:

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

Étape 2 : Dérivation de la matrice de décision normalisée $(R_{ij})_{m \times n}$ à travers la normalisation des données d'entrée suivant l'équation (3.4):

$$R_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m X_{ik}^2}} \quad (3.4)$$

Étape 3 : Calcul de la matrice de décision normalisée pondérée $(V_{ij})_{m \times n}$ suivant l'équation (3.5):

$$V_{ij} = R_{ij} \times w_j \quad (3.5)$$

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 :

$$V_j^+ = (\max V_{ij} \mid j \in J^+), (\min V_{ij} \mid j \in J^-) \quad (3.6)$$

$$V_j^- = (\min V_{ij} \mid j \in J^+), (\max V_{ij} \mid j \in J^-) \quad (3.7)$$

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 (3.8) et (3.9), respectivement.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^+)^2} \quad (3.8)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^-)^2} \quad (3.9)$$

Où $i = 1, 2, 3, \dots, m$.

Étape 6 : Calcul du score de performance globale pour chaque alternative P_i , à travers l'équation (3.10), permettant d'effectuer un rangement en conséquence.

$$P_i = S_i^- / (S_i^- + S_i^+) \quad (3.10)$$

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

3.3 METHODES ELEMENTAIRES

3.3.1 La méthode de la matrice de criticité agrégée

La matrice de criticité est une méthode d'analyse qualitative inspirée du diagramme de Farmer [182]. Elle est très connue entre les praticiens de maintenance, du fait qu'elle constitue le fond mathématique de la fameuse technique d'évaluation des modes de défaillance AMDEC. D'une manière généralisée, elle peut être décrite comme une procédure permettant d'évaluer les alternatives suivant trois paramètres reflétant la fréquence d'occurrence d'un évènement néfaste P , ses conséquences (ou gravité) G et sa détectabilité D , dont leur produit représente la criticité C par rapport à l'évènement concerné et qui permet de juger le comportement des alternatives. Dans le contexte de maintenance, ces trois paramètres sont souvent associés à la probabilité d'occurrence d'une défaillance, sa gravité et sa maintenabilité à l'ordre, où l'évaluation de chacun est achevée à l'aide d'une échelle de jugement. Il est nécessaire de définir au moins les deux premiers paramètres parmi les trois pour l'implémentation de cette méthode.

D'après Nouredine et Nouredine [66], il est possible d'exploiter cette méthode suivant une perspective multicritère (matrice de criticité agrégée) en définissant la notion de criticité globale C_r pour un nombre donné n de critères, ayant des poids égaux, suivant une agrégation

multiplicative (équation (3.11)). Ce qui permet d'effectuer un rangement des alternatives en conséquence.

$$C_r = \prod_{i=1}^n C_i \quad (3.11)$$

Où $(C_i = P \times G \times D)$ représente la criticité locale sur le critère i , et C_r représente la criticité globale sur l'ensemble des critères pour une pondération équilibrée.

3.3.2 La procédure de la somme pondérée

Au contraire de la matrice de criticité et comme la majorité des méthodes élémentaires, la somme pondérée se limite simplement sur une procédure d'agrégation additive sans passer par un traitement des données du problème au préalable. Elle consiste à associer à chaque alternative a_i un indice de performance globale $V(a_i)$, tel que [179]:

$$V(a_i) = \sum_{j=1}^n \pi_j \cdot e_{ij} \quad (3.12)$$

Où e_{ij} représente l'évaluation de l'action a_i suivant le critère j , et π_j est le poids de ce dernier.

3.4 METHODES D'AGREGATION PARTIELLE

3.4.1 Les méthodes PROMETHEE

La famille de méthodes PROMETHEE 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 [183-185]:

- 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 de 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.

Ce processus est traduit sur le plan pratique par les étapes suivantes [66] :

Étape 1 : À partir de l'ensemble d'actions et d'un ensemble spécifié de critères pour un problème donné, la première étape de la méthode consiste à définir explicitement les poids des critères et ainsi les préférences locales de chaque action dans l'ensemble des critères.

Étape 2 : Définition de la fonction P qui exprime la préférence de l'action a_i sur l'action a_k , suivant un critère donné. Cette fonction, qui représente le degré de préférence du couple d'actions (a_i, a_k) , est définie à partir du sens d'optimisation du critère et de la forme du type de critère.

Il existe six types de critères, partant du type I (exprimant une préférence stricte de l'action a_i sur a_k) jusqu'au type VI, construits par extension de la forme I à travers l'introduction de deux seuils (au maximum) associés à l'indifférence et la préférence stricte, qui sont notés par les deux paramètres q et p , respectivement. Ces six critères sont définis comme suit [8]:

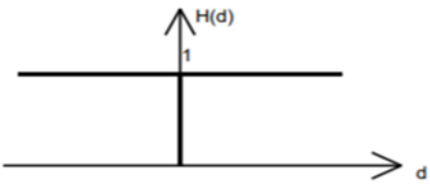
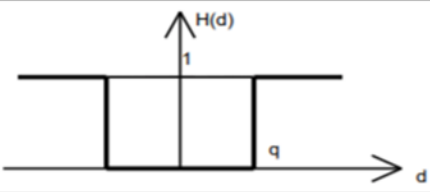
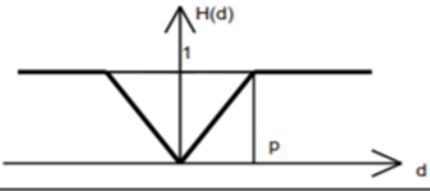
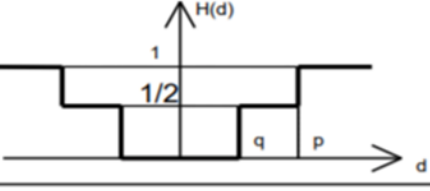
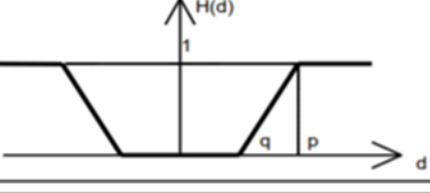
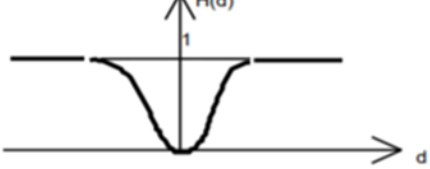
Type du critère	Forme correspondante	Paramètre
Critère usuel	Type I 	—
Quasi-critère	Type II 	q
Critère à préférence linéaire	Type III 	p
Critère à paliers	Type IV 	q, p
Critère à préférence linéaire avec zone d'indifférence	Type V 	q, p
Critère gaussien	Type VI 	σ

Figure 3.5 Les différents types de fonctions de préférence de PROMETHEE [8]

- **Type I :** Vrai-critère (critère usuel). Il est associé, en général, aux cas caractérisés par un caractère discret tel qu'un classement ordinal ou lorsqu'il s'agit d'une valeur de type tout ou rien. Cela impose une préférence stricte de l'action ayant l'évaluation la plus haute. Ce type de critère n'est pas concerné par la fixation d'un paramètre parmi les deux paramètres q et p .
- **Type II :** Quasi-critère. La fonction de type II est employée lorsque les seuils d'indifférence sont clairement apparents dans les données fournies sur le problème. Dans ce cas, les actions $a1$ et $a2$ sont indifférentes tant que l'écart $d_j(a1, a2)$ ne dépasse pas un seuil q_j (à fixer). En dépassant cette limite, la préférence devient stricte.
- **Type III :** Critère à préférence linéaire. La fonction type III est généralement employée lorsque les écarts entre les données présentent un caractère continu, ou encore lorsque toutes les valeurs intermédiaires entre les valeurs maximales et minimales de ces écarts sont possibles. Ce type de critères permet au décideur de préférer progressivement $a1$ à $a2$ en fonction de l'écart observé entre $f_j(a1)$ et $f_j(a2)$. Le degré de préférence croît alors jusqu'à l'arrivée au seuil p (à fixer). En dépassant cette limite, la préférence devient stricte.
- **Type IV :** Critère à paliers (pseudo-critère). La fonction type IV est employée dans des cas spécifiques dans lesquels on ne peut pas assumer qu'une alternative est strictement préférée ou indifférente à une autre. Les deux alternatives $a1$ et $a2$ sont donc considérées comme indifférentes tant que l'écart entre $f_j(a1)$ et $f_j(a2)$ ne dépasse pas q_j . Cependant ; entre q_j et p_j , le degré de préférence est faible (valorisé par un demi-point), et au-delà de p_j , la préférence devient stricte. Par conséquent, les deux seuils sont à fixer dans ce cas.
- **Type V :** Critère à préférence linéaire avec zone d'indifférence. Cette fonction est employée lorsqu'on peut clairement distinguer les seuils d'indifférence et de préférence stricte dans les données du problème. Comme le critère précédent ; dans ce cas, $a1$ et $a2$ sont considérées indifférentes tant que l'écart entre $f_j(a1)$ et $f_j(a2)$ ne dépasse pas q_j . En dépassant ce seuil, le degré de préférence croît linéairement avec d_j jusqu'au passage vers la préférence stricte, à partir de p_j . Donc, les deux paramètres q et p sont à fixer ici aussi.
- **Type VI :** Critère gaussien. C'est la fonction la plus souvent employée en pratique. Elle est associée en particulier aux cas dans lesquels le nombre d'alternatives est

suffisamment élevé (généralement 30 ou plus). Dans ces cas, il faut calculer l'écart type σ de la distribution associée aux données. Le degré de préférence croit de façon continue en fonction de d_j . Le paramètre σ est le seul à fixer dans ce cas. Pour un écart qui l'égale, on obtient une préférence moyenne.

Étape 3 : Évaluation de l'indice de préférence $\Pi(a_i, a_k)$, qui représente la mesure de la préférence globale du décideur de l'action a_i par rapport à a_k , sur l'ensemble des critères.

$$\Pi(a_i, a_k) = \sum P_j(a_i, a_k) \times w_j \quad (3.13)$$

C'est-à-dire, dans le cas où les critères ont le même poids :

$$\Pi(a_i, a_k) = \sum \frac{P_j(a_i, a_k)}{n} \quad (3.14)$$

Tel que n est le nombre de critères ($j = 1$ à n) et $P_j(a_i, a_k)$ est le degré de préférence du couple d'actions (a_i, a_k) pour le critère i .

Étape 4 : Calcul des deux flux positif et négatif, qui permet d'estimer toute action avec l'ensemble des autres actions. Le flux positif (ϕ^+) ou flux sortant de l'action a_i et le flux négatif (ϕ^-) ou flux entrant de l'action a_i définissent, respectivement, la puissance et la faiblesse de l'action a_i par rapport aux autres actions.

$$\phi^+(a_i) = \frac{\sum \pi(a_i, a_k)}{(m-1)} \quad \text{et} \quad \phi^-(a_i) = \frac{\sum \pi(a_k, a_i)}{(m-1)} \quad (3.15)$$

Tel que m est le nombre des actions ou alternatives considérées.

A ce stade, il est possible d'établir un rangement partiel à partir de l'intersection des deux flux entrant et sortant, suivant la première version de la méthode PROMETHEE tel que [1] :

- a_i est préférée à a_k si :

$$\begin{cases} \phi^+(a_i) > \phi^+(a_k) \text{ et } \phi^-(a_i) \leq \phi^-(a_k) \\ \text{ou} \\ \phi^+(a_i) = \phi^+(a_k) \text{ et } \phi^-(a_i) < \phi^-(a_k) \end{cases} \quad (3.16)$$

- a_i est indifférente de a_k si :

$$\phi^+(a_i) = \phi^+(a_k) \text{ et } \phi^-(a_i) = \phi^-(a_k) \quad (3.17)$$

- a_i et a_k sont incomparables lorsque :

$$\begin{cases} \phi^+(a_i) > \phi^+(a_k) \text{ et } \phi^-(a_i) > \phi^-(a_k) \\ \text{ou} \\ \phi^+(a_i) < \phi^+(a_k) \text{ et } \phi^-(a_i) < \phi^-(a_k) \end{cases} \quad (3.18)$$

Étape 5 : Arrivant à cette étape, il est possible d'établir un rangement complet des actions en calculant le flux net, à travers l'équation (3.19), qui s'inscrit sous la version II de la méthode PROMETHEE. Ce flux permet de classer les actions du flux net le plus élevé (la meilleure action) au flux net le plus petit (l'action la moins bonne).

$$\phi = \phi^+ - \phi^- \quad (3.19)$$

3.4.2 Les méthodes ELECTRE

ELECTRE est une famille de méthodes de surclassement plus ancienne et plus complexe que celle de PROMETHEE. Comme cette dernière elle s'est élargie au fil des années, donnant naissance à plusieurs variantes conçues pour divers types de problème, dont les principales sont [107]:

- ELECTRE I – Problématiques de choix avec des vrai-critères.
- ELECTRE IS – Adaptation d'ELECTRE avec des pseudo-critères (supportant des seuils d'indifférence, de préférence et de veto).
- ELECTRE II – Problématiques de rangement avec des vrai-critères.
- ELECTRE III – Problématiques de rangement avec des pseudo-critères.
- ELECTRE TRI – Problématiques de tri avec des pseudo-critères et des profils de limitation.

Ces méthodes partagent le même principe, consistant à vérifier s'il y a suffisamment d'arguments pour admettre qu'une alternative soit au moins aussi bonne qu'une autre (principe majoritaire), en absence d'une raison importante qui invalide cette affirmation (principe de respect des minorités). Ces deux clauses relèvent des deux notions de concordance et de discordance, respectivement, sur lesquels les méthodes ELECTRE sont centrées. Dans le cas où ils ne sont pas vérifiés, les deux alternatives sont considérées comme incomparables. Ce processus se traduit en pratique comme suit [179]:

Étape 1 : Calcul de l'indice de concordance, exprimant la force de la coalition des critères en faveur du surclassement, à travers l'équation (3.20).

$$C(a_i, a_k) = \begin{cases} \sum_{j:(e_{ij} \geq e_{kj})} \pi_j & \text{dans le cas d'ELECTRE I et II} \\ \sum_{j=1}^n \pi_j \cdot \delta_j(a_i, a_k) & \text{dans le cas d'ELECTRE IS, III et Tri} \end{cases} \quad \text{avec } \sum_j^n \pi_j = 1 \quad (3.20)$$

Où :

$$\delta_j(a_i, a_k) = \begin{cases} 1 & \text{si } -q_j \leq \Delta_j \\ \frac{\Delta_j + p_j}{p_j - q_j} & \text{si } -p_j \leq \Delta_j \leq -q_j \\ 0 & \text{si } -p_j > \Delta_j \end{cases} \quad (3.21)$$

Avec $\Delta_j = g_j(a_i) - g_j(a_k) = e_{ij} - e_{kj}$ et q_j et p_j étant toujours les seuils d'indifférence et de préférence stricte associés au critère j .

Étape 2 : Calcul des indices de discordance.

Pour ELECTRE I, II et IS :

$$D_j(a_i, a_k) = \begin{cases} 0 & \text{si } e_{kj} \leq e_{ij} \\ (e_{kj} - e_{ij}) & = -\Delta_j \text{ si } e_{kj} < e_{ij} \end{cases} \quad (3.22)$$

Pour ELECTRE III et Tri :

$$D_j(a_i, a_k) = \begin{cases} \frac{-(\Delta_j + p_j)}{v_j - p_j} & \text{si } -p_j \leq \Delta_j \\ 1 & \text{si } -v_j \leq \Delta_j < -p_j \\ 0 & \text{si } -v_j > \Delta_j \end{cases} \quad (3.23)$$

Où v_j est un seuil de veto.

Étape 3 : Construction des relations de surclassement à l'aide des équations suivantes :

Pour ELECTRE I :

$$\begin{cases} \text{si } (C(a_i, a_k) \geq c) \text{ et } (D_j(a_i, a_k) \leq d_j, \forall j) \Leftrightarrow a_i S a_k \\ \text{si } (C(a_i, a_k) \leq c) \text{ ou } (D_j(a_i, a_k) \geq d_j, \forall j) \Leftrightarrow a_i R a_k \end{cases} \quad (3.24)$$

Où $c \in [1/2, 1]$ et d_j est le niveau de discordance fixé et S et R sont des relations de surclassement et d'incomparabilité, respectivement.

Pour ELECTRE II :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } \left(\frac{\sum_{j:\Delta_j>0} \pi_j}{\sum_{j:(\Delta_j<0)} \pi_j} \right) \text{ et } \left\{ \begin{array}{l} \text{si } (C(a_i, a_k) \geq c_1) \text{ et } (\Delta_j \geq -d_{j2}, \forall j) \\ \text{ou} \\ \text{si } (C(a_i, a_k) \geq c_2) \text{ et } (\Delta_j \geq -d_{j1}, \forall j) \end{array} \right. \Leftrightarrow a_i S^F a_k \\ \text{Si } \left(\frac{\sum_{j:\Delta_j>0} \pi_j}{\sum_{j:(\Delta_j<0)} \pi_j} \right) \text{ et si } (C(a_i, a_k) \geq c_3) \text{ et } (\Delta_j \geq -d_{j2}, \forall j) \Leftrightarrow a_i S^f a_k \\ \text{Sinon : } a_i R a_k \end{array} \right. \quad (3.25)$$

Où :

c_1, c_2, c_3 sont les seuils de concordance tels que : $0.5 \leq c_3 < c_2 < c_1 < 1$

d_{j1}, d_{j2} sont les seuils de discordance tels que : $d_{j2} > d_{j1}$

S^f, S^F sont deux relations de surclassement faible et forte, respectivement.

Pour ELECTRE III et Tri :

$$\sigma(a_i, a_k) = \begin{cases} C(a_i, a_k) & \text{si } (J = \emptyset) \\ C(a_i, a_k) \cdot \prod_{j \in J} \frac{1 - D_j(a_i, a_k)}{1 - C(a_i, a_k)} & \text{si } (J \neq \emptyset) \end{cases} \quad (3.26)$$

Avec $J = \{j : D_j(a_i, a_k) > C(a_i, a_k)\}$

Où $\sigma(a_i, a_k)$ est le degré de crédibilité du surclassement qui détermine une relation de surclassement évaluée entre a_i, a_k .

Pour ELECTRE IS :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{si } (C(a_i, a_k) \geq c) \text{ et } (D_j(a_i, a_k) \leq (v_j - D), \forall j) \Leftrightarrow a_i S a_k \\ \text{Sinon } \Leftrightarrow a_i R a_k \end{array} \right. \quad (3.27)$$

Avec $D = q_j \cdot \frac{1 - C(a_i, a_k)}{1 - c}$, où v_j et q_j ne sont pas nécessairement constants.

Étape 4 : Exploitation des relations de surclassement pour sélectionner un sous-ensemble des choix recommandés, établir un rangement ou effectuer un tri, selon le cas.

3.5 METHODES D'AGREGATION LOCALES

3.5.1 La méthode de Goal Programing (GP)

Le Goal Programing [186] 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 :

$$\begin{aligned} & \text{Min}_{x \in A} \sum_{j=1}^n (\delta_j^+ + \delta_j^-) \\ \text{Sujet à : } & C_l(x) \leq 0, \quad l = 1, 2, \dots, L \\ & g_j(x) - \delta_j^+ + \delta_j^- = b_j, \quad j = 1, 2, \dots, n \\ & \delta_j^+, \delta_j^- \geq 0 \end{aligned} \quad (3.28)$$

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 .

$C_l(x)$ 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 $w_j^+ = w_j^- = 1$.

3.5.2 La méthode de Compromise Programming (CP)

Comme son appellation l'indique, Le Compromise Programming [186] 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 :

$$\text{Min}_{x \in A} \left[\sum_{j=1}^n \alpha_j^r \left[\frac{g_j(x^*) - g_j(x)}{g_j(x^*) - g_j(x_*)} \right]^r \right]^{1/r} \quad (3.29)$$

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.

3.6 CRITIQUES DES MAMC

Bien que les MAMC proposent une approche systématique et transparente qui renforce l'objectivité et génère des résultats auxquels on peut se fier avec une satisfaction raisonnable, elles

sont sujettes à des mauvaises manipulations qui peuvent conduire à un faux sentiment d'exactitude. Ces manipulations résident dans [176]:

1. **Les algorithmes d'agrégation** : différentes MAMC donnent des résultats différents lorsqu'elles sont appliquées au même problème multicritère. La sélection d'une MAMC appropriée à partir d'une longue liste de méthodes n'est souvent pas simple et peut éventuellement contrôler le résultat final du processus de prise de décision.
2. **La compensation** : les méthodes d'agrégation complète de type additif (par ex, AHP) permettent l'échange entre une bonne performance sur un critère et une mauvaise performance sur un autre critère. Une telle agrégation perd souvent des informations importantes. Les jugements de valeur sous-jacents à la procédure d'agrégation sont donc discutables et probablement inacceptables du point de vue des critères sensibles qui sont régis par des limites strictes tels que la santé publique et de la réglementation. Le problème multicritère devient donc mal défini mathématiquement en raison du conflit flagrant entre les critères. C'est pourquoi une axiomatisation complète de la théorie de la décision multicritère est relativement difficile.
3. **Le processus d'élicitation** : la manière dont l'information subjective (ex : poids et seuils de préférence) est obtenue n'est pas anodine et est susceptible d'influencer les résultats.
4. **Les options incomparables** : le but de tout MAMC étant de réduire le nombre d'incomparabilités, les problèmes multicritères sont souvent réduits à des problèmes à un seul critère où chaque alternative reçoit une seule valeur abstraite lors de l'agrégation des données, ce qui entraîne la perte d'informations utiles. Pour un profane, il peut être facile de comprendre le coût d'une alternative en valeurs monétaires plutôt qu'une valeur abstraite indiquant que l'alternative A est meilleure ou pire que l'alternative B par une valeur spécifiée.
5. **L'effet des échelles** : certaines MAMC tirent des conclusions basées sur des échelles dans lesquelles les évaluations sont exprimées, ce qui est inacceptable. Par exemple, si deux options de stratégie (A et B) sont évaluées sur 2 critères ayant des poids égaux (0.5 pour chacun) : le coûts (A = 10000, B = 18000) et l'impact sur l'amélioration de la qualité (A = 0,2, B = 0,8), leur performance globale serait donc (A = 5000,1 et B = 9000,4). Si les coûts étaient ramenés à une échelle de 0 à 1, alors l'importance relative des deux critères serait mieux représentée. Cependant, la mauvaise

normalisation des données peut influencer les résultats grandement, en amplifiant ou en abrégant les écarts.

6. **La structuration des problèmes** : les résultats peuvent être manipulés par omission ou ajout de certains critères ou alternatives pertinentes. Il a été rapporté que les MAMC souffrent de renversements de rang par l'introduction de nouvelles alternatives ou le retrait d'une alternative existantes. Ce phénomène se manifeste comme un changement dans le classement obtenu après avoir modifié le groupe d'actions précédemment rangé [187].
7. **L'exigence d'informations supplémentaires** : en fonction de la quantité d'informations supplémentaires requises par les différentes MAMC, des effets de « boîte noire » sont susceptibles de se produire, compromettant ainsi la capacité du décideur à suivre clairement le processus de décision et à évaluer les résultats. C'est pourquoi les solutions obtenues sont généralement peu-interprétables.
8. **L'incertitude** : Les résultats sont souvent fournis avec deux décimales, ce qui donne un faux sentiment de précision compte tenu des incertitudes des données d'entrée (notamment les données qualitatives ou celles basées sur des jugements subjectifs) et de la propagation d'erreur dans le modèle. L'incertitude est également inhérente au processus de prise de décision en ce sens qu'il est difficile de quantifier et de représenter les performances de la plupart des alternatives par une valeur unique.

3.7 CHOIX D'UNE MAMC

D'après [188], la sélection d'une MAMC appropriée à partir d'une liste d'options disponibles est elle-même un problème multicritère, ce qui est tout à fait logique car divers facteurs sont mis en jeu ; à leur tête sa facilité de mise en œuvre et sa compatibilité avec le cas étudié. Le principe d'une méthode multicritère et son fondement mathématique constituent les indicateurs de base qui reflètent sa compatibilité avec un problème spécifié et sa capacité de le formuler analytiquement, qu'il soit de nature discrète (problème de tri, de choix, ou de rangement) ou continue (optimisation multi-objectif). Le niveau d'adaptation avec les particularités du problème joue ainsi un rôle principal dans la sélection de la méthode de modélisation. Celui-ci se manifeste suivant plusieurs propriétés : acceptation ou non de compromis entre critères, support ou non de prise de décision de groupe, disponibilité ou non de support logiciel pour les calculs longs, prérequis informationnels lourds ou légers, support ou non d'intégration des critères qualitatifs, support de feedback entre alternatives et critères, acceptation d'un grand nombre d'alternatives / critères...

etc. Dans cette logique, Wątróbski et al. [189] ont proposé un support interactif (disponible en ligne) qui facilite la sélection à travers le filtrage des méthodes selon les caractéristiques supportées. Ainsi, Guitouni et Martel [190] ont proposé des lignes directrices intéressantes qui peuvent fournir de l'assistance à ce stade. Dans [191], les mêmes auteurs ont collaboré avec d'autres chercheurs pour développer une approche systématique qui vise à faciliter la sélection d'une MAMC. Bien que cette approche soit utile et bien structurée, elle nécessite une connaissance approfondie des caractéristiques des méthodes pour son implémentation. Pour certains chercheurs, les études comparatives sont la solution clé pour fournir de l'assistance fiable à cet égard, surtout lorsqu'on considère que les solutions précédentes peuvent encore conduire vers une liste de différentes méthodes ayant des caractéristiques en commun. Cependant, il y a une pénurie significative dans ce type de recherches par rapport à la diversité des méthodes disponibles, en raison de la focalisation des recherches sur le développement et l'amélioration des modèles d'aide à la décision, tout en oubliant leur sélection adéquate suivant les problèmes posés.

Enfin, il est à noter qu'il existe quelques problèmes génériques associés aux méthodes multicritères, tel que l'inversion de rang dans les problématiques de rangement (voir le 6^{ème} point de la section 3.6), qui se produit même avec les méthodes largement utilisées telles que TOPSIS, PROMETHEE et AHP [187]. Il existe de nombreuses opinions et visions sur l'origine de tels problèmes. Certains chercheurs les lient à la méthode utilisée elle-même, tandis que d'autres soutiennent qu'ils sont principalement dus à la mauvaise modélisation ou l'application inadéquate et non aux méthodes. Par conséquent, il est important de maîtriser la technique choisie et de la comprendre profondément pour procéder convenablement lors de la modélisation d'une décision.

3.8 CONCLUSION

La classification des méthodes multicritères révèle une large gamme de techniques de modélisation suivant divers principes et modalités. La diversité et la multitude de ces méthodes constituent elles-mêmes un aspect de la complexité de l'aide à la décision qui se manifeste par la difficulté qu'elles provoquent lors du choix d'une MAMC, étant donné que les méthodes multicritères retournent souvent des résultats différents lorsqu'elles sont appliquées au même problème.

La méconnaissance des caractéristiques de ces méthodes peut conduire à des mauvaises recommandations qui ne sont pas alignées sur les objectifs souhaités. La bonne maîtrise des techniques dans ce contexte demeure donc indispensable. Ainsi, les études et les recherches qui tombent dans cette case sont fortement encouragées.

Chapitre 4: Contribution à la Mise en Œuvre des MAMC dans la Fonction Maintenance

Malgré l'existence de nombreux travaux de maintenance qui relèvent de l'aide à la décision, il existe toujours des lacunes qui doivent être comblées et plusieurs concepts qui peuvent être développés et mis en œuvre en pratique. Dans cette logique, l'objectif de ce chapitre est d'exploiter les MAMC précédemment étudiées pour proposer des contributions scientifiques pertinentes, en se basant sur l'étude bibliographique élaborée. Cela passe d'abord par le choix d'un centre de décision à cibler et l'évaluation des différentes possibilités d'y contribuer, puis l'adoption d'une méthode de modélisation adéquate tout en visant à adresser ses limitations et faiblesses. En conséquence, une approche d'aide à la décision est proposée et mise en œuvre, suivie par une analyse détaillée, qui englobe une série d'études comparatives significatives et des critiques approfondies.

4.1 CONTRIBUTION CIBLEE : MOTIVATION ET OBJECTIFS

De tous les centres de décision précédemment identifiés, la hiérarchisation des équipements revêt la plus grande importance, compte tenu du rôle axial qu'elle joue dans le pilotage de la fonction maintenance. D'une part, elle permet d'orienter ses différentes sous-fonctions vers le ciblage des équipements les plus critiques, en assurant qu'ils reçoivent des stratégies convenantes, des pièces de rechange suffisantes, et des budgets adéquats pour satisfaire les dépenses résultantes. D'autre part, c'est la décision qui conduit à l'identification des équipements concernés par les analyses de sureté de fonctionnement et à l'élaboration de leurs programmes de maintenance, permettant ainsi d'atteindre une production stable respectant les normes de qualité et les délais de livraison. Par conséquent, ses conséquences n'affectent pas seulement la planification et l'ordonnancement des interventions préventives ; comme promu par le stéréotype commun, mais influencent plutôt de nombreuses décisions aussi importantes qui en découlent, ce qui met en évidence l'intérêt de l'aide à la décision à ce stade. Les méthodes classiques utilisées dans ce contexte imposent des restrictions sévères, vu qu'elles ne permettent de retenir qu'un seul critère de priorisation, comme dans l'analyse de Pareto, ou un critère regroupant des paramètres fixes ; comme dans la matrice de criticité (issue de l'AMDEC), alors qu'en réalité la criticité dépend de multiples facteurs mis en jeu (fiabilité, maintenabilité, disponibilité, production, sécurité, coût, etc.) avec des poids variables reflétant leur importance. En considérant que ces facteurs sont souvent conflictuels, le cadre méthodologique de l'analyse multicritère est bien adapté pour le traitement de ce problème.

D'après notre étude bibliographique (Chapitre 2), il existe divers MAMC qui ont été mises en œuvre avec succès pour la résolution des problèmes de priorisation de maintenance ; à leur tête (selon la fréquence d'utilisation) : AHP, PROMETHEE et TOPSIS (Figure 4.1).

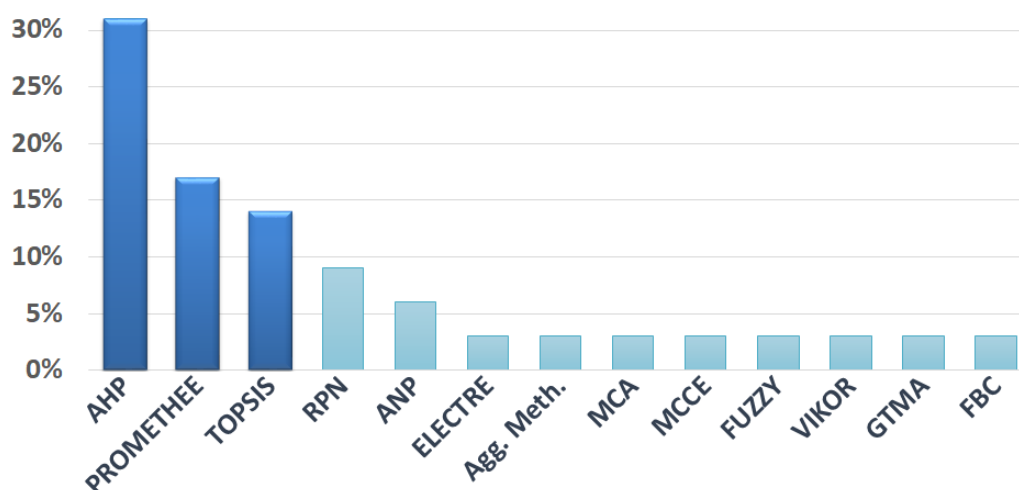


Figure 4.1 Fréquence d'utilisation des MAMC dans les travaux de priorisation

Bien que ces méthodes soient valables et reconnues pour une telle application, le choix d'une d'entre elles est en soi une question assez insoluble, étant donné que différentes MAMC conduisent souvent vers des recommandations différentes lorsqu'elles sont appliquées au même problème [75, 190]. De plus, compte tenu des dépendances liées à cette décision stratégique, la moindre amélioration du classement final des priorités peut en résulter des gains globaux importants. Dans de nombreux cas similaires, les études comparatives ont été la solution qui a répondu à de tels dilemmes et encadré une application adéquate des MAMC, conduisant ainsi vers une meilleure estimation de la criticité en termes de justesse et de précision. Parmi celles-ci, l'étude réalisée par Dehghanian et al. [68], dans laquelle les versions standard et floues de la méthode AHP ont été confrontées à travers une étude de cas, traitant la hiérarchisation des composants d'un système de distribution électrique, où les résultats finaux ont privilégié la version floue pour son avantage en termes de compensation des incertitudes. Dans un travail similaire, Patel et Dwivedi [84] ont employé les méthodes AHP et GTMA pour identifier les composants critiques d'une centrale thermique. Bien que l'échantillon retenu dans l'étude fût trop petit pour juger les résultats, les rangements des deux méthodes correspondaient pour l'équipement le plus critique, contrairement au reste des équipements. D'autre part, Pourjavad et al. [117] ont comparé les méthodes TOPSIS, ELECTRE et VIKOR dans le contexte de priorisation des lignes de production. Cependant, les résultats obtenus n'étaient pas suffisamment décisifs pour aboutir à une conclusion. En conséquence, les auteurs ont plutôt proposé une méthode agrégée ; combinant les résultats des méthodes précédentes, comme solution optimale. Néanmoins, cette solution reste peu pratique, étant donné qu'elle nécessite de passer par les méthodes précédentes pour son implémentation. De plus, à l'exception de TOPSIS, la comparaison n'a pas impliqué des méthodes connues par leurs applications dans des travaux connexes telles qu'AHP et PROMETHEE. Cette dernière était à son tour confrontée à la méthode de la matrice de criticité, dans [66], dans le cadre d'une approche de priorisation des équipements d'un complexe gazier, où elle a montré des résultats bien meilleurs en termes de précision et de justesse. Cependant, PROMETHEE est de loin mathématiquement plus structurée que la matrice de criticité qui est basée sur un simple calcul arithmétique. La comparaison qui doit se faire doit donc être avec des méthodes du même niveau technique. À la lumière de ce qui précède et en réponse à la problématique d'aide à la décision soulevée à ce niveau (la difficulté de choix de la méthode à utiliser), la confrontation des trois méthodes les plus largement utilisées dans ce contexte ; AHP, PROMETHEE et TOPSIS, fait partie de nos principaux objectifs.

Parmi les trois méthodes précédentes, la littérature montre que AHP est la plus souvent privilégiée lorsqu'il s'agit d'une approche de priorisation; dans une revue récente des travaux connexes, Chong et al. [19] ont rapporté qu'elle est de loin la méthode la plus fréquemment utilisée, ce qui s'accorde avec les statistiques élaborées dans le chapitre 2. Cela peut être dû à diverses raisons ; commençant par sa capacité à décomposer un problème complexe suivant un raisonnement simple et logique. Ainsi, c'est l'une des rares méthodes qui intègrent une technique structurée de pondération, permettant de générer des poids raisonnables reflétant l'importance réelle des critères au lieu de les spécifier explicitement ; ce qui peut laisser place à des estimations imprécises et des incertitudes. De plus, elle fournit même la possibilité de vérifier les incohérences présentes dans les jugements du décideur, afin d'assurer la robustesse du modèle. Dans l'ensemble, elle est capable de traiter les problèmes multicritères efficacement [154]. Cependant, en examinant ses applications dans les approches de priorisation d'équipements, un conflit déroutant s'élève autour des modes adoptés pour synthétiser les priorités : bien que le mode idéal de la méthode AHP (qui fournit un rangement par performance) soit hypothétiquement plus adapté au problème ; étant donné qu'il s'agit d'une évaluation des performances suivant des critères multiples, les applications pertinentes tendent plutôt à utiliser le mode distributif ; qui est associé à l'estimation de dominance et non la performance [181], ce qui incarne une contradiction explicite entre la théorie et la pratique. En fait, cela n'est pas la seule préoccupation associée à la méthode AHP, étant donné que son implémentation devient plus compliquée et moins pratique à mesure que le nombre de critères retenus et / ou d'équipements considérés augmente ; en raison des comparaisons binaires qu'elle requiert (au moins $m(m - 1)/2$ comparaisons par critère, pour un nombre donné m d'équipements). C'est la raison pour laquelle Saaty - son développeur - recommande clairement de l'utiliser pour pas plus de 7 critères, tandis que d'autres chercheurs conseillent de ne l'employer qu'avec un ensemble d'alternatives aussi restreint que possible, pour la même raison. De plus, en se reposant uniquement sur ces comparaisons binaires, cette méthode tend à s'appuyer uniquement sur les performances relatives, négligeant les performances réelles des alternatives. Cela risque d'entraîner une perte d'information car les ratios de comparaison n'indiquent pas les écarts, et donc une imprécision peut se produire au niveau des résultats. Bien que ces écarts soient compensés par les informations qui s'accumulent à travers les comparaisons transitives, celles-ci peuvent être insuffisantes, vu que leur exactitude dépend du nombre d'alternatives et de la variance de leurs performances sur chacun des critères. D'autre part, la dépendance qui s'établit sur les comparaisons transitives signifie implicitement que des renversements de rang peuvent en résulter après avoir modifié l'ensemble des alternatives considérées (c-à-d. ajout ou suppression d'une alternative). En effet, cela est ainsi l'une des raisons

principales d'occurrence des conflits, récemment évoquées par Bafahm et Sun [192], au niveau des résultats ; qu'il s'agisse de priorités, de décisions ou de transitivité des relations préférentielles, car ce sont pratiquement tous des manifestations différentes du phénomène de renversement de rang. Les chercheurs tentent toujours de prévenir ou du moins de justifier ce problème, mais rien n'est encore atteint [187]. Compte tenu de l'ensemble de ces préoccupations, le reste de nos objectifs se résume dans les buts suivants :

1. Résoudre le conflit lié à l'emploi des deux modes de synthèse de la méthode AHP pour le traitement du problème de priorisation d'équipements.
2. Adresser ce problème en soi à travers l'élaboration d'une approche optimisée basée sur AHP ; qui cherche à bénéficier de ses avantages et à adresser ses faiblesses, simultanément. Cette approche est donc orientée vers les buts suivants :
 - Surmonter les limitations causées par les comparaisons binaires afin de pouvoir supporter un grand nombre d'équipements.
 - Apporter plus de justesse et de précision dans la détermination des priorités afin de maximiser les gains.
 - Contribuer à faire face aux problèmes associés à la méthode AHP dans ce contexte ; à savoir l'occurrence des renversements des rangs ou des conflits au niveau du rangement obtenu, afin d'assurer des résultats robustes.

4.2 CONCEPT ET METHODOLOGIE DE RECHERCHE

À partir de ce qui précède, il est possible de regrouper l'ensemble des objectifs identifiés suivant 2 niveaux [193, 194]: le premier consiste à cibler la problématique d'aide à la décision (P.A.D) associée à la priorisation d'équipements ; qui se manifeste comme une question de choix entre les méthodes les plus fréquemment utilisées, tandis que le deuxième niveau consiste à cibler la problématique de décision (P.D) en soi à travers l'élaboration d'une approche bien adaptée à la priorisation des équipements.

Le cadre méthodologique adopté vise à rassembler ces deux niveaux dans une démarche structurée (Figure 4.2), qui est basée sur une étude de cas. A cette fin, nous adoptons le même cas d'étude traité précédemment dans [66] ; où les auteurs ont conduit une approche similaire centrée sur la méthode PROMETHEE II, qui faisait partie d'une comparaison avec la méthode de la matrice de criticité agrégée.

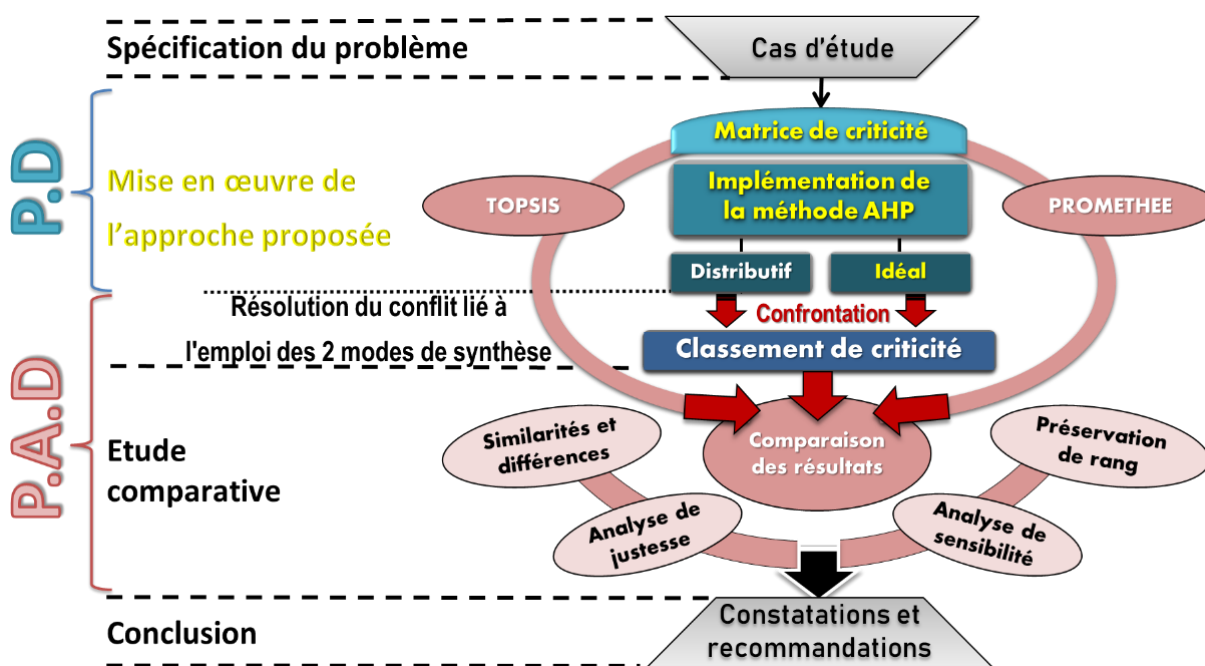


Figure 4.2 Support méthodologique de l'approche proposée

L'approche proposée pour la priorisation des équipements est centrée sur la méthode AHP, les autres méthodes sont introduites pour des fins de comparaison. Le concept du cadre méthodologique adopté s'explique à travers les étapes suivantes :

- Afin de prévenir les incertitudes d'influencer les résultats (notamment, dans la phase d'interprétation et de comparaison), des données de l'historique industriel sont utilisées plutôt que des évaluations qualitatives, et des poids égaux sont adoptés.
- La méthode de la matrice de criticité est exploitée pour traiter ces données et générer des scores normalisés et significatifs qui alimentent la méthode AHP. Cette étape vise à capturer les performances réelles des équipements. Cela contribue également à faciliter l'interprétation du rangement résultant de priorités, ultérieurement, ce qui est très bénéfique pour l'étude comparative et la vérification de la validité des résultats, qui suivra la mise en œuvre.
- A ce stade, il est possible de programmer un algorithme itératif pour générer les comparaisons binaires, exigées par la méthode AHP, à partir des scores obtenus, ce qui permet de surmonter les restrictions limitant le nombre d'équipements / critères supporté.
- Les performances capturées sont incorporées dans le modèle proposé à l'aide du mode idéal. Toutefois, les priorités sont générées suivant les deux modes de synthèse, dans le but de résoudre le conflit soulevé à propos de leur emploi ; à travers une comparaison.

- L'approche proposée devrait non seulement apporter plus de précision au niveau des résultats, mais aussi contribuer à faire face aux problèmes de modélisation connexes (unités de mesure différentes, échange mal établi entre les critères, renversement de rang...). Cela est vérifié à travers une comparaison, couvrant plusieurs perspectives, avec des approches similaires (combinant la matrice de criticité avec PROMETHEE et TOPSIS).
- D'autre part, la comparaison avec les autres approches permet de répondre à la problématique d'aide à la décision associée à la problématique de priorisation d'équipements (du fait qu'elle confronte les 3 méthodes les plus largement utilisées dans ce contexte).

4.3 PRESENTATION DU CAS D'ETUDE

Le problème posé consiste à hiérarchiser un échantillon de 12 équipements, appartenant à un train de production dans un complexe gazier, pour des fins de maintenance. Dans ce contexte, les alternatives ou actions sont les 12 équipements et les critères retenus sont liés à : leur fiabilité, les pertes de production qu'ils engendrent et leur impact sur les coûts. En exploitant la méthode de la matrice de criticité, chacun de ces critères a été évalué sur une échelle de jugement de 4 degrés de criticité (allant du plus au moins critique), suivant 2 paramètres, par critère, exprimant la probabilité d'occurrence de la défaillance (P) ainsi que sa gravité (G) ; qui sont définies à partir des données d'historique correspondantes (Tableau 4.1).

Tableau 4.1 Seuils des 2 paramètres P et G par critère

Echelle			1	2	3	4
		P	Fréquent	Probable	Lointain	Improbable
		G	Grave	Moyen	Faible	Négligeable
Fiabilité	MTBF (heures)	P	≤ 250	$\leq 1000 > 250$	$\leq 2000 > 1000$	> 2000
	Disponibilité	G	$\leq 80\%$	$> 80\% \leq 85\%$	$> 85\% \leq 95\%$	$> 95\%$
Production	Arrêts/An	P	≥ 3	$< 3 \geq 1$	$< 1 > 0$	$= 0$
	MAP (%)	G	> 5	$\leq 5 > 2$	$\leq 2 > 0$	$= 0$
Coût	Analyse ABC	P	A : 20-50	B : 30-15	C : 50-5	
	Coût / Coût global	G	≥ 0.075	$< 0.075 \geq 0.01$	$< 0.01 > 0.002$	≤ 0.002

*MTBF= Mean Time Between Failures (Temps moyen entre défaillances) / *MAP = Manque à produire

Les données utilisées [66] ont permis de générer la table des performances (Tableau 4.2) qui évalue chaque équipement codifié dans l'espace des critères suivant les 2 paramètres P et G . Les évaluations finales de chaque équipement sur les 3 critères ont été obtenues en introduisant la notion de la criticité C , par critère, qui est définie comme le produit de la probabilité d'occurrence par la gravité ($C = P \times G$). Ces valeurs constituent les entrées qui alimentent l'approche proposée.

Tableau 4.2 La table des performances résultante

Code	Equipement	Criticité (C)		
		Fiabilité	Production	Coût
E1	Compresseur 2ème étage pour MCR	16	9	1
E2	Turbine de compresseur de gaz combustible	16	16	1
E3	Soufflante de réactivation	16	16	1
E4	Compresseur 1er étage pour MCR	16	6	1
E5	Compresseur de propane	16	6	1
E6	Echangeur principal	12	1	1
E7	Colonne absorbeur de MEA	16	9	2
E8	Compresseur gaz combustible	16	16	2
E9	Pompe d'huile de lubrifiant principale	16	16	6
E10	Pompe de recyclage butane	8	16	2
E11	Pompe de secours de recyclage butane	12	16	2
E12	Filtre de poussière	16	3	4

4.4 IMPLEMENTATION DE L'APPROCHE PROPOSEE

4.4.1 Établissement du modèle hiérarchique de la méthode AHP

Après avoir identifié les alternatives à classer d'une part ; qui sont les 12 équipements (E1, E2, ..., E12), et les critères d'autre part ; qui sont la fiabilité (C1), la production (C2) et les coûts (C3), la modélisation de la hiérarchie du problème peut être représentée comme illustré dans la figure 4.3, permettant ainsi de lancer la mise en œuvre de la méthode AHP. Le logiciel en ligne Expert Choice v11.5 a été choisi à cette fin, étant donné qu'il prend en charge les deux modes de synthèses ; distributif et idéal, de la méthode AHP.

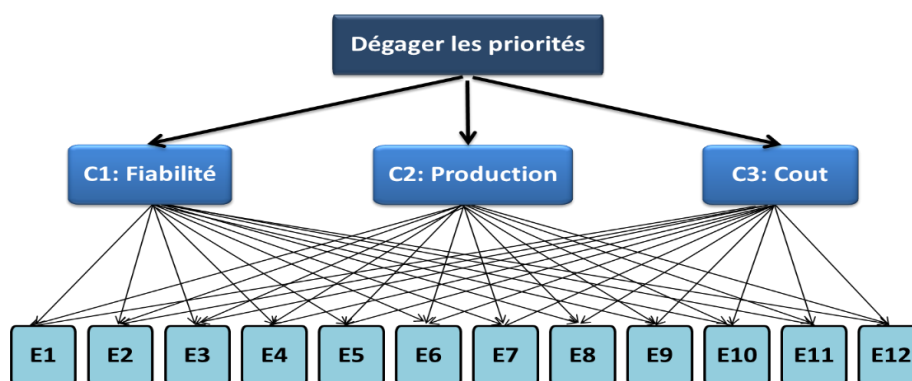


Figure 4.3 Hiérarchie du problème

4.4.2 Comparaisons binaires (évaluation par paire)

L'industrie des hydrocarbures, dont fait partie le cas étudié, implique de multiples lignes de production et donc un grand nombre d'équipements. Ainsi, de nombreuses comparaisons par paires sont nécessaires, ce qui allonge le temps d'implémentation, augmente le risque d'incohérences et impose éventuellement des révisions correctives, lors de la mise en œuvre de la méthode AHP. L'approche proposée surmonte cette limitation en utilisant les scores de la matrice de criticité (Tableau 4.2) comme des entrées, et qui sont exprimés sur la même échelle pour tous les critères.

Par conséquent, un algorithme itératif peut être utilisé pour automatiser les comparaisons par paires à travers une série de divisions consécutives. Un code MATLAB a été développé à cette fin, permettant de générer des matrices de jugement parfaitement cohérentes ($C_R = 0\%$), correspondant aux critères de fiabilité (C1), de production (C2) et de coût (C3), comme indiqué dans les tableaux 4.3, 4.4 et 4.5, respectivement.

Tableau 4.3 Matrice de jugement correspondante au critère fiabilité

(C1)	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
E1	1	1	1	1	1	1.33	1	1	1	2	1.33	1
E2	1	1	1	1	1	1.33	1	1	1	2	1.33	1
E3	1	1	1	1	1	1.33	1	1	1	2	1.33	1
E4	1	1	1	1	1	1.33	1	1	1	2	1.33	1
E5	1	1	1	1	1	1.33	1	1	1	2	1.33	1
E6	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	1	0.75	0.75	0.75	1.5	1	0.75
E7	1	1	1	1	1	1.33	1	1	1	2	1.33	1
E8	1	1	1	1	1	1.33	1	1	1	2	1.33	1
E9	1	1	1	1	1	1.33	1	1	1	2	1.33	1
E10	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.66	0.5	0.5	0.5	1	0.66	0.5
E11	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	1	0.75	0.75	0.75	1.5	1	0.75
E12	1	1	1	1	1	1.33	1	1	1	2	1.33	1

Tableau 4.4 Matrice de jugement correspondante au critère production

(C2)	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
E1	1	0.56	0.56	1.5	1.5	9	1	0.56	0.56	0.56	0.56	3
E2	1.77	1	1	2.66	2.66	16	1.77	1	1	1	1	5.33
E3	1.77	1	1	2.66	2.66	16	1.77	1	1	1	1	5.33
E4	0.66	0.37	0.37	1	1	6	0.66	0.37	0.37	0.37	0.37	2
E5	0.66	0.37	0.37	1	1	6	0.66	0.37	0.37	0.37	0.37	2
E6	0.11	0.06	0.06	0.16	0.16	1	0.11	0.06	0.06	0.06	0.06	0.33
E7	1	0.56	0.56	1.5	1.5	9	1	0.56	0.56	0.56	0.56	3
E8	1.77	1	1	2.66	2.66	16	1.77	1	1	1	1	5.33
E9	1.77	1	1	2.66	2.66	16	1.77	1	1	1	1	5.33
E10	1.77	1	1	2.66	2.66	16	1.77	1	1	1	1	5.33
E11	1.77	1	1	2.66	2.66	16	1.77	1	1	1	1	5.33
E12	0.33	0.18	0.18	0.5	0.5	3	0.33	0.18	0.18	0.18	0.18	1

Tableau 4.5 Matrice de jugement correspondante au critère coût

(C3)	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
E1	1	1	1	1	1	1	0.5	0.5	0.16	0.5	0.5	0.25
E2	1	1	1	1	1	1	0.5	0.5	0.16	0.5	0.5	0.25
E3	1	1	1	1	1	1	0.5	0.5	0.16	0.5	0.5	0.25
E4	1	1	1	1	1	1	0.5	0.5	0.16	0.5	0.5	0.25
E5	1	1	1	1	1	1	0.5	0.5	0.16	0.5	0.5	0.25
E6	1	1	1	1	1	1	0.5	0.5	0.16	0.5	0.5	0.25
E7	2	2	2	2	2	2	1	1	0.33	1	1	0.5
E8	2	2	2	2	2	2	1	1	0.33	1	1	0.5
E9	6	6	6	6	6	6	3	3	1	3	3	1.5
E10	2	2	2	2	2	2	1	1	0.33	1	1	0.5
E11	2	2	2	2	2	2	1	1	0.33	1	1	0.5
E12	4	4	4	4	4	4	2	2	0.66	2	2	1

4.4.3 Synthèse des résultats

À ce stade, les vecteurs des performances locales des équipements peuvent être extraits à l'aide de la méthode de la valeur propre. En adoptant une pondération équilibrée (environ 0,333 par critère), la dernière étape permet de générer les performances globales des alternatives suivant les deux modes de synthèse (distributif et idéal). Les résultats sont résumés dans le tableau 4.6.

Tableau 4.6 Les résultats obtenus

Code	Performances locales (par critère)			Performances globales	
	Fiabilité	Production	Coût	Distributif	Idéal (approche proposée)
E1	0.0910	0.0690	0.0420	0.067	0.075
E2	0.0910	0.1230	0.0420	0.085	0.094
E3	0.0910	0.1230	0.0420	0.085	0.094
E4	0.0910	0.0460	0.0420	0.060	0.067
E5	0.0910	0.0460	0.0420	0.060	0.067
E6	0.0680	0.0070	0.0420	0.039	0.042
E7	0.0910	0.0690	0.0830	0.081	0.082
E8	0.0910	0.1230	0.0830	0.099	0.101
E9	0.0910	0.1230	0.2500	0.155	0.130
E10	0.0450	0.1230	0.0830	0.084	0.079
E11	0.0680	0.1230	0.0830	0.092	0.090
E12	0.0910	0.0230	0.1670	0.094	0.080

4.4.4 Extraction des rangements obtenus

Les résultats obtenus permettent de ranger les équipements du plus critique (bas) au moins critique (haut), suivant chacun des 2 modes distributif et idéal (Figure 4.4).

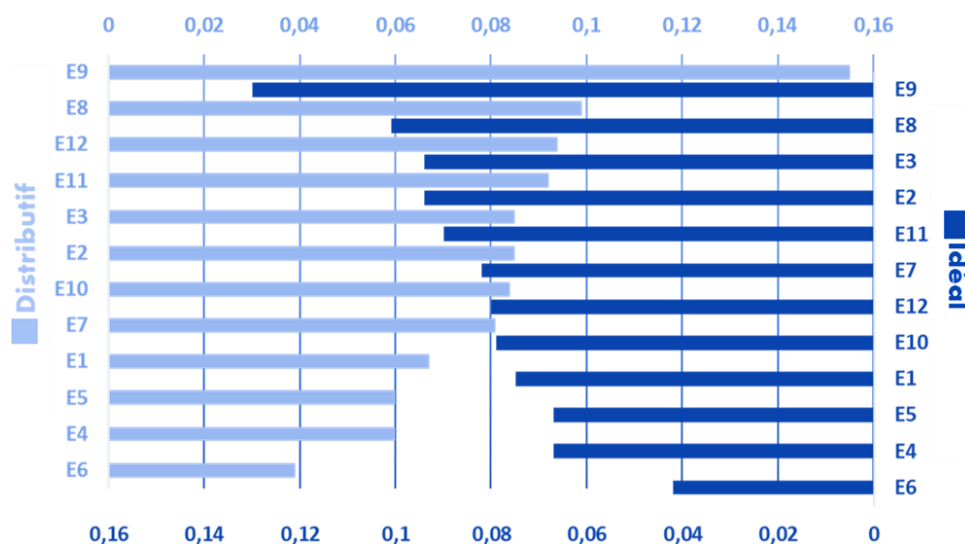


Figure 4.4 Rangement des équipements obtenu par les 2 modes de synthèse de la méthode AHP

4.5 CONFRONTATION DES RESULTATS DES DEUX MODES

Les classes de priorité obtenues, en utilisant les deux modes de synthèse, sont indiquées dans le tableau 4.7, ce qui permet d'analyser et comparer les résultats.

Tableau 4.7 Comparaison des résultats des 2 modes de synthèse de la méthode AHP

Classe de priorité	Rangement de criticité obtenu	
	AHP-DISTRIBUTIF	AHP-IDEAL
1	E6	E6
2	E4 E5	E4 E5
3	E1	E1
4	E7	E10
5	E10	E12
6	E2 E3	E7
7	E11	E11
8	E12	E2 E3
9	E8	E8
10	E9	E9

*L'écriture en gras indique les similitudes dans la deux classements

4.5.1 Discussion et interprétation des résultats

Environ 60% des équipements sont classés indifféremment suivant les deux modes de synthèse ; il s'agit de E6, E4-E5, E1 et E11 dans les positions 1^{ère}, 2^{ème}, 3^{ème} et 7^{ème}, respectivement, en plus de E8 et E9 qui occupent toujours les dernières classes (les classes 9 et 10, à l'ordre). Notons que le positionnement des deux équipements E4 et E5 dans la même position (2^{ème}), suivant les deux modes, est justifié par l'égalité de leurs scores sous les trois critères dans la table de performance. Idem pour E2 et E3 qui sont classés en 6^{ème} position suivant le mode distributif, et en 8^{ème} position suivant le mode idéal.

Les différences entre les deux rangements concernent les 5 équipements E2-E3 et E12, E7 et E10, et se reflètent dans les classes 4, 5, 6 et 8, où l'on remarque que E7 est placé dans la 4^{ème} classe du mode distributif, tandis que dans le mode idéal cette classe est occupée par E10. Ce dernier apparaît dans la 5^{ème} classe selon le mode distributif, alors que E12 occupe cette classe dans le rangement du mode idéal, suivi de E7 en 6^{ème} position ; qui est à son tour occupée par E2-E3 dans le Rangement du mode distributif. En revanche, ces deux équipements apparaissent dans la 8^{ème} classe du mode idéal ; face à E12 dans la classification du mode distributif.

En comparant les priorités entre les paires d'équipements appartenant au sous-groupe classé différemment dans les deux rangements, il est possible d'identifier les priorités opposées émanant des deux modes de synthèse (Figure 4.5), et qui sont la source principale des différences de classification.

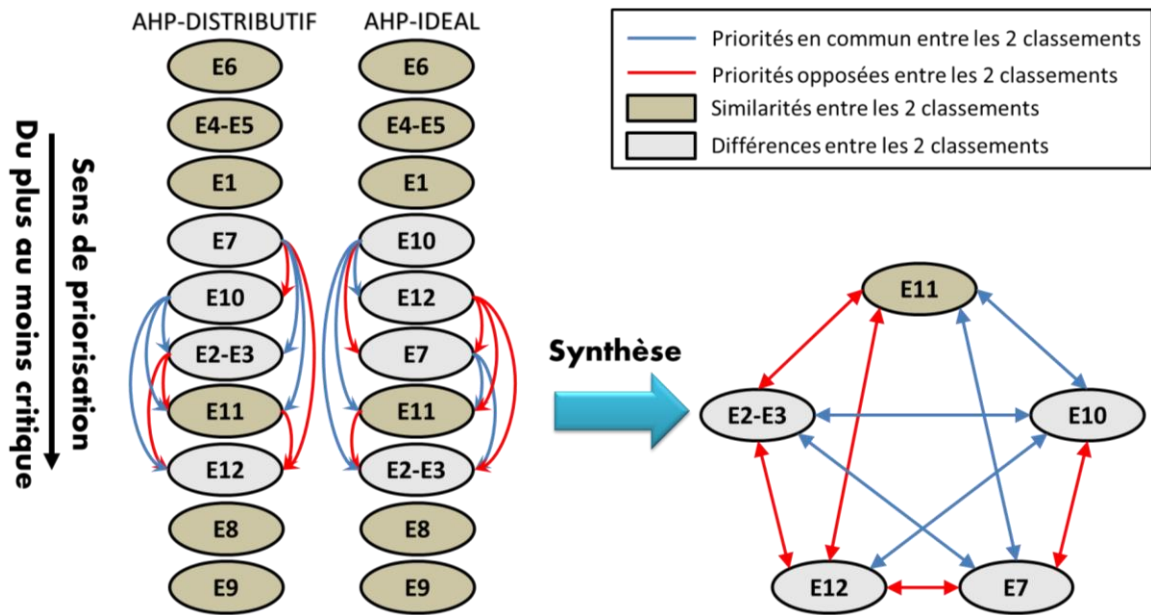


Figure 4.5 Identification des priorités opposées provoquant les différences de classification

La figure 4.5 montre que, d’après les deux modes de synthèse, E10 et E7 sont considérés prioritaire par rapport à E11 (séparant les équipements classés différemment), pendant que E10 est prioritaire par rapport E12 et E2-E3, qui est à son tour (c.-à-d. E2-E3) moins critique que que E7. Cela signifie que la source des différences réside dans l’attribution des priorités entre les paires d’équipements restants ; à savoir (E12,E2-E3), (E12,E7), (E11,E12), (E7,E10) et (E11,E2-E3).

Étant donné que les poids des critères sont égaux, il est possible de comparer ces paires d’équipements ; correspondant aux priorités opposées entre les deux méthodes, en exploitant la table préliminaire des performances suivant une approche descriptive (Figure 4.6).

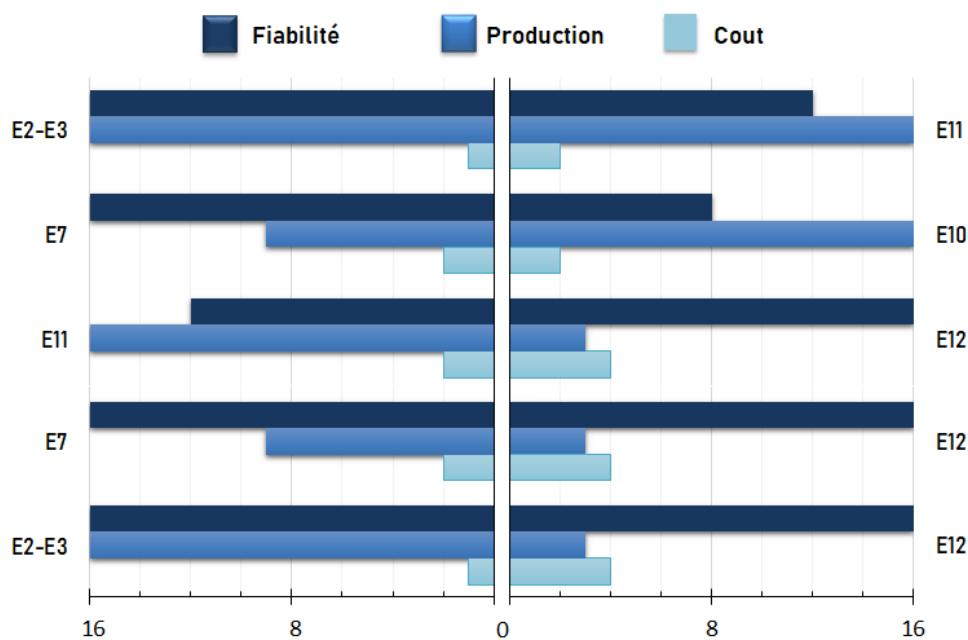


Figure 4.6 Comparaison par paire des équipements correspondant aux priorités opposées

La figure 4.6 montre que E12 est relativement plus critique que E2-E3 et E7 ; l'avantage minime à sa faveur sur le critère coût est incomparable devant la supériorité relative de E7 et la dominance absolue de E2-E3 sur le critère production, surtout lorsqu'on considère que les performances de l'ensemble de tous ces équipements sur le critère cout (dans lequel il est légèrement meilleur) sont médiocres et rapprochées, pendant que ce n'est pas le cas pour le critère production (dans lequel E7 et E2-E3 sont de loin meilleurs), alors que l'égalité domine sur le critère de fiabilité. Dans la même logique, lorsqu'on compare E11 et E12, on aperçoit que ce dernier est légèrement meilleur sur le critère fiabilité, alors qu'il est deux fois plus performant sur le critère coût. Cet avantage suivant deux parmi les trois critères justifie sa considération de moindre criticité dans le rangement du mode distributif. Toutefois, leurs performances tous les deux sont encore clairement médiocres sur le critère cout (l'avantage de E12 ici devient donc négligeable), alors que sur le 3ème critère (production) E11 domine fortement (plus de 5 fois plus performant) ; c'est la raison pour laquelle E12 précède E11 dans le rangement de criticité fourni par le mode idéal. D'autre part, il s'avère que E7 est légèrement meilleur par rapport à E10 ; bien que leurs performances soient semi-symétriques à travers les 3 critères, son écart de supériorité sur le critère production (sur lequel il est meilleur) est légèrement supérieur à celui de E10 sur le critère fiabilité (sur lequel ce dernier est meilleur). Suivant le même raisonnement, on trouve que E11 est légèrement plus critique que E2-E3, étant donné que sa performance reste encore assez faible sur le critère coût (où il est meilleur) et est très proche de celle de E2-E3 (faible marge d'avantage). Par contre, ces derniers dominent absolument sur le critère fiabilité avec une marge d'avantage plus importante.

D'un autre point de vue, la table des performances (tableau 4.2) montre que E2-E3 ont des scores presque identiques à ceux de E8 (le 2^{ème} meilleur équipement, globalement), ils ont donc les plus performant des équipements classés différemment ; leur performance minimale sur le critère coût est négligeable par rapport à leur supériorité absolue dans les deux autres critères (production et fiabilité), surtout lorsqu'on considère que tous ces équipements manifestent des performances modestes et relativement rapprochées sur le critère cout. D'autre part, au contraire de E10, E12 manifeste une performance médiocre sur le critère production. Cependant, il est deux fois plus performant sur les deux critères restant (fiabilité et cout) ; il est donc moins critique. En même temps, il est plus critique que E7 ; bien qu'il soit deux fois mieux sur le critère cout, il ne présente qu'un tiers de sa performance sur le critère production, pendant que l'égalité domine en termes de fiabilité.

En projetant l'ensemble de ces constatations sur les deux rangements obtenus, il s'avère que le rangement fourni par le mode idéal est plus précis, vu qu'il est en plein accord avec les analyses de justesse précédentes, alors que ce n'est pas le cas pour le mode distributif. Cela est dû principalement à l'échange raisonnable qu'il permet entre les critères à travers la prise en compte des meilleures performances locales (c.-à-d. par critère), permettant ainsi une évaluation rationnelle des équipements.

4.5.2 Comparaison de conservation de rang

Le renversement de rang est un problème majeur associé à de nombreuses MAMC ; dont fait partie AHP, PROMETHEE et TOPSIS. Il est défini comme un changement du rangement résultant après avoir ajouté ou retiré une alternative du groupe précédemment rangé [187], ce qui met la fiabilité des résultats en doute, notamment dans le cas des problématiques de rangement ; auxquelles appartient la priorisation des équipements, car les priorités obtenues seront en conflit.

En vue de vérifier la consistance de la classification de l'approche proposée en comparaison avec celle de l'approche conventionnelle, nous avons soumis les résultats à une série de tests, où on retire dans chacun un équipement et on note les changements provoqués. Les cas manifestant un renversement de rang sont illustrés dans la figure 4.7.

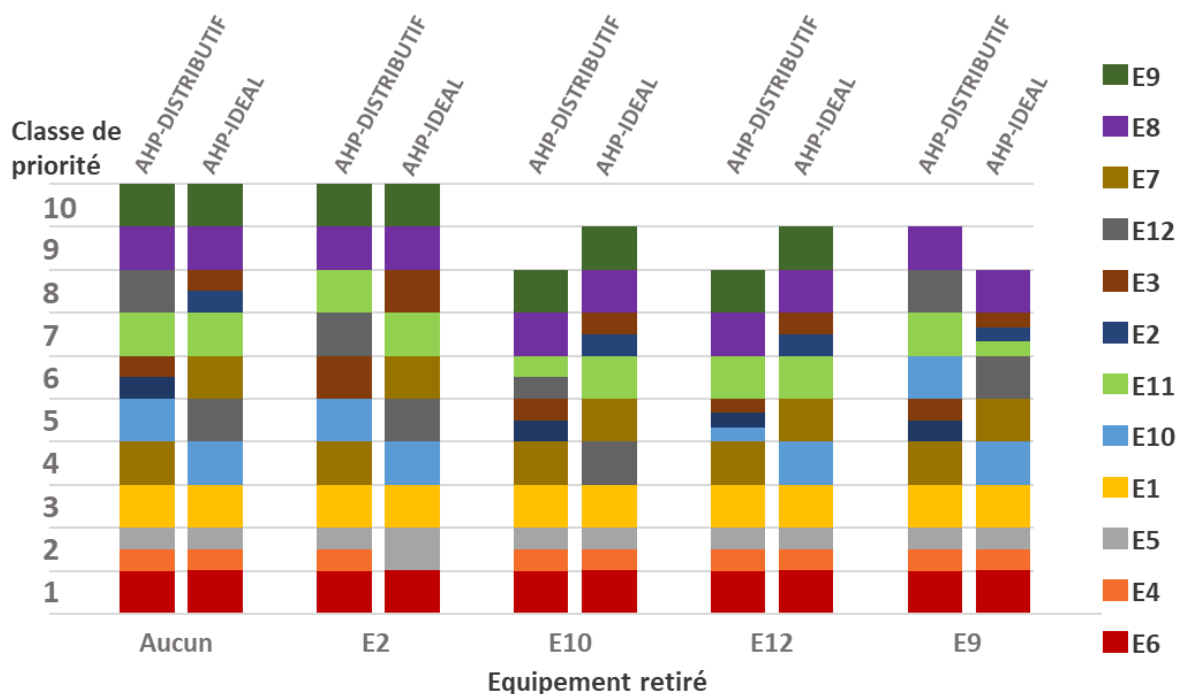


Figure 4.7 Comparaison de la conservation du rang entre les deux modes

À travers la comparaison de ces résultats avec la classification de base des deux modes, dans laquelle aucun équipement n'est retiré, les observations suivantes sont notées :

Après avoir retiré E2 ou E3 (copies identiques), une inversion de rang se produit entre E11 et E12 dans le classement du mode distributif. Ces deux équipements sont classés dans la même classe (6ème), suite à la suppression de E10, pendant que la suppression de E12 pousse E2-E3 à avancer en 5ème classe en même position avec E10, tandis que ce dernier échange sa position avec E2-E3, après le retrait de E9. Une bonne raison qui peut justifier ces résultats est que le mode distributif définit les performances des alternatives par référence à leur somme, ce qui implique des dépendances entre elles. Par conséquent, des changements sont attendus, lorsqu'on retire quelques équipements.

En revanche, lorsqu'on refait les mêmes essais avec le mode idéal, les seuls changements repérés sont liés à la suppression de l'équipement E9, où une inversion de rang se produit entre E7 et E12, pendant que E2-E3 avancent à la 7ème classe en même position avec E11. Dans tous les autres cas, le classement reste le même.

Ces expériences montrent que le classement fourni par le mode idéal est plus consistant, vu qu'il n'est affecté que par les changements impliquant la meilleure alternative sous les trois critères (E9). Ceci est pleinement justifié, car il s'agit du repère fixé pour l'évaluation des performances des autres alternatives. Par conséquent, sa suppression conduit à la réestimation de leurs performances par rapport à une nouvelle référence.

4.6 COMPARAISON AVEC LES APPROCHES SIMILAIRES

Cette section vise à confronter les trois MAMC les plus largement utilisées dans les travaux de priorisation des équipements (AHP, PROMETHEE et TOPSIS), en pratique, en partant toujours des scores de la matrice de criticité comme des entrées. Pour cela, il faut d'abord implémenter la méthode TOPSIS, étant donné que la méthode AHP est représentée par les résultats de l'approche proposée (adoptant le mode idéal). Quant à PROMETHEE, nous exploitons directement les résultats obtenus dans [66], qui remplissent les conditions requises pour une comparaison équitable.

4.6.1 Implémentation de la méthode TOPSIS

Pour l'implémentation de la méthode TOPSIS, un code MATLAB a été développé sur la base des 6 étapes décrites dans la section 3.2.3. Les deux premières étapes permettent de générer la matrice normalisée pondérée (Tableau 4.8) à partir de la table des performances (Tableau 4.2), à l'aide des équations (3.4) et (3.5).

Tableau 4.8 La matrice normalisée pondérée

Equipements	Fiabilité	Production	Coût
E1	0,10348674	0,07110682	0,038749210
E2	0,10348674	0,12641212	0,038749210
E3	0,10348674	0,12641212	0,038749210
E4	0,10348674	0,04740455	0,038749210
E5	0,10348674	0,04740455	0,038749210
E6	0,07761505	0,00790076	0,038749210
E7	0,10348674	0,07110682	0,077498430
E8	0,10348674	0,12641212	0,077498430
E9	0,10348674	0,12641212	0,232495280
E10	0,05174337	0,12641212	0,077498430
E11	0,07761505	0,12641212	0,077498430
E12	0,10348674	0,02370227	0,154996850

Puisque tous les trois critères sont à maximiser, les solutions idéales (V_j^+) et anti-idéales (V_j^-), sous chaque critère, correspondent respectivement à la valeur maximale et la valeur minimale de chaque colonne, comme indiqué dans le tableau 4.9.

Tableau 4.9 Identification des deux solutions idéales et anti-idéales par critère

Solutions	Fiabilité	Production	Coût
V_j^+	0,10348674	0,07110682	0,038749210
V_j^-	0,10348674	0,12641212	0,038749210

À ce stade, les scores de performance globale (P_i) des équipements, et qui permettent de les ranger en conséquence, peuvent être calculés en appliquant les équations (3.8) - (3.10). Les résultats sont présentés dans le tableau 4.10.

Tableau 4.10 Les résultats obtenus par la méthode TOPSIS

Equipment	S_i^+	S_i^-	P_i
E1	0,20148502	0,08168465	0,288465400
E2	0,19374606	0,12931481	0,400280010
E3	0,19374606	0,12931481	0,400280010
E4	0,20923607	0,06509935	0,237298380
E5	0,20923607	0,06509935	0,237298380
E6	0,22858658	0,02587168	0,101673590
E7	0,16456822	0,09040953	0,354578120
E8	0,15499685	0,13499564	0,465514250
E9	0	0,23293745	1
E10	0,16340563	0,12468539	0,432798590
E11	0,15714124	0,12734123	0,447624180
E12	0,12866748	0,12822082	0,499130630

4.6.2 Similitudes et différences entre les classements obtenus

Les rangements obtenus par les trois méthodes, en adoptant le même cas d'étude et en partant toujours des scores de la table des performances (Tableau 4.2) comme des entrées, sont indiqués dans le tableau 4.11.

Tableau 4.11 Confrontation des 3 méthodes : PROMETHEE II vs TOPSIS vs AHP-IDEAL

Classe de priorité	Rangement de criticité obtenu		
	PROMETHEE [66]	TOPSIS	AHP-IDEAL (l'approche proposée)
1	E6	E6	E6
2	E4-E5	E4-E5	E4 E5
3	E1	E1	E1
4	E10	E7	E10
5	E11	E2-E3	E12
6	E2-E3, E12	E10	E7
7	E7	E11	E11
8	E8	E8	E2 E3
9	E9	E12	E8
10		E9	E9

*En gras : les similitudes dans les 3 classements / En couleur : les similitudes entre les méthodes

Environ 30% des équipements sont classés à l'identique par les trois méthodes. Il s'agit des 4 pièces les plus critiques ; à savoir E6, E4-E5 et E1 qui occupent les classes 1, 2 et 3, à l'ordre. Ainsi E9 est classé dans la 9^{ème} classe suivant PROMETHEE, et la 10^{ème} classe suivant TOPSIS et AHP. Néanmoins, c'est l'équipement le moins critique, dans les 3 classifications.

Les différences de classification concernent les équipements E2-E3, E7, E8, E10, E11 et E12, et commencent à partir de la 4^{ème} classe ; où on retrouve E10 dans la 4^{ème} classe suivant AHP et PROMETHEE, pendant qu'il est classé dans la 6^{ème} position suivant TOPSIS. Ainsi, E8 est positionné dans la 8^{ème} classe selon PROMETHEE et TOPSIS, tandis qu'il occupe la 9^{ème} classe selon AHP. D'autre part, E11 est classé en 7^{ème} position par AHP et TOPSIS, tandis qu'il classé en 5^{ème} position suivant PROMETHEE. Enfin, E2-E3 et E12 sont positionnés dans la même classe suivant PROMETHEE (la 6^{ème}), suivis par E7 dans la 7^{ème} classe, pendant que ces 3 équipements sont classés respectivement dans les positions 5, 9, 4 suivant TOPSIS, et 8, 5, 6 suivant AHP. Le positionnement de E12 dans la même classe avec E2-E3 dans PROMETHEE (bien que ses scores préliminaires ne soient pas égaux aux leurs) peut être justifié par le fait qu'il est préféré sur le critère coût, cependant ; c'est l'inverse sur le critère production, alors que l'égalité domine sur le critère fiabilité. C'est ainsi la raison pour laquelle PROMETHEE résulte 9 classes seulement ; soit une classe de moins par rapport à TOPSIS et AHP.

4.6.3 Analyse de la justesse des résultats

Suivant une démarche similaire à celle adoptée dans la section 4.5.1, les priorités opposées émanant des 3 méthodes, et qui provoquent les différences de classification, peuvent être déterminées. Il s'agit donc de comparer les priorités entre les couples d'équipements classés différemment par les 3 méthodes (Figure 4.8).

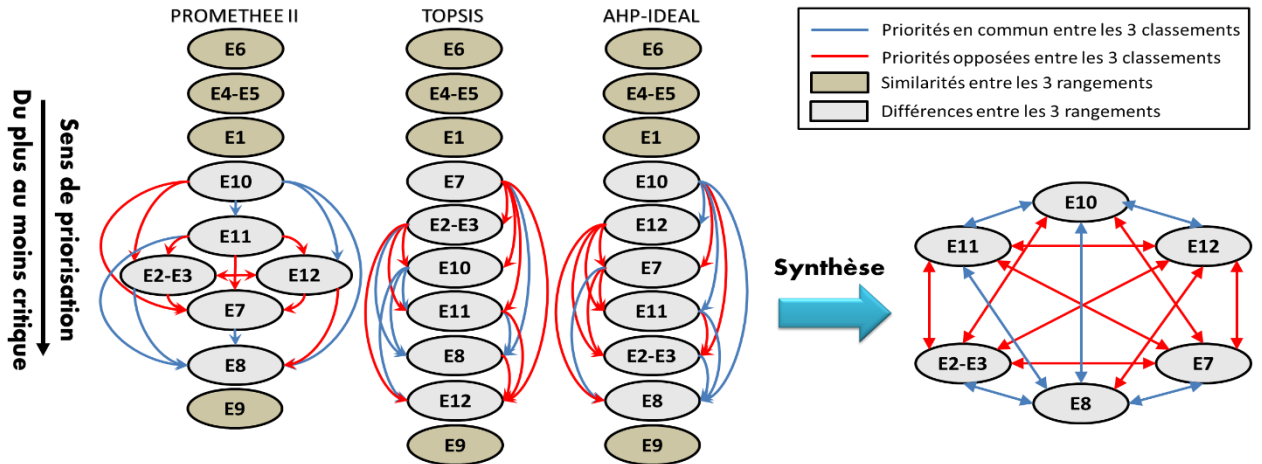


Figure 4.8 Détermination des priorités opposées émanant des 3 méthodes

A partir de la figure 4.8, on observe que, parmi les équipements classés différemment, E7, E11 et E2-E3 sont toujours prioritaires par rapport à E8, suivant les trois méthodes. De même pour E10 par rapport à E11, E8 et E12. Cela signifie que les différences de classification résident dans l'attribution des priorités entre les combinaisons binaires restantes. La confrontation des équipements correspondant à ces combinaisons est illustrée dans la figure 4.9.

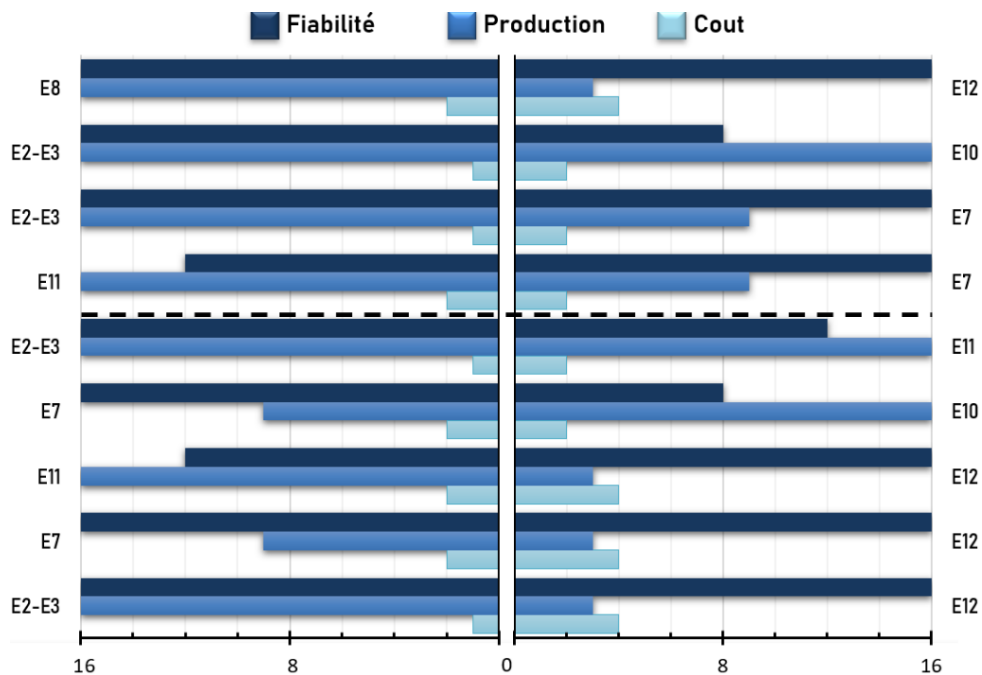


Figure 4.9 Comparaisons des paires d'équipements correspondant aux priorités opposées

Les 5 premières comparaisons (au-dessous de la ligne séparatrice) sont identiques à la figure 4.6, interprétée précédemment dans la section 4.5.1, où on a déjà démontré que E10, E11 et E12 sont plus critique que E7, E2-E3 et E7, respectivement. Cela correspond aux résultats de PROMETHEE et AHP, contrairement à TOPSIS. D'autre part, nous avons trouvé que E12 est plus critique que E11 et E2-E3 (d'après la section 4.5.1, toujours), ce qui s'accorde avec les résultats de la méthode AHP, et s'oppose à ceux de TOPSIS, pendant que PROMETHEE pointe vers l'équivalence de ces 3 équipements en termes de criticité globale (ils occupent la même classe).

En ce qui concerne les comparaisons restantes (au-dessus de la ligne séparatrice), on observe d'abord que lorsqu'on compare E7 avec E11 et E2-E3, on trouve que, dans tout critère où il est mieux, les scores des 2 autres sont très proches. En revanche, dans les critères où ils excellent, ce n'est pas le cas pour E7. Ainsi, il devrait être prioritaire, étant donné que ses points forts par rapport aux deux autres sont négligeables devant ses faiblesses. C'est ce que l'on note également dans les classifications de TOPSIS et AHP, au contraire de PROMETHEE. Suivant la même logique, on trouve que E10 est prioritaire par rapport à E2-E3 (ce qui correspond aux priorités accordées par AHP et PROMETHEE) ; surtout lorsqu'on tient compte qu'il est assez faible même sur le seul critère où il est légèrement meilleur (coût). Par contre, E2-E3 domine fortement sur le critère fiabilité avec une marge d'avantage importante, alors que l'égalité prévaut le critère production. D'autre part, le positionnement de E12 dans l'avant-dernière classe, suivant TOPSIS, plutôt que E8 comme dans PROMETHEE et AHP, semble un mauvais classement (imprécision) ; bien qu'il soit deux fois plus efficace sous le critère coût, il reste plus critique, car il est plus de 5 fois moins efficace sur le critère de production, alors que l'égalité domine sur le critère de coût. Par conséquent, il mérite une priorité plus élevée. D'un autre point de vue, la table des performances (Tableau 4.2) montre que E8 possède les scores les plus proches de E9 (le meilleur équipement, qui correspond à la dernière classe). Il est donc plus raisonnable de le classer comme le deuxième meilleur équipement en termes de performance (avant dernière classe). D'où, les recommandations de PROMETHEE et AHP sont privilégiées, à ce niveau. Cependant, il est plus convenant de classer E2-E3 près de E8 car ce sont des semi-copies ; ce qui tombe en faveur de la classification de la méthode AHP.

4.6.4 Comparaison de conservation de rang

Puisqu'on a déjà soumis les résultats de la méthode AHP aux tests de conservations rang, on se contente ici de réappliquer la même procédure avec les méthodes PROMETHEE et TOPSIS. Les tests correspondants à l'occurrence d'un renversement de rang sont illustrés dans la figure 4.10.

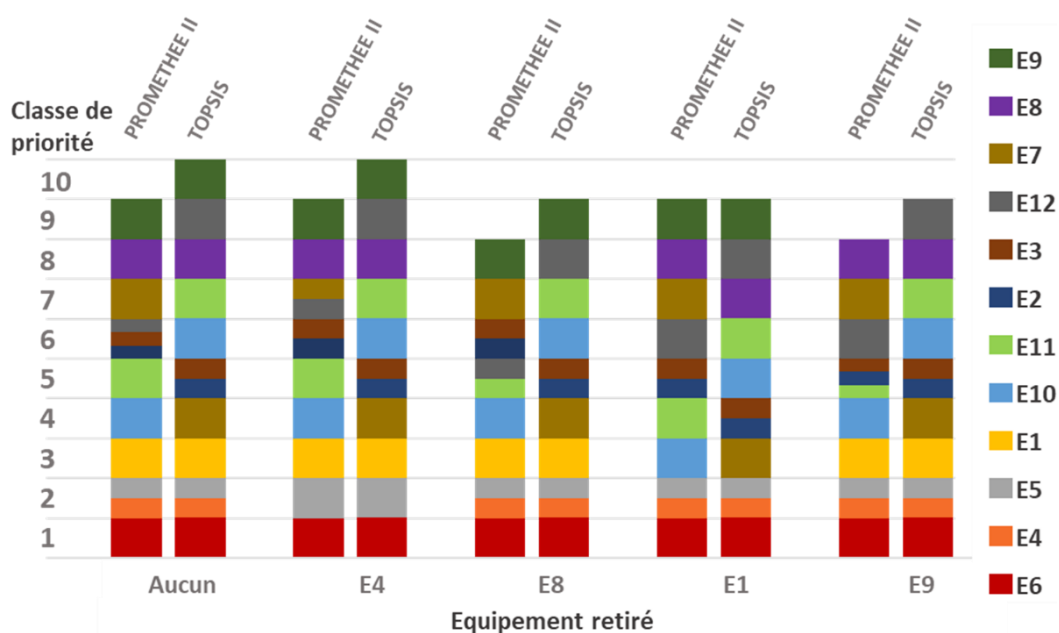


Figure 4.10 Comparaison de la conservation du rang entre PROMETHEE et TOPSIS

À travers la comparaison des résultats avec le rangement initial de chaque méthode, dans lequel aucun équipement n'est retiré, les remarques suivantes sont notées :

En excluant E4 ou E5 (copies identiques) des entrées de PROMETHEE, E12 rejoint E7 dans la 7^{ème} classe, tandis qu'il passe à la 5^{ème} classe en même position avec E11, après le retrait de E8 (copie proche de E2-E3). Suite à la suppression de E1 (semi copie de E7), tous les équipements classés derrière avancent d'une classe à l'exception de E12 qui reste seul en 6^{ème} position derrière E2-E3 ; bien que les trois étaient jugés d'une criticité égale juste avant. Enfin, après le retrait de E9, qui est l'alternative la plus performante suivant les trois critères, E2-E3 rejoignent E11 en 5^{ème} classe, tandis que E12 et le reste des équipements conservent leurs positions. Une bonne raison qui peut justifier ces résultats est que PROMETHEE consiste à mesurer le degré de préférence en établissant des relations entre les alternatives permettant de surclasser les unes par aux autres, ce qui implique des dépendances entre elles. Par conséquent, des modifications peuvent se produire après avoir en supprimer certains.

En revanche, aucun changement n'a été repéré avec TOPSIS. Une raison probable qui peut justifier cela est que les scores d'entrée étaient déjà normalisés par la méthode de la matrice de criticité, limitant ainsi les dépendances créées entre les alternatives par la normalisation vectorielle de cette méthode (étape 2 de la section 3.2.3) ; qui provoque les renversements de rang [195].

4.6.5 Analyse de la sensibilité des résultats

En raison de la variation des priorités locales des équipements d'un critère à un autre, les priorités globales peuvent être affectées par des altérations majeures suite à la modification de la

pondération adoptée. Afin d'illustrer ces effets, nous avons soumis les résultats de chaque méthode à une analyse de sensibilité, permettant ainsi de synthétiser les constatations principales à la fin.

Sensibilité des résultats sous AHP-IDEAL

À l'aide de l'interface graphique interactive du logiciel Expert Choice, une analyse de sensibilité est menée pour valider les résultats du mode de synthèse idéal, à partir du scénario équilibré ; dans lequel les trois critères ont des poids égaux. Le graphique suivant (Figure 4.11) illustre ce processus ; les poids des critères sont modifiés en glissant les barres sur l'axe des X vers le haut ou vers le bas, pendant que les changements résultants sont notés sur le côté droit du graphe.

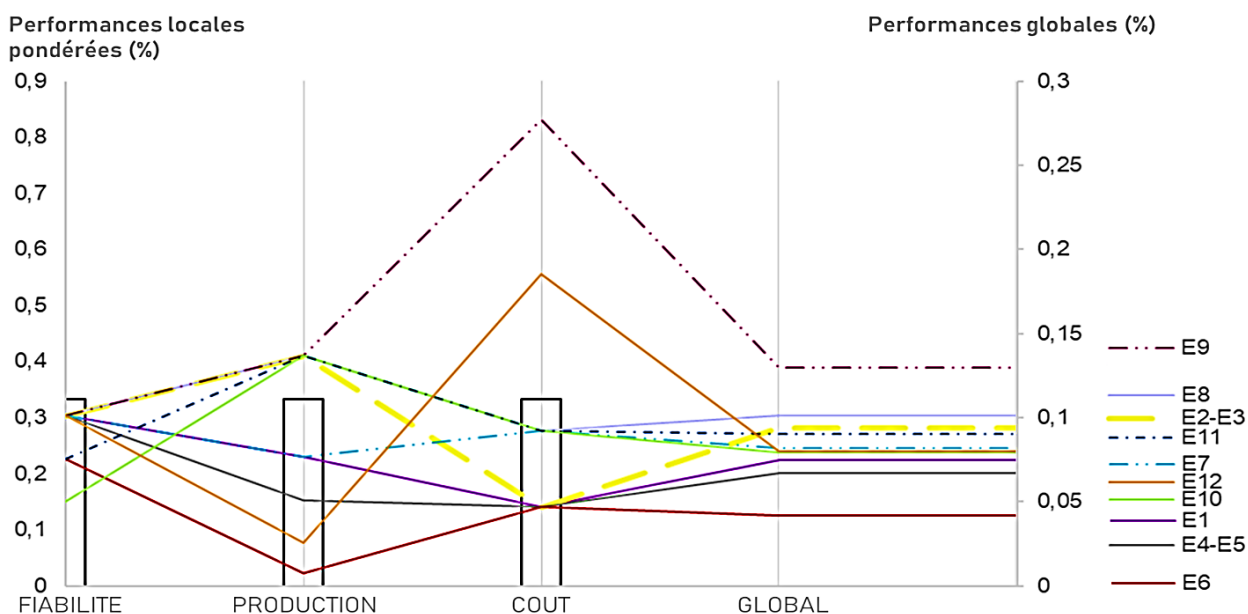


Figure 4.11 Analyse de sensibilité sous AHP-IDEAL

Trois expériences ont été réalisées, chacune permettant de simuler plusieurs scénarios en augmentant progressivement le poids d'un critère, tandis que le reste est divisé entre les deux autres par égalité. Les changements qui en résultent par rapport à la pondération de départ sont notés comme suit :

À mesure que le poids du critère fiabilité approche les 40%, E10 progresse dans le classement jusqu'à ce qu'il s'installe temporairement en 2^{ème} position, lorsque le poids atteint environ 48%. En dépassant la valeur de 51%, E11 commence à gagner des positions pour atteindre finalement la 3^{ème} classe, au poids d'environ 68%, tandis que E10 prend la tête en tant que l'équipement le plus critique, lorsque le poids approche 75%.

Après avoir augmenté le poids du critère production à 34%, E12 passe en 4^{ème} classe derrière E1 et le reste des équipements dans le même ordre du scénario équilibré. À mesure que le poids approche 37%, E7 passe à la 5^{ème} classe. Après avoir franchi la barrière des 40%, E12 avance

progressivement dans le classement jusqu'à l'arrivée à la 2^{ème} classe derrière E6, lorsque le poids atteint environ 59%. Au-delà de cette valeur, les changements résultants ne concernent que la fusion de quelques classes consécutives ; qui se produit à des poids très élevés dépassant les 83%.

Après avoir augmenté le poids du critère coût à environ 35%, E7 avance à la 5^{ème} classe, tandis que E2-E3 passent en 7^{ème} position, au poids d'environ 39%. En approchant les 40%, E12 commence à perdre des positions progressivement pour s'installer dans la 9^{ème} classe, quand le poids atteint environ 47%. Après avoir légèrement augmenté cette valeur, E2-E3 commence à escalader le classement pour atteindre la 4^{ème} classe, lorsque le poids atteint 51%, derrière E1, E4-E5 et E6 qui maintiennent toujours leurs positions comme les éléments les plus critiques.

Sensibilité des résultats sous PROMETHEE

Afin de simuler les expériences précédentes avec PROMETHEE, nous avons utilisé la fonctionnalité "Walking weights" (Figure 4.12), incluse dans le logiciel Visual PROMETHEE v1.4. Les poids des critères sont représentés par les bars en bas, pendant que le classement des équipements prioritaires est indiqué en haut (du gauche vers la droite), permettant ainsi de varier les poids et observer les changements résultants, en temps réel.

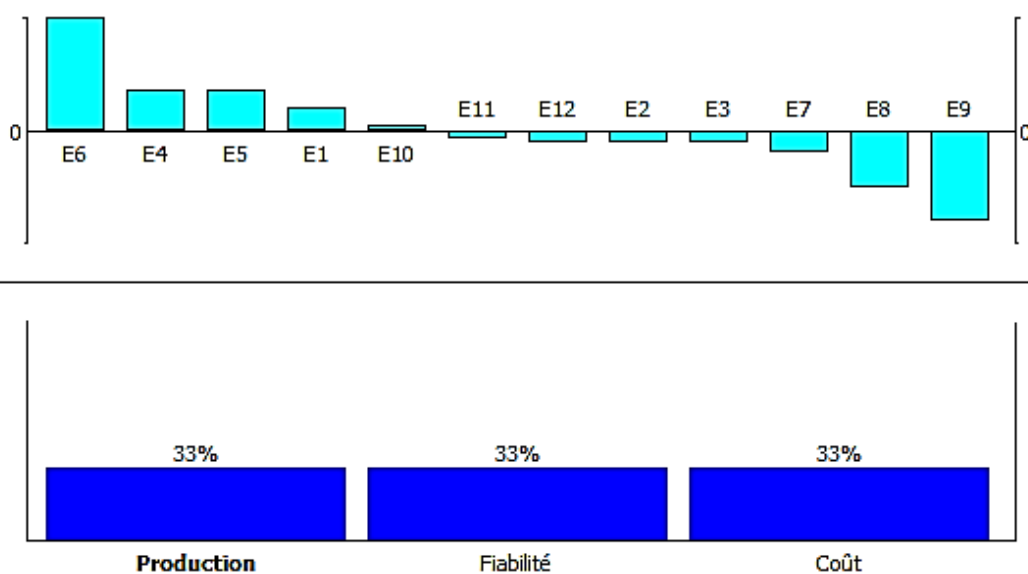


Figure 4.12 Analyse de sensibilité sous PROMETHEE

Lorsque le poids du critère fiabilité approche 40%, E10 commence à avancer dans le classement pour s'installer dans la 2^{ème} classe en même position avec E4-E5, au poids de 44%. En dépassant cette valeur, E4-E5 tombent à la 3^{ème} classe, pendant que E11 avance à la 4^{ème} classe en même position avec E1. Ce dernier recule à la 5^{ème} classe, au poids de 46%, pendant que E11 continue de gagner des positions, jusqu'à ce qu'il rejoigne E4-E5 dans la 3^{ème} classe, quand le poids

atteint 50%. En dépassant cette limite, E4-E5 recule à la 4th classe. Enfin, E10 devient en tête du classement, lorsque le poids atteint 82%, laissant E6 derrière avec une légère différence.

Une fois qu'on augmente le poids du critère de production, une nouvelle classe de criticité est générée à la 6^{ème} position de l'ordre de priorité, séparant E12 et E2-E3. Ces derniers étant en 7^{ème} position, E12 avance progressivement dans le classement, jusqu'à ce qu'il atteigne la 4^{ème} classe, au poids de 39%, coïncidant avec l'avancement de E7 à la 7^{ème} position. Ce dernier gagne progressivement deux autres positions avec l'arrivée au poids de 47%. Quand cette valeur atteint 52%, E12 rejoint E1 dans la 3^{ème} classe, avant de s'installer finalement dans la 2^{ème} classe, au poids de 72%.

En augmentant le poids du critère coût, une nouvelle classe de criticité est produite à la 6^{ème} position du classement avec E2-E3 dedans (E12 reste dans la 7^{ème} classe). Ces derniers avancent en 5^{ème} position, lorsque le poids atteint 36%, avant de s'installer finalement en 4^{ème} position, lorsque le poids atteint 42%. En même temps, E12 recule à la 8^{ème} position, avant de tomber finalement dans l'avant-dernière classe, lorsque le poids atteint 60%.

Sensibilité des résultats sous TOPSIS

En raison de l'absence d'un support logiciel qui permet de réaliser une analyse de sensibilité sous la méthode TOPSIS, nous avons modifié le code MATLAB ; développé précédemment pour son implémentation, afin qu'il soit capable de simuler la variation des poids et détecter les changements résultants, automatiquement (Figure 4.13).

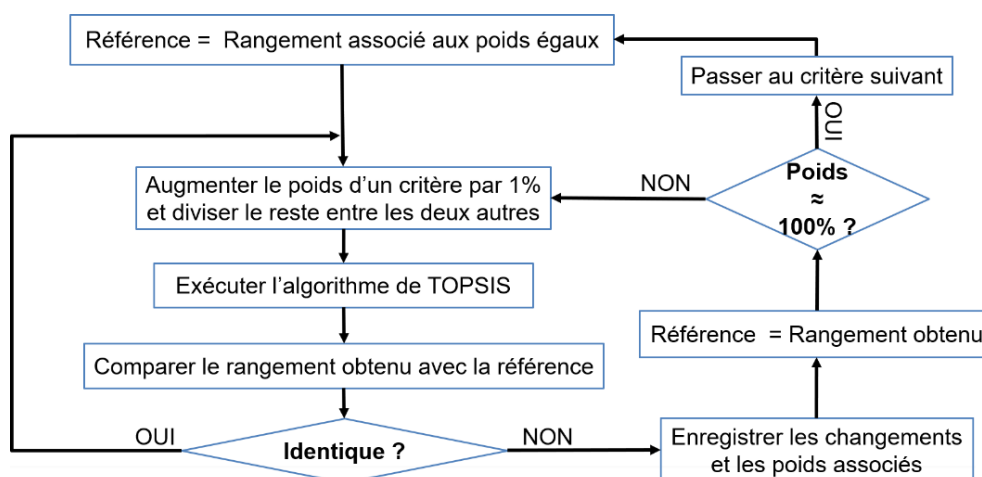


Figure 4.13 Analyse de sensibilité sous TOPSIS

Lorsque le poids du critère fiabilité augmente à 43%, E10 commence à avancer graduellement dans le classement pour atteindre la 4^{ème} classe ; au poids de 47%. Au poids de 52%, E11 passe à la 6^{ème} puis la 5^{ème} classe, dès qu'on augmente le poids de nouveau, coïncidant

avec l'arrivée de E10 à la 3^{ème} classe. Ce dernier passe en 2^{ème} position au poids de 55%. En dépassant cette valeur, E2-E3 passe à la 6^{ème} classe, alors qu'en atteignant 61%, E11 avance à la 4^{ème} classe puis la 3^{ème} classe ; au poids de 63%. Enfin, E10 devient l'équipement le plus critique (1^{re} classe), lorsque le poids approche 70%.

En augmentant le poids du critère production à presque 36%, E12 commence à gagner des positions jusqu'à l'arrivée à la 2^{ème} classe, au poids de 61%. A 96%, E7 passe en 4^{ème} position en même classe avec E1, pendant que E8 avance à la 7^{ème} classe en même position avec E11. Enfin, ces deux derniers rejoignent E10 au 6^{ème} rang, quand le poids atteint environ 99%.

Lorsqu'on augmente le poids du critère coût à 47%, E2-E3 avancent à la 4^{ème} classe. Les autres changements se produisent à partir du poids de 88% et ne concernent que le regroupement des équipements E11, E8, E10 et E7 ensemble suivant des classes consécutives avec 2, puis 3 et enfin 4 éléments dedans.

Synthèse

Dans les trois méthodes, l'équipement E9 reste toujours le moins critique quelle que soit la pondération choisie, car il est le plus efficace selon les 3 critères avec un avantage majeur sur le critère coût. Plus, on augmente le poids d'un critère donné, plus les pièces à faible performance sur ce critère progressent dans le classement pour occuper des classes plus critiques, tandis que celles, présentant des performances identiques sur ce critère, gardent toujours le même ordre entre elles et tendent à se regrouper ensemble ; quand le poids atteint des valeurs extrêmes. Ces analyses montrent que les 3 modèles se comportent correctement. La différence de réactivité entre les 3 méthodes, au fil de l'augmentation des poids, est due principalement aux différentes politiques de compensation qu'elles adoptent ; PROMETHEE limite l'échange entre les critères, au contraire de TOPSIS AHP, c'est pourquoi ces deux méthodes atteignent les changements finals à des poids rapprochés. Une autre raison probable se présente par leurs différentes manières d'incorporation des poids ; TOPSIS les intègre dès le début ; au niveau des données initiales, pendant qu'ils sont pris en compte dans PROMETHEE en interne ; au niveau de l'indice de préférence, alors que AHP les introduit à la fin ; directement dans les priorités globales.

4.7 CONCEPTION D'UN DSS A PARTIR DE L'APPROCHE PROPOSEE

À l'aide de MATLAB, nous avons intégré l'approche proposée dans un système d'aide à la décision (DSS), en vue de faciliter sa mise en œuvre en pratique, permettant ainsi de l'exploiter sans avoir besoin de logiciels supplémentaires et sans connaissance préalable des modèles mathématiques intégrés ou des langages de programmation utilisés. A cet fin, MATLAB (version

R2018a) a été choisi comme plate-forme de conception et de programmation en raison de sa capacité de gérer les calculs matriciels efficacement ; et qui constitue l'essence de la complexité de l'approche proposée. Le DSS développé est basé sur 3 modules :

- **Module de gestion de l'interface d'utilisateur** : Conçu à l'aide de l'outil « application designer » intégré dans MATLAB, et qui permet de concevoir une interface moderne et facile à manipuler par l'utilisateur.
- **Module de gestion de données** : Conçu pour charger les données directement depuis d'EXCEL, au lieu de demander à l'utilisateur de les saisir manuellement, idem pour la sauvegarde des résultats obtenues, permettant ainsi d'accélérer et de faciliter le processus, notamment lorsqu'il s'agit d'un grand nombre d'équipements.
- **Module de gestion du modèle mathématique** : Basé sur les étapes décrites dans les sections 3.2.1 et 3.3.1, tout en exploitant le code itératif précédemment développé pour la génération des comparaisons binaires d'équipements (dans la section 4.4.2), réduisant ainsi le besoin d'intervention de l'utilisateur.

L'interface de démarrage du DSS élaboré (Figure 4.14) permet de charger les données initiales à partir d'EXCEL sous forme d'une matrice de décision (voir la section 1.2.7).

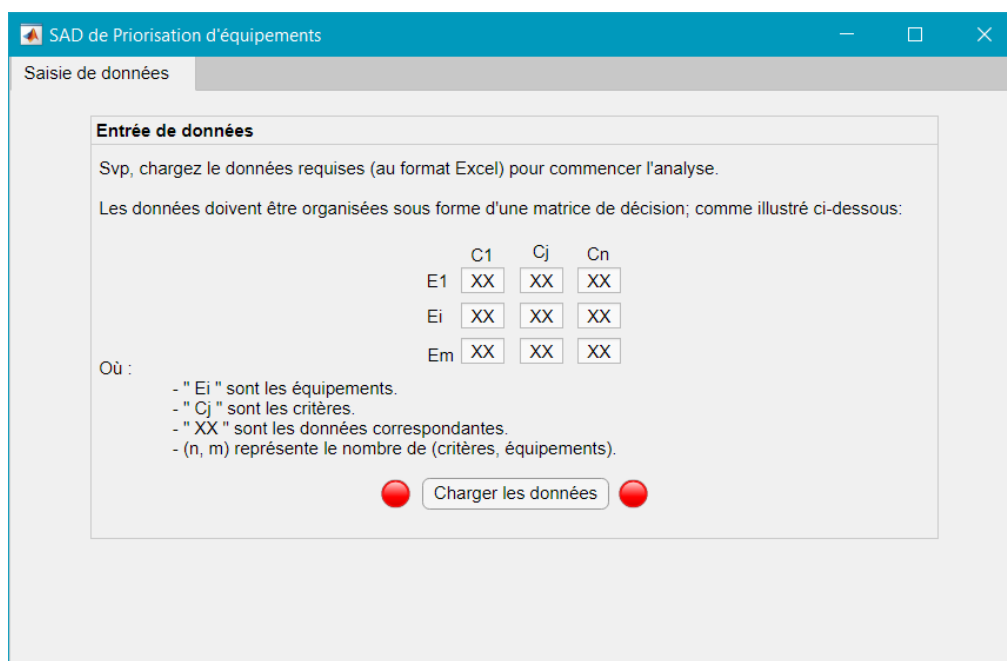


Figure 4.14 Interface d'accueil du DSS développé

Une fois les données chargées, les nombres de critères et d'alternatives sont automatiquement détectés et affichés, pendant que le voyant rouge s'allume en vert comme témoin, donnant la main de saisir les poids un par un (Figure 4.15).

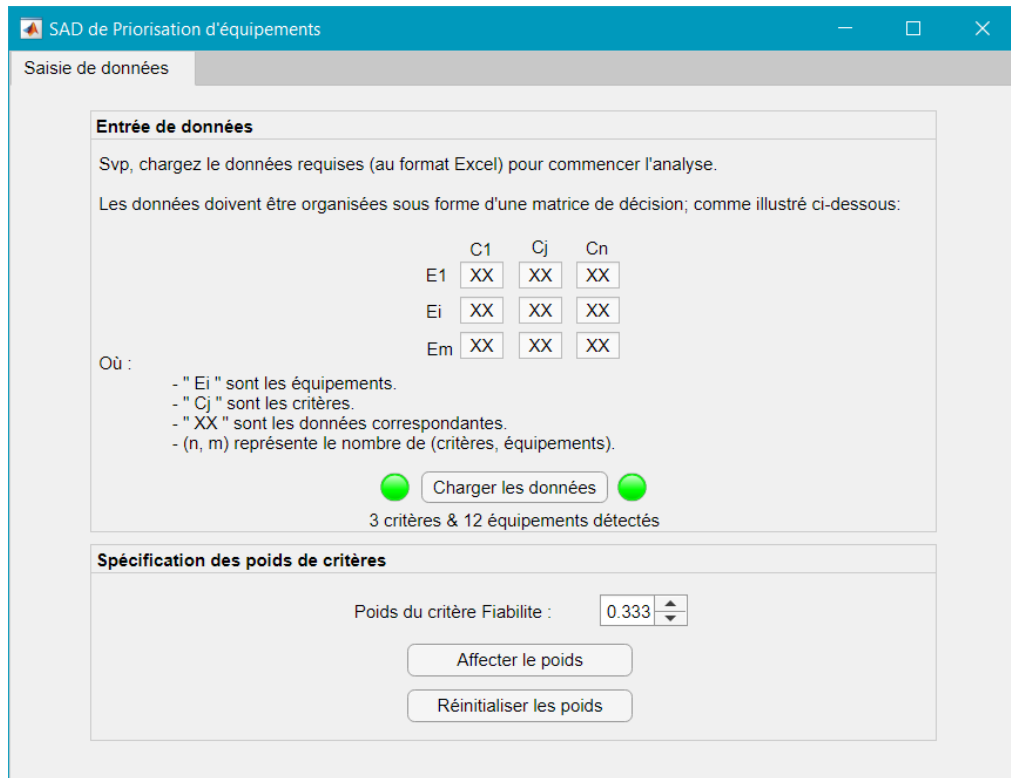


Figure 4.15 Chargement des données à partir d'EXCEL

Les performances locales et globales des équipements peuvent être calculées et visualisées instantanément à partir du nouvel onglet « Résultats », qui s'affiche après avoir saisi les poids des critères (Figure 4.16).

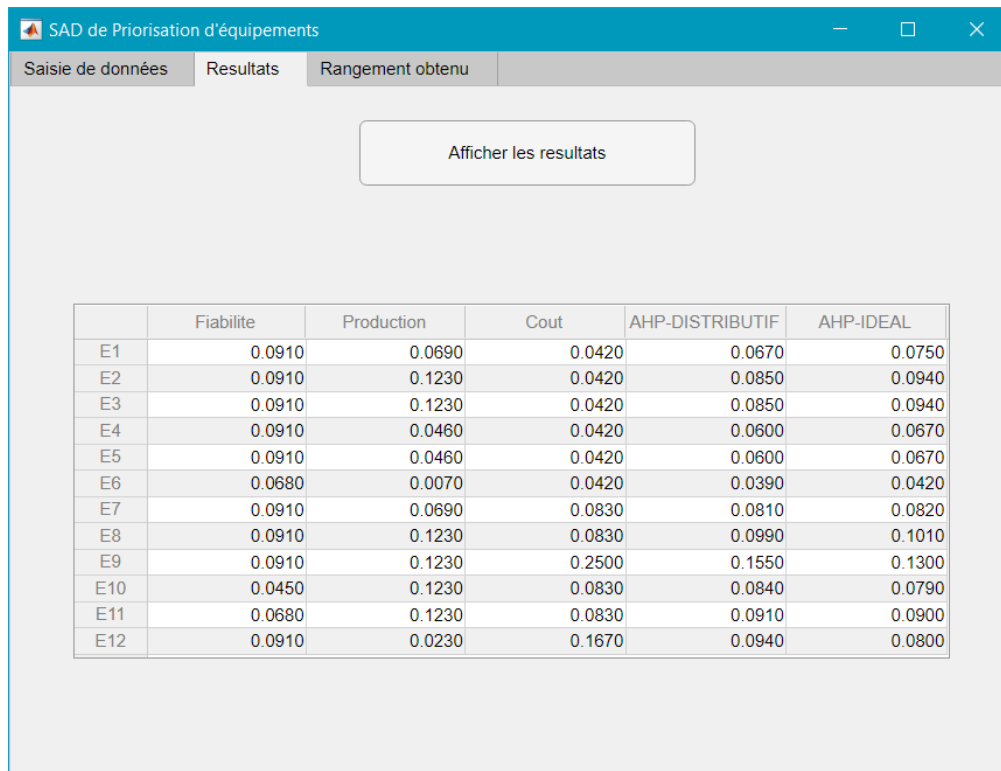


Figure 4.16 Calcul des priorités locales et globales par le DSS

À travers l'onglet « Rangement obtenu », il est possible de visualiser le classement des équipements par ordre de criticité, ainsi que sa représentation graphique (Figure 4.17).

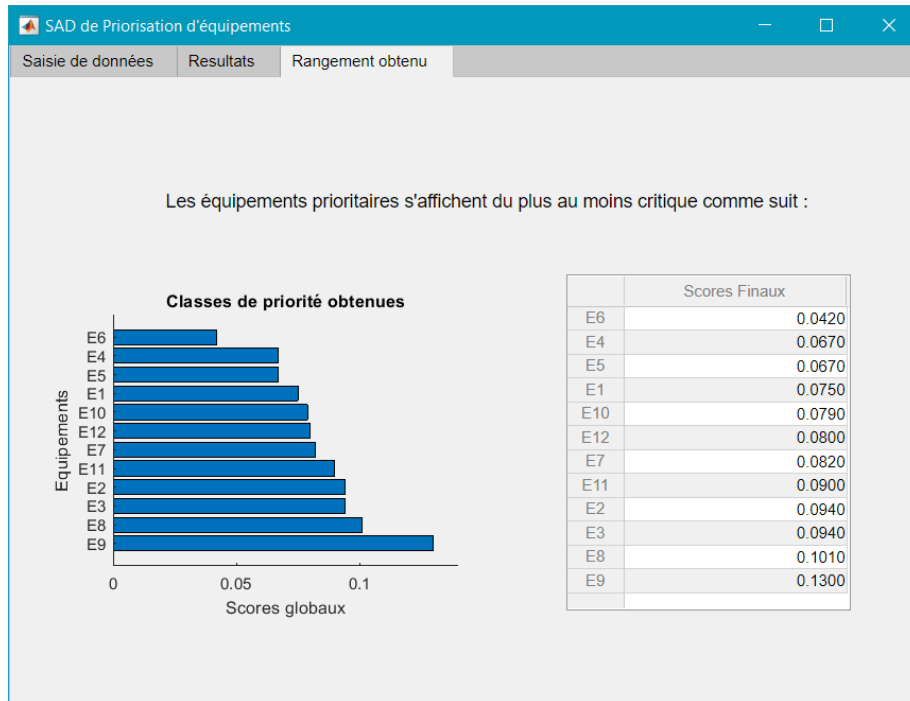


Figure 4.17 Affichage du rangement d'équipements par ordre de priorité

À la fermeture, il est possible de sauvegarder les résultats sous format EXCEL pour les exploiter plus tard (Figure 4.18).

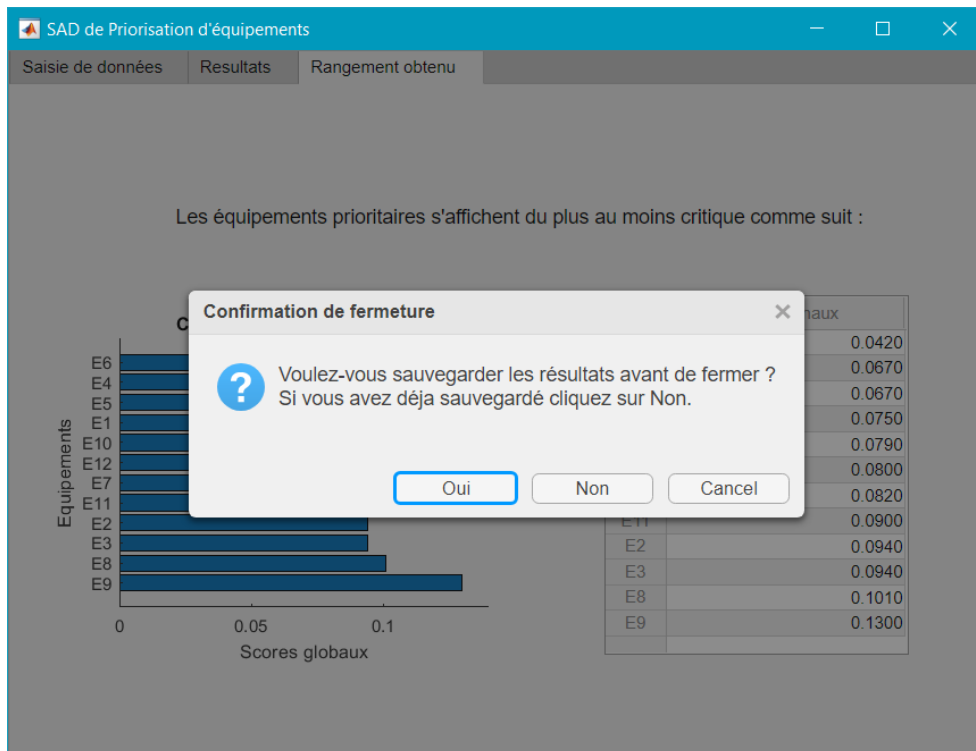


Figure 4.18 Confirmation de fermeture et sauvegarde des résultats

4.8 CONCLUSION

La hiérarchisation des équipements critiques est parmi les axes les plus sensibles de décision dans tout secteur industriel, compte tenu des effets qu'elle reflète sur plusieurs aspects stratégiques tels que la sélection des politiques de maintenance ou celles de gestion des stocks de rechange. La maîtrise des techniques d'analyse dans ce contexte permet effectivement d'évoluer vers une maintenance efficiente et bénéfique. La contribution proposée est placée à ce niveau.

L'approche proposée est capable de gérer un grand nombre d'équipements et de critères en surmontant les limitations provoquées par les comparaisons par paires, associées à l'approche conventionnelle de AHP. De plus, cette dernière repose seulement sur les mesures relatives, ce qui engendre une perte d'information et empêche l'estimation précise des performances. Dans l'approche proposée, l'information manquante est capturée à l'aide de la méthode de la matrice de criticité, tandis que son incorporation dans le modèle est achevée à l'aide du mode idéal de synthèse des priorités.

La matrice de criticité assure une quantification efficiente des critères en exploitant divers paramètres quantitatifs qui reflètent les différentes dimensions de l'interaction entre le dualisme équipement-critère, tout en unifiant les unités de mesure des scores résultant. Son utilité devient encore plus claire lorsqu'il s'agit de la validation des résultats, où elle peut servir comme une approche descriptive qui facilite l'évaluation des priorités obtenues.

Contrairement au mode distributif de l'approche conventionnelle, le mode idéal produit un classement en fonction de la performance plutôt que la dominance. Ainsi, il permet d'évaluer les performances des équipements d'une manière rationnelle, qui maintient un compromis raisonnable entre les critères ; en marquant le score de l'équipement type, sous chaque critère, comme référence d'évaluation pour les autres (ce qui assure la prise en compte des écarts). D'autre part, il apporte plus de robustesse et de fiabilité aux résultats en améliorant la consistance du rangement obtenu et en diminuant les dépendances entre les alternatives.

Bien que nous ayons utilisé l'équipement E9 comme référence pour synthétiser les priorités, un repère d'évaluation externe (alternative virtuelle) peut être utilisée pour personnaliser les normes d'évaluation applicables sur chaque critère, selon le cas étudié. Cela permet également d'éliminer les dépendances entre les alternatives faisant objet de l'étude.

Les comparaisons établies confirment l'apport de l'approche proposée en termes de justesse robuste et précision, pendant qu'elles favorisent les résultats de la méthode PROMETHEE par

rapport à TOPSIS. Ainsi, elles permettent d'un côté, de valider l'approche proposée et d'un autre, de répondre à la problématique d'aide à la décision qui se pose dans ce contexte.

Le DSS développé agit comme un module complémentaire de la GMAO. Il permet d'apporter encore plus de facilité de mise en œuvre et de gagner du temps et de l'effort à travers l'automatisation de l'approche proposée, ainsi que sa compatibilité avec les bases de données EXCEL ; ce qui est très bénéfique, étant donné que le problème concerné implique souvent le traitement d'un énorme jeu de données, ainsi qu'il est de nature cyclique.

Parallèlement, les travaux menés ont conduit au développement d'un programme de calcul performant pour la mise en œuvre de la méthode TOPSIS, qui se caractérise par une analyse efficiente de la sensibilité des résultats ; en simulant plusieurs scénarios de pondération sans aucune interaction requise de la part de l'utilisateur, ce qui n'est pas supporté par les supports logiciels disponibles. Cela peut être également généralisé à d'autres MAMC pour fournir une image plus claire de l'effet de variation des poids sur les résultats finaux, contribuant ainsi à faire face à la problématique générique de description qui se présente à ce niveau.

Conclusion générale et perspectives

L'axe de décision est un moteur essentiel des fonctions stratégiques dans de nombreux secteurs vitaux. La fonction maintenance ne fait pas l'exception, surtout lorsqu'il s'agit du secteur industriel. L'enquête établie à travers la littérature montre que le processus de décision y intervient dans presque toutes les activités qu'elles soient de dominante technique ou administrative. La prise de décision à ce niveau nécessite une analyse approfondie et une précision méticuleuse, étant donné les conséquences qui en découlent non seulement par rapport à la maintenance, mais par rapport à l'activité de l'entreprise dans son ensemble.

Le cadre méthodologique de l'analyse multicritère fournit une large gamme d'outils de divers types et familles qui sont exploitables à des fins d'aide à décision. La maîtrise de ces méthodes et techniques est indispensable pour le pilotage efficient du processus de maintenance. Le traitement d'un problème décisionnel dans ce contexte, peu importe son objet, est lié à plusieurs facteurs, et non seulement à la méthode adoptée tel que : la pertinence des critères retenus, la rationalité des poids attribués, la fiabilité du support de données utilisé, et la validité de la démarche de modélisation dans l'ensemble. Ce sont les points que nous avons tenté d'esquisser avec des lignes directrices à travers notre étude bibliographique.

Parmi les centres de décision identifiés dans la fonction maintenance, nous avons choisi de déployer notre contribution au niveau de l'axe de priorisation des équipements, en raison de la grande importance qu'il revêt et les diverses dépendances qui en découlent dans la politique globale de maintenance, y compris la planification des actions préventives, l'affectation des stratégies, la gestion des stocks de rechange, ainsi que l'allocation des moyens matériels et humains requis.

Cette contribution s'inscrit sous l'adaptation des MAMC aux applications de maintenance et se manifeste par quatre acquis, qui sont mis en évidence :

- Le premier est la résolution du conflit noté entre les aspects théoriques et pratiques concernant l'emploi des deux modes de synthèse de la méthode AHP.
- Le deuxième se concrétise sur le développement d'une approche hybride de priorisation d'équipements qui rassemble les avantages de la structuration multi-dimensionnelle des critères de la matrice de criticité avec la formulation logique du problème de la méthode AHP-IDEAL.

- Le troisième concerne la conception d'un DSS en s'appuyant sur l'approche proposée, permettant ainsi de faciliter son exploitation en pratique.
- Le quatrième est la confrontation des méthodes les plus largement utilisées dans ce contexte qui sont : AHP, PROMETHEE et TOPSIS, tout en donnant des constatations et des recommandations pour une meilleure maîtrise de ces méthodes et donc une application plus efficace.

Un apport complémentaire de cette thèse se concrétise sur l'analyse exhaustive réalisée sur l'état de l'art de la thématique étudiée, couvrant plusieurs secteurs d'activité et divers centres de décision, et tenant compte de toutes les phases de modélisation, ce qui peut être d'une grande utilité pour les praticiens de maintenance qu'ils soient du domaine professionnel ou académique.

Comme perspective à ce travail, il est planifié d'investiguer la possibilité de génération de la table des performances, requise pour l'implémentation de la méthode proposée, d'une manière autonome et plus précise à travers l'emploi des techniques d'apprentissage automatique et d'intelligence artificielle. Ainsi, il est envisagé d'enrichir le DSS développé pour toucher plus de centres décisionnels, notamment ceux qui sont liés à la priorisation d'équipements, dans le but de concevoir un support informatisé pour la gestion globale de maintenance, ayant la capacité d'exploiter les MAMC efficacement dans la commande des différentes décisions qui en découlent.

Bibliographie

1. Roy, B. et D. Bouyssou, *Aide multicritère à la décision: méthodes et cas*. 1993: Economica Paris.
2. Roy, B., *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. 1985: Economica.
3. Guitouni, A., *L'ingénierie du choix d'une procédure d'agregation multicritere*. 2001: Université Laval.
4. Triantaphyllou, E., *Introduction to multi-criteria decision making*, in *Multi-criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*. 2000, Springer. p. 1-4.
5. Jacquet-Lagrèze, E., *PREFCALC: évaluation et décision multicritère*. Revue de l'Utilisateur de l'IBM PC, 1984. **3**: p. 38-55.
6. Einstein, A., *Infeld. L. 1938, The Evolution of Physics*. Simon and Schuster Inc., New York, New York, USA. **262**: p. 263.
7. Costa, B.E. et A. Carlos, *Les problématiques de l'aide à la décision: vers l'enrichissement de la trilogie choix-tri-rangement*. RAIRO-Operations Research-Recherche Opérationnelle, 1996. **30**(2): p. 191-216.
8. TAIBI, B., *L'analyse Multicritère comme outil d'aide à la décision: Application de la méthode PROMETHEE Etude de cas: l'entreprise SEROR*. 2010.
9. AFNOR, *Maintenance industrielle — Fonction maintenance*. Mai 2002. p. 29 pages.
10. AFNOR, *Terminologie de la maintenance*. Juin 2001. p. 59 pages.
11. Retour, D., M. Bouche, et V. Plauchu, *Où va la maintenance industrielle*. Problèmes économiques, 1990. **2**(159).
12. Dekker, R., *Applications of maintenance optimization models: a review and analysis*. Reliability engineering & system safety, 1996. **51**(3): p. 229-240.
13. Pintelon, L.M. et L. Gelders, *Maintenance management decision making*. European journal of operational research, 1992. **58**(3): p. 301-317.
14. Sherwin, D., *A review of overall models for maintenance management*. Journal of quality in maintenance engineering, 2000. **6**(3): p. 138-164.
15. Garg, A. et S. Deshmukh, *Maintenance management: literature review and directions*. Journal of quality in maintenance engineering, 2006. **12**(3): p. 205-238.
16. Sharma, A., G. Yadava, et S. Deshmukh, *A literature review and future perspectives on maintenance optimization*. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2011. **17**(1): p. 5-25.
17. Mahfoud, H., E.B. Abdellah, et A. El Biyaali, *Dependability-based maintenance optimization in healthcare domain*. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2018. **24**(2): p. 200-223.
18. Roda, I., et al., *A review of multi-criteria classification of spare parts: From literature analysis to industrial evidences*. Journal of Manufacturing Technology Management, 2014. **25**(4): p. 528-549.
19. Chong, A.K.W., et al., *Maintenance prioritization—a review on factors and methods*. Journal of Facilities Management, 2019. **17**(1): p. 18-39.
20. Hong, D.S., S. Kamaruddin, et I.A. Azid, *Maintenance policy selection: a review towards building proper selection model*. International Journal of Industrial and Systems Engineering, 2012. **10**(3): p. 355-375.
21. Thor, J., S.-H. Ding, et S. Kamaruddin, *Comparison of multi criteria decision making methods from the maintenance alternative selection perspective*. The International Journal of Engineering and Science, 2013. **2**(6): p. 27-34.

22. Moya, M.d.C.C., *MCDM Techniques in Maintenance Policy Selection*, in *Encyclopedia of Business Analytics and Optimization*. 2014, IGI Global. p. 1517-1528.
23. Shafiee, M., *Maintenance strategy selection problem: an MCDM overview*. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2015. **21**(4): p. 378-402.
24. Sabaei, D., J. Erkoyuncu, et R. Roy, *A review of multi-criteria decision making methods for enhanced maintenance delivery*. Procedia CIRP, 2015. **37**: p. 30-35.
25. de Almeida, A.T., R.J.P. Ferreira, et C.A.V. Cavalcante, *A review of the use of multicriteria and multi-objective models in maintenance and reliability*. IMA Journal of Management Mathematics, 2015. **26**(3): p. 249-271.
26. Eslami, S., S.M. Sajadi, et A.H. Kashan, *Selecting a preventive maintenance scheduling method by using simulation and multi criteria decision making*. International Journal of Logistics Systems and Management, 2014. **18**(2): p. 250-269.
27. Romdhane, T.B., F.B. Ammar, et A. Badreddine, *Une approche par la logique floue pour l'optimisation multicritère de la prise de décision appliquée à l'AMDEC*. Journal of Decision Systems, 2007. **16**(4): p. 505-544.
28. Braglia, M., *MAFMA: multi-attribute failure mode analysis*. International Journal of Quality & Reliability Management, 2000. **17**(9): p. 1017-1033.
29. Sachdeva, A., D. Kumar, et P. Kumar, *A methodology to determine maintenance criticality using AHP*. International Journal of Productivity and Quality Management, 2008. **3**(4): p. 396-412.
30. Braglia, M., M. Frosolini, et R. Montanari, *Fuzzy TOPSIS approach for failure mode, effects and criticality analysis*. Quality and reliability engineering international, 2003. **19**(5): p. 425-443.
31. Sachdeva, A., D. Kumar, et P. Kumar, *Multi-factor failure mode critically analysis using TOPSIS*. 2009.
32. Ji, B., et al., *Multi-Criteria Decision-Making-Based Critical Component Identification and Prioritization for Predictive Maintenance*. Industrial Engineering & Management Systems, 2019. **18**(3): p. 305-314.
33. Emovon, I., et al., *An integrated multicriteria decision making methodology using compromise solution methods for prioritising risk of marine machinery systems*. Ocean Engineering, 2015. **105**: p. 92-103.
34. Emovon, I., *Failure mode and effects analysis of ship systems using an integrated Dempster Shafer theory and Electre method*. Journal of Advanced Manufacturing Technology (JAMT), 2016. **10**(1): p. 45-60.
35. Pancholi, N. et M. Bhatt, *FMECA-based maintenance planning through COPRAS-G and PSI*. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2018. **24**(2): p. 224-243.
36. Alencar, M.H. et A.T. de Almeida, *A multicriteria decision model for assessment of failure consequences in the RCM approach*. Mathematical Problems in Engineering, 2015. **2015**.
37. Maheswaran, K. et T. Loganathan, *A Novel Approach for Prioritization of Failure modes in FMEA using MCDM*. International Journal of Engineering Research and Applications, 2013. **3**(4): p. 733-739.
38. Emovon, I., *Risk assessment of a tyre manufacturing industry plant: A comparative study of grey relational analysis and PROMETHEE approaches*. Indian Journal of Engineering, 2018. **15**: p. 9-18.
39. Alrifayy, M., et al., *Identification and prioritization of risk factors in an electrical generator based on the hybrid FMEA framework*. Energies, 2019. **12**(4): p. 649.
40. Jafarzadeh Ghouschi, S., et al., *Integrated Decision-Making Approach Based on SWARA and GRA Methods for the Prioritization of Failures in Solar Panel Systems under Z-Information*. Symmetry, 2020. **12**(2): p. 310.

41. Ferreira, R.J., A.T. de Almeida, et C.A. Cavalcante, *A multi-criteria decision model to determine inspection intervals of condition monitoring based on delay time analysis*. Reliability Engineering & System Safety, 2009. **94**(5): p. 905-912.
42. de Almeida, A.T., *Multicriteria model for selection of preventive maintenance intervals*. Quality and Reliability Engineering International, 2012. **28**(6): p. 585-593.
43. Ulusoy, G., I. Or, et N. Soydan, *Design and implementation of a maintenance planning and control system*. International Journal of Production Economics, 1992. **24**(3): p. 263-272.
44. Cavalcante, V., et al., *A preventive maintenance decision model based on multicriteria method PROMETHEE II integrated with Bayesian approach*. IMA Journal of Management Mathematics, 2010. **21**(4): p. 333-348.
45. Cavalcante, C.A.V. et A. Costa, *Multicriteria model of preventive maintenance*. Brazilian Journal of Operations & Production Management, 2006. **3**(1): p. 71-86.
46. Chareonsuk, C., N. Nagarur, et M.T. Tabucanon, *A multicriteria approach to the selection of preventive maintenance intervals*. International Journal of Production Economics, 1997. **49**(1): p. 55-64.
47. Emovon, I., R.A. Norman, et A.J. Murphy, *The development of a model for determining scheduled replacement intervals for marine machinery systems*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2017. **231**(3): p. 723-739.
48. Moro, L.M. et A. Ramos, *Goal programming approach to maintenance scheduling of generating units in large scale power systems*. IEEE Transactions on Power Systems, 1999. **14**(3): p. 1021-1028.
49. Certa, A., M. Enea, et T. Lupo, *ELECTRE III to dynamically support the decision maker about the periodic replacements configurations for a multi-component system*. Decision support systems, 2013. **55**(1): p. 126-134.
50. Emovon, I., R.A. Norman, et A.J. Murphy, *An integration of multi-criteria decision making techniques with a delay time model for determination of inspection intervals for marine machinery systems*. Applied Ocean Research, 2016. **59**: p. 65-82.
51. Emovon, I., *Inspection interval determination for ship systems using an integrated PROMETHEE method and delay time model*. Journal of Mechanical Engineering and Technology (JMETS), 2016. **8**(1): p. 13-29.
52. Cavalcante, C.A.V. et A. De Almeida, *A multi-criteria decision-aiding model using PROMETHEE III for preventive maintenance planning under uncertain conditions*. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2007. **13**(4): p. 385-397.
53. Faghihinia, E. et N. Mollaverdi, *Building a maintenance policy through a multi-criterion decision-making model*. Journal of Industrial Engineering International, 2012. **8**(1): p. 14.
54. Nosoohi, I. et S.R. Hejazi, *A multi-objective approach to simultaneous determination of spare part numbers and preventive replacement times*. Applied Mathematical Modelling, 2011. **35**(3): p. 1157-1166.
55. Seiti, H. et A. Hafezalkotob, *Developing the R-TOPSIS methodology for risk-based preventive maintenance planning: A case study in rolling mill company*. Computers & Industrial Engineering, 2019. **128**: p. 622-636.
56. Singh, R.K. et M.S. Kulkarni, *Criticality Analysis of power-plant equipments using the Analytic Hierarchy process*. International Journal of Industrial Engineering & Technology (IJIET), 2013. **3**(4).
57. Taghipour, S., D. Banjevic, et A.K. Jardine, *Prioritization of medical equipment for maintenance decisions*. Journal of the Operational Research Society, 2011. **62**(9): p. 1666-1687.

58. Labib, A., G. Williams, et R. O'Connor, *An intelligent maintenance model (system): an application of the analytic hierarchy process and a fuzzy logic rule-based controller*. Journal of the Operational Research Society, 1998. **49**(7): p. 745-757.
59. Jagtap, H. et A. Bewoor, *Use of analytic hierarchy process methodology for criticality analysis of thermal power plant equipments*. Mater. Today Proc, 2017. **4**: p. 1927-1936.
60. Lopes, I.d.S., et al., *Multi-criteria classification for prioritization of preventive maintenance tasks to support maintenance scheduling*, in *2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*. 2017, IEEE. p. 2102-2106.
61. Jain, K., et al., *An Analytical Hierarchy Process Based Approach for Effective Maintenance Prioritization of Power Transformers*, in *Advances in Energy and Power Systems*. 2018, Springer. p. 165-174.
62. Elseddawy, A.Z. et A.H. Kandil, *Selection of appropriate maintenance strategy for Medical Equipment*, in *9th Cairo International Biomedical Engineering Conference (CIBEC)*. 2018, IEEE. p. 73-77.
63. Hutagalung, A.O. et S. Hasibuan, *Determining the Priority of Medical Equipment Maintenance with Analytical Hierarchy Process*. International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE), 2019. **15**(10): p. 107-120.
64. Chelbi, A. et D. Ait-Kadi, *Une approche multicritère*. Journal of Decision Systems, 2002. **11**(1): p. 91-108.
65. do Carmo Mendonça, T., et al. *Prioritization of maintenance equipment employing multicriteria decision aid*. dans *2018 Annual IEEE International Systems Conference (SysCon)*. 2018. Vancouver, Canada: IEEE.
66. Noureddine, R. et M. Noureddine, *Application du concept d'agrégation multicritères dans le processus de maintenance*. Journal of Decision Systems, 2012. **21**(4): p. 319-329.
67. de León Hijes, F.C.G. et J.J.R. Cartagena, *Maintenance strategy based on a multicriterion classification of equipments*. Reliability Engineering & System Safety, 2006. **91**(4): p. 444-451.
68. Dehghanian, P., et al., *Critical component identification in reliability centered asset management of power distribution systems via fuzzy AHP*. IEEE Systems Journal, 2011. **6**(4): p. 593-602.
69. Mahfoud, H., A. El Barkany, et A. El Biyaali, *A hybrid decision-making model for maintenance prioritization in health care systems*. Am. J. Appl. Sci, 2016. **13**(4): p. 439-450.
70. Khaira, A. et R.K. Dwivedi, *Identification of critical component to enhance equipment availability in a graphite manufacturing industry*. International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development, 2017. **7**(3): p. 25-32.
71. Wang, J., K. Fan, et W. Wang, *Integration of fuzzy AHP and FPP with TOPSIS methodology for aeroengine health assessment*. Expert Systems with Applications, 2010. **37**(12): p. 8516-8526.
72. Özcan, E.C., S. Ünlüsoy, et T. Eren, *A combined goal programming–AHP approach supported with TOPSIS for maintenance strategy selection in hydroelectric power plants*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **78**: p. 1410-1423.
73. Jackson, D.W. et R. Ocampo, *A Methodology for Aircraft Reliability, Maintainability, Availability, and Cost Management*, in *2019 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*. 2019, IEEE: Orlando. p. 1-6.
74. Sevilla Juárez, E. et C.E. Escobar Toledo, *The efficiency of preventive maintenance planning and the multicriteria methods: a case study*. Computación y Sistemas, 2008. **12**(2): p. 208-215.

75. Pourjavad, E. et H. Shirouyehzad, *A MCDM approach for prioritizing production lines: a case study*. International Journal of Business and Management, 2011. **6**(10): p. 221-229.
76. Balin, A., H. Demirel, et F. Alarcin, *A novel hybrid MCDM model based on fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS for the most affected gas turbine component selection by the failures*. Journal of Marine Engineering & Technology, 2016. **15**(2): p. 69-78.
77. Bona, G.D., A. Forcina, et D. Falcone, *Maintenance strategy design in a sintering plant based on a multicriteria approach*. International Journal of Management and Decision Making, 2018. **17**(1): p. 29-49.
78. Melani, A.H.A., et al., *Criticality-based maintenance of a coal-fired power plant*. Energy, 2018. **147**: p. 767-781.
79. Gupta, G. et R. Mishra, *Identification of critical components using ANP for implementation of reliability centered maintenance*. Procedia CIRP, 2018. **69**: p. 905-909.
80. Khanlari, A., K. Mohammadi, et B. Sohrabi, *Prioritizing equipments for preventive maintenance (PM) activities using fuzzy rules*. Computers & Industrial Engineering, 2008. **54**(2): p. 169-184.
81. Dakkak, B., Y. Chater, et A. Talbi, *Proposition d'une matrice de criticité intégrant les systèmes Qualité, Sécurité et Environnement pour la fonction maintenance*. Journal of Decision Systems, 2012. **21**(4): p. 291-305.
82. Bevilacqua, M. et M. Braglia, *The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection*. Reliability Engineering & System Safety, 2000. **70**(1): p. 71-83.
83. Jamshidi, A., et al., *A comprehensive fuzzy risk-based maintenance framework for prioritization of medical devices*. Applied Soft Computing, 2015. **32**: p. 322-334.
84. Patel, R.K. et R.K. Dwivedi, *Determination of Critical Component Failure in Thermal Power Station by Using Multi-criteria Decision-Making Methods*. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2020: p. 1-5.
85. Abdelhadi, A., *Maintenance scheduling based on PROMETHEE method in conjunction with group technology philosophy*. International Journal of Quality & Reliability Management, 2018.
86. Tang, Y., et al., *A framework for identification of maintenance significant items in reliability centered maintenance*. Energy, 2017. **118**: p. 1295-1303.
87. Shyjith, K., M. Ilangkumaran, et S. Kumanan, *Multi-criteria decision-making approach to evaluate optimum maintenance strategy in textile industry*. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2008. **14**(4): p. 375-386.
88. Emovon, I., *Ship System Maintenance Strategy Selection Based on DELPHI-AHP-TOPSIS Methodology*. World Journal of Engineering and Technology, 2016. **4**(02): p. 252.
89. Ioannis, D. et N. Nikitas. *Application of analytic hierarchy process & TOPSIS methodology on ships' maintenance strategies*. dans *Journal of Polish Safety and Reliability Association, Summer Safety and Reliability Seminars*. 2013.
90. Emovon, I., R.A. Norman, et A.J. Murphy, *Hybrid MCDM based methodology for selecting the optimum maintenance strategy for ship machinery systems*. Journal of intelligent manufacturing, 2018. **29**(3): p. 519-531.
91. Bertolini, M. et M. Bevilacqua, *A combined goal programming—AHP approach to maintenance selection problem*. Reliability Engineering & System Safety, 2006. **91**(7): p. 839-848.
92. Arunraj, N. et J. Maiti, *Risk-based maintenance policy selection using AHP and goal programming*. Safety science, 2010. **48**(2): p. 238-247.
93. Ahmadi, A., et al., *Selection of maintenance strategy for aircraft systems using multi-criteria decision making methodologies*. International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, 2010. **17**(03): p. 223-243.

94. Seecharan, T., A. Labib, et A. Jardine, *Maintenance strategies: Decision Making Grid vs Jack-Knife Diagram*. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2018. **24**(1): p. 61-78.
95. Carnero, M.C. et A. Gómez, *Maintenance strategy selection in electric power distribution systems*. Energy, 2017. **129**: p. 255-272.
96. Carnero, M.C. et A. Gómez, *A multicriteria decision making approach applied to improving maintenance policies in healthcare organizations*. BMC medical informatics and decision making, 2016. **16**(1): p. 47.
97. Carnero, M. et A. Gómez, *A Multicriteria Model for Optimization of Maintenance in Thermal Energy Production Systems in Hospitals: A Case Study in a Spanish Hospital*. Sustainability, 2017. **9**(4): p. 493.
98. Akhshabi, M., *A new fuzzy multi criteria model for maintenance policy*. Middle-East Journal of Scientific Research, 2011. **10**(1): p. 33-38.
99. Nagar, A., *Development of fuzzy multi criteria decision making method for selection of optimum maintenance alternative*. International Journal of Applied Research in Mechanical Engineering, 2011. **1**(2): p. 87-92.
100. Odeyale, S., O. Alamu, et E. Odeyale, *The analytical hierarchy process concept for maintenance strategy selection in manufacturing industries*. The Pacific Journal of Science and Technology, 2013. **14**(1): p. 223-233.
101. Muinde, P.M., *Maintenance strategy selection using analytic hierarchy process: a case study*. Journal of Sustainable Research in Engineering, 2015. **1**(4): p. 21-29.
102. Goossens, A.J. et R.J. Basten, *Exploring maintenance policy selection using the Analytic Hierarchy Process; an application for naval ships*. Reliability Engineering & System Safety, 2015. **142**: p. 31-41.
103. Chandima Ratnayake, R. et T. Markeset, *Technical integrity management: measuring HSE awareness using AHP in selecting a maintenance strategy*. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2010. **16**(1): p. 44-63.
104. Wang, L., J. Chu, et J. Wu, *Selection of optimum maintenance strategies based on a fuzzy analytic hierarchy process*. International journal of production economics, 2007. **107**(1): p. 151-163.
105. Zaim, S., et al., *Maintenance strategy selection using AHP and ANP algorithms: a case study*. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2012. **18**(1): p. 16-29.
106. Azizi, A. et K. Fathi, *Selection of optimum maintenance strategies based on a fuzzy analytic hierarchy process*. Management Science Letters, 2014. **4**(5): p. 893-898.
107. Ishizaka, A. et P. Nemery, *Assigning machines to incomparable maintenance strategies with ELECTRE-SORT*. Omega, 2014. **47**: p. 45-59.
108. Ghosh, D. et S. Roy, *A decision-making framework for process plant maintenance*. European Journal of Industrial Engineering, 2009. **4**(1): p. 78-98.
109. Thor, J., S.-H. Ding, et S. Kamaruddin, *Development of maintenance policy evaluation model: a case study of the semiconductor industry for achieving production demand*. International Journal of Logistics Systems and Management, 2013. **15**(4): p. 405-423.
110. Borjalilu, N. et M. Ghambari, *Optimal maintenance strategy selection based on a fuzzy analytical network process: A case study on a 5-MW powerhouse*. International Journal of Engineering Business Management, 2018. **10**.
111. Rahimi, M., S. Sadinejad, et K. Khalili-Damghani, *Selecting the most appropriate maintenance strategies using fuzzy analytic network process: a case study of Saipa vehicle industry*. Decision Science Letters, 2014. **3**(2): p. 237-242.
112. Sadeghi, A. et R.A. Manesh, *The application of fuzzy group analytic network process to selection of best maintenance strategy-a case study in mobarakeh steel company, Iran*. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2012. **62**: p. 1378-1383.

113. Momeni, M., et al., *A fuzzy TOPSIS-based approach to maintenance strategy selection: a case study*. Middle-East Journal of Scientific Research, 2011. **8**(3): p. 699-706.
114. Kausar, A., et al., *The Solution of Maintenance Strategy Selection Problem by using modified Fuzzy TOPSIS for of Material Handling Equipment*. Sukkur IBA Journal of Computing and Mathematical Sciences, 2020. **3**(2): p. 46-54.
115. Fouladgar, M.M., et al., *Maintenance strategy selection using AHP and COPRAS under fuzzy environment*. International journal of strategic property management, 2012. **16**(1): p. 85-104.
116. Ilangkumaran, M. et S. Kumanan, *Application of hybrid VIKOR model in selection of maintenance strategy*. International Journal of Information Systems and Supply Chain Management (IJISSCM), 2012. **5**(2): p. 59-81.
117. Pourjavad, E., H. Shirouyehzad, et A. Shahin, *Selecting maintenance strategy in mining industry by analytic network process and TOPSIS*. International Journal of Industrial and Systems Engineering, 2013. **15**(2): p. 171-192.
118. Shahin, A., E. Pourjavad, et H. Shirouyehzad, *Selecting optimum maintenance strategy by analytic network process with a case study in the mining industry*. International Journal of Productivity and Quality Management, 2012. **10**(4): p. 464-483.
119. Al-Najjar, B. et I. Alsyouf, *Selecting the most efficient maintenance approach using fuzzy multiple criteria decision making*. International journal of production economics, 2003. **84**(1): p. 85-100.
120. Jafari, A., et al., *Using fuzzy Delphi method in maintenance strategy selection problem*. Journal of Uncertain Systems, 2008. **2**(4): p. 289-298.
121. Sagar, M., P. Jayaswal, et K. Kushwah, *Exploring fuzzy SAW method for maintenance strategy selection problem of material handling equipment*. International Journal of Current Engineering and Technology, 2013. **3**(2): p. 600-605.
122. Aghaie, M. et S. Fazli, *An improved MCDM method for maintenance approach selection: A case study of auto industry*. Management Science Letters, 2012. **2**(1): p. 137-146.
123. Azadeh, A. et S. Abdolhossein Zadeh, *An integrated fuzzy analytic hierarchy process and fuzzy multiple-criteria decision-making simulation approach for maintenance policy selection*. Simulation, 2016. **92**(1): p. 3-18.
124. Tajadod, M., et al., *A comparison of multi-criteria decision making approaches for maintenance strategy selection (a case study)*. International Journal of Strategic Decision Sciences (IJSDS), 2016. **7**(3): p. 51-69.
125. Nezami, F.G. et M.B. Yildirim, *A sustainability approach for selecting maintenance strategy*. International Journal of Sustainable Engineering, 2013. **6**(4): p. 332-343.
126. Kirubakaran, B. et M. Ilangkumaran, *Selection of optimum maintenance strategy based on FAHP integrated with GRA–TOPSIS*. Annals of Operations Research, 2016. **245**(1-2): p. 285-313.
127. Ilangkumaran, M. et S. Kumanan, *Selection of maintenance policy for textile industry using hybrid multi-criteria decision making approach*. Journal of Manufacturing Technology Management, 2009. **20**(7): p. 1009-1022.
128. Masmoudi, M., et al., *Quantitative techniques for medical equipment maintenance management*. European Journal Industrial Engineering, 2016: p. 703-723.
129. Chan, F.T. et A. Prakash, *Maintenance policy selection in manufacturing firms using the fuzzy MCDM approach*. International Journal of Production Research, 2012. **50**(23): p. 7044-7056.
130. Emovon, I. et O.D. Samuel, *Prioritising alternative solutions to power generation problems using MCDM techniques: Nigeria as case study*. International Journal of Integrated Engineering, 2017. **9**(3).

131. Panchal, D., et al., *INTEGRATED FUZZY AHP-CODAS FRAMEWORK FOR MAINTENANCE DECISION IN UREA FERTILIZER INDUSTRY*. Economic Computation & Economic Cybernetics Studies & Research, 2017. **51**(3).
132. Srivastava, P., D. Khanduja, et V. Agrawal, *A framework of fuzzy integrated MADM and GMA for maintenance strategy selection based on agile enabler attributes*. Mathematics-in-Industry Case Studies, 2017. **8**(1): p. 5.
133. Seiti, H., et al., *Maintenance strategy selection with risky evaluations using RAHP*. Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, 2017. **24**(5-6): p. 257-274.
134. Shafiee, M., et al., *Maintenance strategy selection for multi-component systems using a combined analytic network process and cost-risk criticality model*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2019. **233**(2): p. 89-104.
135. Animah, I. et M. Shafiee, *Maintenance strategy selection for critical shipboard machinery systems using a hybrid AHP-PROMETHEE and cost benefit analysis: a case study*. Journal of Marine Engineering & Technology, 2019: p. 1-12.
136. Asuquo, M.P., et al., *Application of a multiple attribute group decision making (MAGDM) model for selecting appropriate maintenance strategy for marine and offshore machinery operations*. Ocean Engineering, 2019. **179**: p. 246-260.
137. Carnero, M.C., *Multicriteria model for maintenance benchmarking*. Journal of Manufacturing Systems, 2014. **33**(2): p. 303-321.
138. Valavi, D. et V. Pramod, *A hybrid fuzzy MCDM approach to maintenance Quality Function Deployment*. Decision Science Letters, 2015. **4**(1): p. 79-108.
139. e Costa, C.A.B., M.C. Carnero, et M.D. Oliveira, *A multi-criteria model for auditing a Predictive Maintenance Programme*. European Journal of Operational Research, 2012. **217**(2): p. 381-393.
140. Pramod, V., et al., *Multicriteria decision making in maintenance quality function deployment through the analytical hierarchy process*. International Journal of Industrial and Systems Engineering, 2007. **2**(4): p. 454-478.
141. Ierace, S. et S. Cavalieri, *An analytic hierarchy process based model for the selection of decision categories in maintenance systems*. Management and Production Engineering Review, 2013. **4**(2): p. 37-49.
142. Wu, H.-Y., J.-K. Chen, et I.-S. Chen, *Performance evaluation of aircraft maintenance staff using a fuzzy MCDM approach*. Int. J. Innov. Comput. Inf. Control, 2012. **8**: p. 3919-3937.
143. Oke, S.A., *An Integrated Fuzzy Analytical Hierarchical Process and Fuzzy Grey Relational Analytical Model with Vikor for Maintenance System Appraisal*. Journal of Mechanical Engineering and Technology (JMET), 2017. **9**(1): p. 67-86.
144. de Almeida, A.T., *Multicriteria decision making on maintenance: spares and contracts planning*. European Journal of Operational Research, 2001. **129**(2): p. 235-241.
145. Nayebpour, M.M. et K. Shahanaghi, *Developing a multi attribute decision making model for outsourcing maintenance operations based on machine's life cycle*. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2009. **3**(4): p. 3568-3574.
146. Jafarnejad, A., et al., *Designing a operational evaluation model for outsourcing decision making by effective outsourcing factors*. International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences, 2013. **3**(7): p. 371.
147. Bertolini, M., et al., *An analytical method for maintenance outsourcing service selection*. International Journal of Quality & Reliability Management, 2004. **21**(7): p. 772-788.
148. Burhanuddin, M., et al., *Failure-based maintenance decision support system using analytical hierarchical process*. International Journal of Advanced Computer Science, 2011. **1**(1): p. 1-9.

149. Hadidi, L.A. et M.A. Khater, *Loss prevention in turnaround maintenance projects by selecting contractors based on safety criteria using the analytic hierarchy process (AHP)*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015. **34**: p. 115-126.
150. Partovi, F.Y. et J. Burton, *Using the analytic hierarchy process for ABC analysis*. International Journal of Operations & Production Management, 1993. **13**(9): p. 29-44.
151. Gajpal, P.P., L. Ganesh, et C. Rajendran, *Criticality analysis of spare parts using the analytic hierarchy process*. International journal of production economics, 1994. **35**(1-3): p. 293-297.
152. Cakir, O. et M.S. Canbolat, *A web-based decision support system for multi-criteria inventory classification using fuzzy AHP methodology*. Expert systems with applications, 2008. **35**(3): p. 1367-1378.
153. Jajimoggala, S., V.K. Rao, et S. Beela, *Spare parts criticality evaluation using hybrid multiple criteria decision making technique*. International Journal of Information and Decision Sciences, 2012. **4**(4): p. 350-370.
154. Braglia, M., A. Grassi, et R. Montanari, *Multi-attribute classification method for spare parts inventory management*. Journal of quality in maintenance engineering, 2004. **10**(1): p. 55-65.
155. Molenaers, A., et al., *Criticality classification of spare parts: A case study*. International Journal of Production Economics, 2012. **140**(2): p. 570-578.
156. Stoll, J., et al., *Criticality analysis of spare parts management: a multi-criteria classification regarding a cross-plant central warehouse strategy*. Production Engineering, 2015. **9**(2): p. 225-235.
157. Sarmah, S. et U. Moharana, *Multi-criteria classification of spare parts inventories—a web based approach*. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2015. **21**(4): p. 456-477.
158. Carnero, M.C., *Fuzzy multicriteria model for selection of vibration technology*. Shock and Vibration, 2016. **2016**.
159. Durán, O., *Computer-aided maintenance management systems selection based on a fuzzy AHP approach*. Advances in Engineering Software, 2011. **42**(10): p. 821-829.
160. Gómez, A. et M.C. Carnero, *Selection of a computerised maintenance management system: a case study in a regional health service*. Production Planning & Control, 2011. **22**(4): p. 426-436.
161. Carnero, M., *Selection of condition monitoring techniques using discrete probability distributions: a case study*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2009. **223**(1): p. 99-117.
162. Carnero Moya, M.D.C., *Model for the selection of predictive maintenance techniques*. INFOR: Information Systems and Operational Research, 2007. **45**(2): p. 83-94.
163. Carnero, M. et J. Novés, *Selection of computerised maintenance management system by means of multicriteria methods*. Production Planning and Control, 2006. **17**(4): p. 335-354.
164. Carnero, M.C., *Selection of diagnostic techniques and instrumentation in a predictive maintenance program. A case study*. Decision support systems, 2005. **38**(4): p. 539-555.
165. García-Cascales, M.S. et M.T. Lamata, *Selection of a cleaning system for engine maintenance based on the analytic hierarchy process*. Computers & Industrial Engineering, 2009. **56**(4): p. 1442-1451.
166. Braglia, M., et al., *AHP-based evaluation of CMMS software*. Journal of manufacturing technology management, 2006. **17**(5): p. 585-602.
167. Zare, A., et al., *Suitable computerized maintenance management system selection using grey group TOPSIS and fuzzy group VIKOR: a case study*. Decision Science Letters, 2018. **7**(4): p. 341-358.

168. Garcia-Cascales, M.S. et M.T. Lamata, *Multi-criteria analysis for a maintenance management problem in an engine factory: rational choice*. Journal of Intelligent Manufacturing, 2011. **22**(5): p. 779-788.
169. Trojan, F. et D.C. Morais, *Prioritising alternatives for maintenance of water distribution networks: A group decision approach*. Water Sa, 2012. **38**(4): p. 555-564.
170. Jiang, W., et al., *Fault diagnosis based on TOPSIS method with Manhattan distance*. Advances in Mechanical Engineering, 2019. **11**(3): p. 1687814019833279.
171. Figueira, J., S. Greco, et M. Ehrgott, *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys*. Vol. 78. 2005: Springer Science & Business Media.
172. Hatami-Marbini, A. et M. Tavana, *An extension of the Electre I method for group decision-making under a fuzzy environment*. Omega, 2011. **39**(4): p. 373-386.
173. da Silva, J.G. et R.S. Lopes, *An integrated framework for mode failure analysis, delay time model and multi-criteria decision-making for determination of inspection intervals in complex systems*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2018. **51**: p. 17-28.
174. Delbecq, A.L., A.H. Van de Ven, et D.H. Gustafson, *Group techniques for program planning: A guide to nominal group and Delphi processes*. 1975: Scott Foresman.
175. Roszkowska, E., *Rank ordering criteria weighting methods—a comparative overview*. 2013.
176. Zardari, N.H., et al., *Weighting methods and their effects on multi-criteria decision making model outcomes in water resources management*. 2015: Springer.
177. Grošelj, P., et al., *Comparison of some aggregation techniques using group analytic hierarchy process*. Expert Systems with Applications, 2015. **42**(4): p. 2198-2204.
178. Mena, S.B., *Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision*. Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement, 2000. **4**(2): p. 83-93.
179. Guitouni, A., M. Bélanger, et J. Martel, *Cadre méthodologique pour différencier les méthodes multicritères*. 2010: Defence [sic] R&D pour la défense [sic] Canada-Valcartier.
180. Ishizaka, A. et A. Labib, *Analytic hierarchy process and expert choice: Benefits and limitations*. Or Insight, 2009. **22**(4): p. 201-220.
181. Millet, I. et T.L. Saaty, *On the relativity of relative measures—accommodating both rank preservation and rank reversals in the AHP*. European Journal of Operational Research, 2000. **121**(1): p. 205-212.
182. DESPUJOLS, A., *Maintenance, sûreté de fonctionnement et management des actifs de production*. 2009.
183. Mareschal, B., J.P. Brans, et P. Vincke, *PROMETHEE: A new family of outranking methods in multicriteria analysis*. 1984, ULB--Universite Libre de Bruxelles.
184. Brans, J.-P. et B. Mareschal, *PROMETHEE: Une méthodologie d'aide à la décision en présence de critères multiples*. Bruxelles: Éditions de l'Université de Bruxelles (collection Statistique et Mathématiques Appliquées), 2002.
185. Figueira, J.J., Y. De Smet, et J.P. Brans, *MCDA methods for sorting and clustering problems: Promethee TRI and Promethee CLUSTER*. 2005.
186. Hammami, A., *Modélisation technico-économique d'une chaîne logistique dans une entreprise réseau*. 2003, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne; Université Laval.
187. Aires, R.F.d.F. et L. Ferreira, *The Rank Reversal Problem in Multi-Criteria Decision Making: A Literature Review*. Pesquisa Operacional, 2018. **38**(2): p. 331-362.
188. Abrishamchi, A., et al., *Case study: application of multicriteria decision making to urban water supply*. Journal of water resources planning and management, 2005. **131**(4): p. 326-335.
189. Wątróbski, J., et al., *Generalised framework for multi-criteria method selection*. Omega, 2019. **86**: p. 107-124.

190. Guitouni, A. et J.-M. Martel, *Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method*. European journal of operational research, 1998. **109**(2): p. 501-521.
191. Guitouni, A., et al., *A framework to choose a discrete multicriterion aggregation procedure*. Defence research establishment valcatier (DREV), 1998.
192. Bafahm, A. et M. Sun, *Some Conflicting Results in the Analytic Hierarchy Process*. International Journal of Information Technology and Decision Making, 2019. **18**(2): p. 465-486.
193. Bouchaala, M.A., R. Nouredine, et M. Nouredine, *Using PROMETHEE and TOPSIS for prioritizing maintenance actions*, in *5th International Conference on Advances in Mechanical Engineering (ICAME 2019)*. 2019: ISTANBUL (Turkey).
194. Bouchaala, A.M. et R. Nouredine, *Using AHP to Identify the Priority Equipment for Maintenance Actions*. International Journal of Decision Support System Technology (IJDSST), 2020. **12**(3): p. 26-42.
195. Kong, F. *Rank reversal and rank preservation in TOPSIS*. dans *Advanced Materials Research*. 2011. Trans Tech Publ.