



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

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

معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Electromécanique

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industriel
Spécialité : Maintenance-Fiabilité-Qualité

Thème

**Hiérarchisation des équipements en vue d'une
maintenance basée sur la Fiabilité**

Présenté et soutenu publiquement par :

Zouad Mokhtar

Dellani Nedjema

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
BOUKEZZI Farid	MCB	Université d'Oran 2	Président
NOUREDDINE Rachid	Prof.	Université d'Oran 2	Encadreur
GHOUARI Adel	MCB	Université d'Oran 2	Examinateur

Année 2020

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Nomenclature

Introduction générale..... 1

Chapitre 1 – Concept MBF

Introduction 2

1 Généralités..... 3

1.1 Définitions..... 3

1.2 Objectifs de la MBF..... 3

1.3 Outils de la MBF..... 4

2 Méthodologie de la MBF 4

2.1 Démarche de la MBF 4

2.2 Classification des défaillances 6

3 Recherche des matériels critiques 7

3.1 Méthodes d'analyse de la criticité des équipement..... 7

Conclusion..... 8

Chapitre 2 – Pareto – Matrice de criticité

1 Méthode de Pareto..... 9

1.1 Introduction 9

1.2 Importance de la méthode de Pareto : 10

1.3 Equation de Pareto..... 11

1.4 Méthode de Pareto dans la maintenance industrielle 13

1.5 Mise en application de la loi de Pareto à la maintenance 13

2 La méthode de la matrice de criticité 14

2.1 Introduction 14

2.2 Définition de la matrice de criticité 14

2.3 Le but de la matrice de criticité 16

3 Les méthodes de cotation de détermination les paramètres (G, F, ND)..... 17

3.1 G / La gravité de la défaillance..... 17

3.2 F/ La fréquence d'apparition d'une défaillance..... 27

3.3 ND/ La probabilité de non détection de la défaillance 17

3.4 K/ le coefficient de pondération des systèmes..... 18

3.5	Le taux qualité	19
3.6	Le taux sécurité.....	20
3.7	Le taux environnement	20
4	Conclusion.....	20

Chapitre 3 – PROMETHEE

	Introduction	21
1	L'aide multicritère à la décision (AMDC).....	21
1.1	Définition	21
1.2	Etapes du processus d'AMCD	22
1.2.1	Définir le problème	23
1.2.2	Dresser la liste des actions :	23
1.2.3	Critères	23
1.2.4	Evaluation des critères	24
1.2.5	Formation des systèmes de valeur.....	24
1.2.6	Évaluation des performances	24
1.2.7	Agrégation des préférences	25
1.2.8	Construction d'un groupe robuste de solutions.....	26
1.3	Démarche multicritère.....	26
1.4	Différentes démarches d'analyse multicritère	27
1.5	Modèle multicritère	28
2	Principe de la méthode PROMETHEE	29
2.1	Les trois phases de la méthode PROMETHEE.....	30
2.2	La notion de critère généralisé	30
2.3	Modélisation des préférences	32
2.3.1	Choix des fonctions de préférence	32
2.4	Choix du type de critère généralisé	35
2.5	Procédure de synthèse de surclassement.....	36
2.5.1	L'indice de préférence multicritère	36
2.5.2	La relation de surclassement	37
2.5.3	Flux de Préférence (Flux de surclassement)	37
2.5.3.1	Le flux de surclassement sortant.....	38
2.5.3.2	Le flux de surclassement entrant.....	38
2.5.3.3	Le flux de surclassement net.....	39
2.6	Exploitation de la valeur de la relation de surclassement	40
2.6.1	La méthode PROMETHEE I : Classement partiel.....	40
2.6.2	La méthode PROMETHEE II : Rangement complet.....	41
2.6.3	La différence entre Prométhée I et II	43
2.6.4	GAIA.....	44
2.7	Avantages de la méthode PROMETHEE.....	45
2.8	Inconvénients de la méthode PROMETHEE :	46

Conclusion :	46
--------------------	----

Chapitre 4 – Etudes de cas

Introduction	47
1 Visual PROMETHEE	47
1.1 Terminologie	47
1.2 Comment utiliser Visual PROMETHEE ?	48
1.3 Outils d’analyses.....	48
2 Etude de cas 1	50
2.1 Equipements considérés	50
2.2 Classement des équipements selon la matrice de criticité.....	50
2.3 Classement selon la méthode PROMETHEE.....	51
2.4 Analyses selon la méthode PROMETHEE	52
2.4.1 GAIA.....	52
2.4.2 Classement PROMETHEE I	53
2.4.3 Classement PROMETHEE II.....	54
2.4.4 Diamant PROMETHEE	55
2.4.5 PROMETHEE Network.....	56
2.4.6 PROMETHEE Rainbow	57
2.5 Analyse de Sensibilité avec PROMETHEE	58
3 Etude de cas 2	65
3.1 Données	65
3.2 Traitement des données	66
3.3 Analyse par Visual PROMETHEE.....	66
3.3.1 Classement des équipements.....	67
3.3.2 Analyse Rainbow	67
3.3.3 Analyse de sensibilité.....	67
Conclusion	69
Conclusion générale	70
Bibliographie.....	71

Remerciements

Avant tout, nous remercions **ALLAH** le tout puissant, de nous avoir accordé la force, le courage et les moyens pour la réalisation de ce travail.

Tout d'abord nous exprimons notre sincère gratitude à notre encadreur Monsieur **NOURDDINE Rachid** d'avoir accepté de nous encadrer, de nous avoir conseillé judicieusement, pour sa précieuse contribution pédagogique et scientifique, pour ses critiques constructives, tout au long de ce travail, qui ont été pour nous un apport considérable.

Nous remercions les membres du jury pour avoir accepté de le présider et d'examiner notre mémoire.

Une grande gratitude à nos chers parents qui nous ont soutenus, encouragé et épaulé tout au long de nos années d'études. Nous leurs témoignons notre affection et remerciements les plus sincères.

Finalement, Nous remercions également toutes les personnes qui ont contribué directement ou indirectement à la réalisation de ce modeste travail. Qu'elles trouvent tous ici l'expression de notre gratitude.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail avant tous à mon cher père et ma mère, qui ont tout sacrifié pour mon bien et qui ont éclairé ma route par leur

Compréhension, leur soutien et leur amour.

A ma chère sœur Yamina et son mari, et ses enfants les étoiles de ma vie

Rayene, Dounia, Houda. Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous.

A mon binôme Mokhtar et toute sa famille et a tous ses proches.

J'ai aussi le grand plaisir de dédier le fruit de mon travail à mes chers amis (e): Amina, Fatima, Romaisa, Sabrina et Mohamed.

Pour les moments de franches amitiés partagées, je vous souhaite la gaité et la réussite dans votre vie.

Nedjema

DÉDICACES

*Au nom d'Allah le plus grand merci lui revient de nous avoir guidés
Vers le droit chemin, de nous avoir aidés tout au long de nos années d'étude.*

Je dédie ce modeste travail et ma profonde gratitude

***À Ma mère** ♥ qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.*

***À Mon père** ♥ qui est mon modèle de cette vie Pour l'éducation qu'il m'a prodigué; Avec tous les moyens et au prix de toutes les sacrifices qu'il a consentis à mon égard, Pour le sens du devoir qu'il m'a enseigné depuis mon enfance.*

***À l'âme de mes grands père bien aimés (Allah yerhamhom)** ♥ Qui ont été toujours dans mon esprit et dans mon cœur, je vous dédie aujourd'hui ma réussite. Que Dieu, vous miséricordieux, vous accueille dans son éternel paradis. **Ainsi à mes grandes mères** ♥ qui m'ont accompagné par leurs prières, leur douceur, puisse Dieu leur prêter une longue vie et beaucoup de santé et de bonheur dans leur vie.*

***À mes sœurs** Khadîdja, Soumia et Maria, Ainsi qu'à mes frères Abdelkader, Brahim Abderrahmane.*

À mes chers oncles, tantes, leurs époux et épouses à mes chers cousins cousines et toute ma famille

Aucun langage ne saurait exprimer mon respect et ma considération pour votre soutien et encouragements. Je vous dédie ce travail en reconnaissance de l'amour que vous m'offrez quotidiennement et votre bonté exceptionnelle. Que Dieu le Tout Puissant vous garde et vous procure santé et bonheur.

***À mes Amis** Imad, Hamza, Yassine, Diaeddine, Rami, Mohamed, Aymen, Mohamed Cherif.*

***À mon Binôme** Nedjema Dellani **AINSI À Monsieur** Oumar Derrar qui est mon prof et mon grand frère a moi.*

Zouad Mokhtar

Liste des figures

Figure 1.1.	Etapas de la MBF.....	6
Figure 1.2.	Défaillances fonctionnelles et potentielles.....	8
Figure 2.1.	le principe de 80/20.....	11
Figure 2.8.	Exemple de matrice de criticité 5x5.....	17
Figure 3.1.	Etapas du processus d'AMCD.....	28
Figure 3.2.	Démarche top-down de Kenney.....	32
Figure 3.3.	Démarche bottom-up de Roy.....	33
Figure 3.4.	Démarche intermédiaire de Laaribi.....	33
Figure 3.5.	Fonction de préférence typique (type V—linéaire fonction de préférence).....	37
Figure 3.6.	Critères généralisés (6 types).....	38
Figure 3.7.a	Vrai critère (type1).....	38
Figure 3.7.b	Quasi-critère (type2).....	39
Figure 3.7.c.	Critère linéaire (type 3).....	39
Figure 3.7.d.	Critère à paliers (type4).....	40
Figure3.7.e.	Critère linéaire avec indifférence (type 5).....	40
Figure 3.7.f.	Critère gaussien(type6).....	41
Figure3. 8.	Choix de l'échelle.....	41
Figure 3.9.	Flux de Préférence.....	44
Figure 3.10.	Rangement des actions.....	51
Figure3.11.	Classement partiel et classement complet	51
Figure4.1.	Fenêtre principale.....	58
Figure4.2.	Evaluation des critères dans PROMETHEE.....	60
Figure4.3.	Classement des équipements suivant la méthode PROMETHEE.....	61
Figure4.4.	Analyse GAIA plan.....	61
Figure4.5.	Classement PROMETHEE I.....	62
Figure4.6.	Classement PROMETHEE II.....	63
Figure4.7.	PROMETHEE Diamant.....	64
Figure4.8.	Réseau PROMETHEE.....	65
Figure4.9.	Arc-en-ciel PROMETHEE.....	66
Figure4.10.	Analyse de Sensibilité interactive : « Walking Weights.....	67
Figure4.11.	Intervalle de stabilité.....	68
Figure4.12.	Plan GAIA.....	69
Figure4.13.	GAIA Webs de E1.....	70
Figure4.14.	Profil action.....	71
Figure4.15.	Efficacité.....	72
Figure4.16.	Bank Adviser.....	72
Figure4.17.	Evaluation des critères dans PROMETHEE.....	75
Figure4.18.	Classement des équipements suivant la méthode PROMETHEE.....	76
Figure4.19.	Arc-en-ciel PROMETHEE.....	77
Figure4.20.	Analyse de sensibilité GAIA.....	78

Liste des tableaux

Tableau 2.1.	Critère de classification.....	18
Tableau 2. 2.	Catégorisation des équipements par criticité.....	19
Tableau 3.1	Tableau d'évaluation (tableau multicritère).....	34
Tableau 3.2.	Equation de normalisation des données (PROMETHEE II).....	49
Tableau 4.1.	Codification des 12 équipements considérés.....	59
Tableau 4.2.	Classement des équipements suivant la matrice de criticité.....	59
Tableau 4.3.	Données brutes.....	73

Liste des abréviations

MBF	:Maintenance Basée sur la Fiabilité.
RCM	:Reliability centred maintenance
MSG-3	:Maintenance Steering Group-3
NCQR	: National Council of Quality and Reliability
TPM	:Total Productive Maintenance
AMDEC	:Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité.
PMT	:Plan de Maintenance Technique
PME	:Petites et Moyennes Entreprises
PMO	:Plan de Maintenance Optimisé
GQ	:Gravité Qualité
GS	: Gravité Sécurité
GE	:Gravité Environnement
ND	:Non Détection
QSE	:Qualité, sécurité et environnement
ALARP	:As Low As Reasonably Practicable
ITQSE	:L'Indicateur du Taux Qualité, Sécurité et Environnement
AMCD	:L'aide Multi-Critère à la Décision
MCDA	:Multiple-Criteria Decision Analysis
ACP	:Analyse en Composantes Principales
ETE	:Effectif Total de l'Entité
PROMETHEE	:Preference Ranking Organisation METHods for Enrichement Evaluation
GAIA	:Graphical Analysis for Interactive Aid

Liste nomenclature

F	:Fréquence	1/mois
G	:Gravité de la défaillance	
K	:Coefficient de pondération des critères	
NPF	:Nombre de Produits Fabriqués	
NPNC	:Nombre de Produits Non Conformés	
AT	:Taux des accidents de travail	1/h
R1	:Le pourcentage de réduction des nuisances sonores	%
R2	: Le pourcentage de réduction en consommation d'eau potable	%
R3	:Le pourcentage de réduction en consommation d'électricité	%
R4	: Le pourcentage de réduction des déchets solides et liquides	%
R5	:Le pourcentage de réduction de la pollution de l'air	%

Introduction générale

Dans le monde industriel actuel, les équipements sujets à des pannes et/ou détériorations sont nombreux. Souvent critiques, ces équipements doivent être maintenus afin de continuer à remplir les missions pour lesquelles ils ont été conçus. La maintenance joue ainsi un rôle primordial permettant de garantir la disponibilité pour la production. Toutefois, cette fonction a souvent été négligée car trop fréquemment perçue comme une source de dépenses. Mais cet état d'esprit tend à changer avec l'évolution des équipements et des techniques de production. Qui plus est, les machines sont de plus en plus complexes et les industriels cherchent à les exploiter à leur plein régime dans un souci de compétitivité et de respect des délais tout en cherchant à garantir les exigences de qualité et de sécurité requises. Ces objectifs peuvent difficilement être atteints sans une maintenance adéquate.

Une politique de maintenance se définit par un ensemble d'actions exécutées et ordonnées selon une certaine stratégie. Le problème de hiérarchisation des équipements critiques est usuellement pris en charge, dans la fonction maintenance, par des méthodes telles que Pareto, matrice de criticité, etc. Dans le cadre de ce travail, nous développons la démarche d'agrégation multicritères, à l'aide de la méthode PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation), pour la classification des équipements critiques.

La structure de ce mémoire est composée des chapitres suivants :

Chapitre 1 – Concept de MBF

Chapitre 2 – Pareto – Matrice de criticité

Chapitre 3 – PROMETHEE

Chapitre 4 – Etudes de cas

Introduction

Pour étudier la démarche de la maintenance basée sur la fiabilité qui assure aujourd'hui une très grande sécurité technique, il est préférable de suivre l'évolution de la maintenance depuis les années 30 qui est peut-être retracée à travers trois générations.

La première génération, entre 1930 à 1945. À cette époque, l'industrie n'était pas très mécanisée, donc les temps d'arrêt n'avaient pas beaucoup d'importance. Dans le même temps, la plupart des équipements étaient simples et une grande partie était surdimensionnée, ce qui les rendait fiables et faciles à réparer. (John, 1997)

La deuxième génération, à partir de 1950. Les machines de tous types étaient plus nombreuses et plus complexes. Au fur et à mesure que cette dépendance augmentait, les temps d'arrêt sont devenus une priorité. Cela a conduit à l'idée que les pannes d'équipement pouvaient et devaient être évitées, ce qui a conduit à son tour au concept de maintenance préventive. En 1961 a été créé le National Council of Quality and Reliability (NCQR) en Angleterre. Sa mission est de promouvoir la qualité et la fiabilité dans l'Industrie. Le coût de la maintenance a également commencé à augmenter fortement par rapport aux autres coûts d'exploitation. Ce qui a conduit à la croissance des systèmes de planification et de contrôle de la maintenance, qui ont grandement contribué à la maîtrise de la maintenance et font désormais partie intégrante de la pratique de la maintenance. (John, 1997)

La troisième génération (1970-2000). En seulement trente ans, il est passé au sommet en tant que priorité de contrôle des coûts. Le coût de la maintenance proprement dite continue d'augmenter, en valeur absolue et en proportion des dépenses totales. Dans certaines industries, il s'agit désormais du deuxième élément le plus élevé, voire du plus élevé, des coûts d'exploitation. (John, 1997)

La MBF (Maintenance Basée sur la Fiabilité) ou RCM (Reliability Centred Maintenance) a été développée en 1973 dans le domaine militaire aux états unis, prend ses origines de la MSG-3. La norme MSG-3, décrivant la méthode de développement d'un programme de maintenance est appliquée aujourd'hui, par tous les constructeurs et les grandes compagnies aériennes. (Zwingelstein, 1996)

1. Généralités

1.1. Définitions

La MBF est un concept de structuration de la maintenance. Cette structuration repose essentiellement sur la hiérarchisation des équipements les plus critiques vis-à-vis des conséquences des défaillances. La MBF est basée en grande partie sur la connaissance précise du comportement normal et anormal des équipements. (Noureddine R, Rais M, Benamar A, Noureddine F, 2011)

1.2. Objectifs de la MBF

- Éviter l'apparition de défaillance dont les effets se répercutent en termes de coûts directs et indirects pour l'entreprise.
- Classer les défaillances soit comme défaillances fonctionnelles, soit comme défaillances potentielles.
- Définir et Justifier en conception les actions programmées à mettre en place.
- Redéfinir en exploitation les actions de maintenance programmée.
- Assurer et augmenter les performances de l'outil de production en matière de sûreté de fonctionnement.
- Déterminer les recommandations relatives aux enjeux technico-économiques (investissements, rénovation, procédure, justification).

L'application de cet outil provoque des effets positifs indirects :

Permet une meilleure connaissance du système sur le plan statique et dynamique.

- Permet de mieux appréhender l'environnement dans lequel le système évolue.
- Responsabilise le personnel.
- Assure une cohésion entre différentes entités de l'entreprise (production, maintenance, qualité, services économiques et direction) et amorce une nouvelle organisation dans un axe TPM.
- Agit sur la sécurité des biens et des personnes.
- Valide les modifications réalisées au fur et à mesure de la vie du produit ou du process. (Daniel R, Marc G, Denis M, Gaëtan B, 1996)

1.3. Outils de la MBF

Cette approche MBF utilise différents outils issus des méthodes telles que la matrice de criticité, les grilles d'analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC) et le logigramme de décision.

La matrice de criticité permet d'apprécier l'impact des défaillances des équipements sur des critères tels que la sécurité, la disponibilité, la qualité, La grille AMDEC définit l'importance relative des défaillances, de leurs causes et de leurs Effets. Le logigramme de décision sert, en fonction du type de défaillance. À identifier le type de conséquence sur les équipements et à définir le niveau des actions de maintenance à mettre en œuvre.

L'application de la MBF nécessite une bonne connaissance des équipements ainsi que de leurs défaillances, de même que l'impact de ces défaillances. C'est pourquoi l'implication de l'ensemble des opérateurs, techniciens et experts de l'entreprise est indispensable pour obtenir les résultats souhaités et souhaitables tant au niveau de la sûreté de fonctionnement, de la sécurité que des coûts globaux. (Daniel R, Marc G, Denis M, Gaëtan B, 1996)

2. Méthodologie de la MBF

2.1. Démarche de la MBF

La mise en œuvre d'une MBF est constituée de 4 étapes, comme illustrée en figure 1 (Noureddine R, Benamar A, Noureddine F, 2009) :

- **Etape 1** : Découpage géographique du site étudié en zones, ateliers ou lignes de production, puis en un découpage fonctionnel. Ceci permettra d'identifier les conséquences d'une défaillance du système sur la sécurité, le flux de production et la qualité, afin de sélectionner les équipements les plus critiques.
- **Etape 2** : Analyse des défaillances des différents équipements sélectionnés à l'étape précédente. Cette procédure repose essentiellement sur l'étude AMDEC. Cette étude permet l'examen systématique des causes et des effets des défaillances d'un système.
- **Etape 3** : Etablissement d'une fiche de décision des politiques et actions de maintenance à mettre en place sur les équipements étudiés à l'étape précédente. Si aucune action préventive ne peut être envisagée, face à une défaillance critique, une reprise en conception s'avère alors obligatoire. Pour les défaillances graves mais détectables, une maintenance conditionnelle voire, mieux, une maintenance prédictive

est recommandée. Dans une démarche proactive, il est intéressant de chercher à fiabiliser l'équipement a priori par action sur la cause de la défaillance, évitant ainsi l'apparition de son mode. Si ce n'est possible a priori, l'exploitation du retour d'expérience sera une alternative pour fiabiliser l'équipement et sera, bien sûr, menée en différé. Pour la majeure partie des autres défaillances, une maintenance systématique s'avère adéquate. Ces préconisations amènent à l'élaboration d'un Plan de Maintenance Technique (PMT) qui comprend tous les éléments nécessaires à une planification de la maintenance.

- **Etape 4** : Evaluation opérationnelle du PMT initial, basé sur l'information disponible au moment de l'analyse, est évalué en phase d'exploitation réelle des équipements. L'expérience peut alors être utilisée pour améliorer ce PMT, rendant ainsi ce dernier dynamique et évolutif. Le délai entre deux reprises du PMT est généralement de quelques mois. L'analyse du retour d'expérience se fait à partir de données enregistrées et est accompagnée de la définition et de la mise en place d'indicateurs de performances.

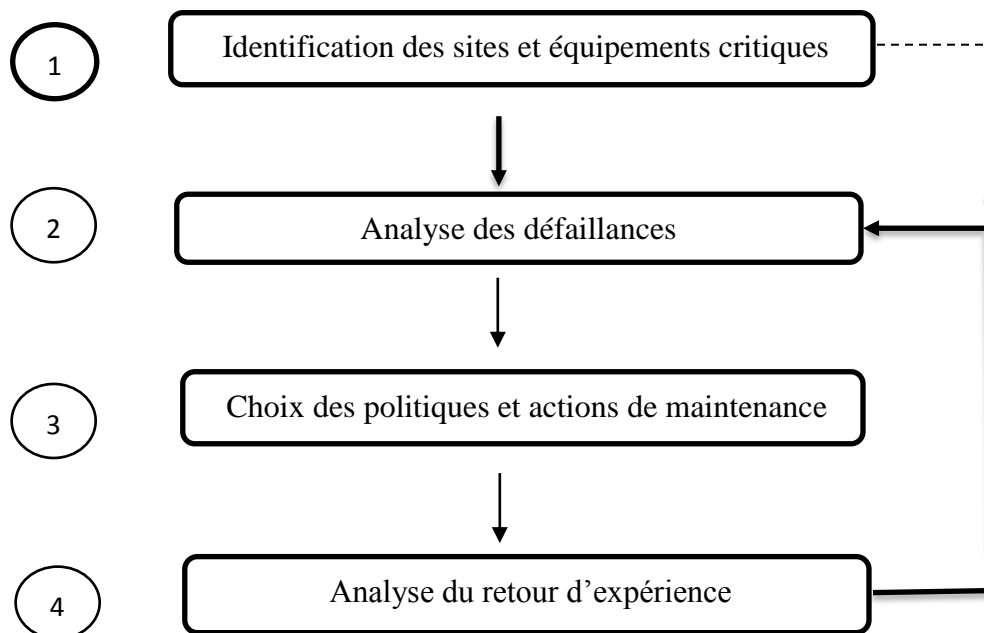


Figure 1. Etapes de la MBF (Noureddine R, Benamar A, Noureddine F, 2009)

La Maintenance Basée sur la Fiabilité apparaît au premier abord comme principalement destinée à élaborer un programme de maintenance préventive optimisé, ayant pour but la sûreté de fonctionnement et la sécurité des moyens de production, en tenant compte des aspects économiques.

Cependant, elle a un but beaucoup plus ambitieux. En effet, le second aspect de l'application de la MBF. Dans les entreprises, principalement dans les PME, réside dans son utilisation comme vecteur principal d'amélioration de l'organisation de la maintenance, ceci malgré le manque de ressources générales observées.

Un troisième aspect lie à la conservation des données de maintenance et de production (base de données pour le retour d'expérience) est également un objectif non négligeable de cette méthode. (Daniel R, Marc G, Denis M, Gaëtan B, 1996)

2.2 Classification des défaillances

La notion de défaillance est étudiée dans la norme X60_010 (AFN88). Celle-ci stipule que « c'est la cessation de l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise » ; toute défaillance qui se trouve sur un chemin critique ou sous critique de sécurité, de production ou de qualité devra faire l'objet d'une action de maintenance.

On classe les défaillances en fonction :

- Des causes (mauvais emploi, faiblesse inhérente, usure)
- De leur degré (partielle, complète, intermittente)
- De leur vitesse d'apparition (défaillance soudaine, défaillance progressive)
- De leur vitesse d'apparition et de leur degré (catalectique ou soudaine et complète, par dégradation).

On distingue les défaillances fonctionnelles et les défaillances potentielles. (Daniel R, Marc G, Denis M, Gaëtan B, 1996)

Défaillance fonctionnelle : est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble ou d'un matériel à accomplir sa ou ses fonctions requise(s) avec les performances définies dans les spécifications techniques. L'ensemble est indisponible suite à la défaillance. Une fois qu'une défaillance fonctionnelle particulière a été définie, une condition physique qui indique que la défaillance est imminente peut souvent être identifiée. Dans ces

circonstances, il devient possible de retirer l'élément en service avant le point de la défaillance potentielle. (Zwingelstein, 1996)

Défaillance potentielle : Le fait que les défaillances potentielles puissent être identifiées est un aspect important de la théorie de maintenance moderne, car cela permet l'utilisation maximale de chaque élément sans subir les conséquences d'une défaillance fonctionnelle.

Le principe d'une maintenance préventive efficace repose sur la détermination des symptômes non ambigus qui permettront la détermination de l'instant où l'on se trouve au point de défaillance potentielle comme le montre la figure 1. (Zwingelstein, 1996)

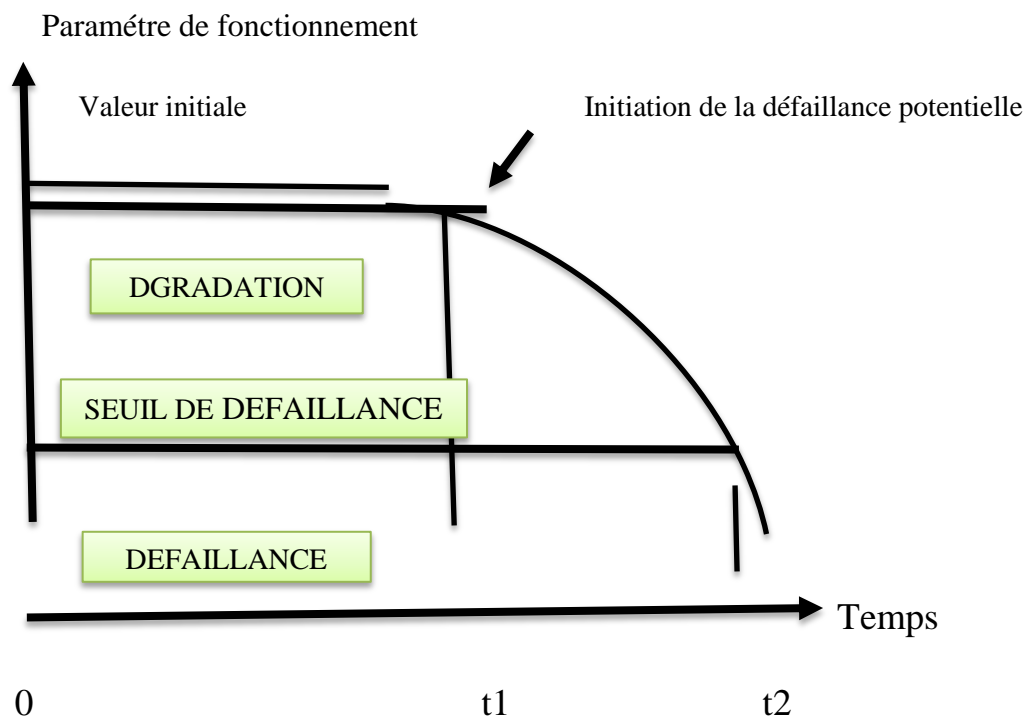


Figure 2. Défaillances fonctionnelles et potentielles (Zwingelstein, 1996)

3. Recherche des matériels critiques

L'objectif de recherche des matériels critiques est d'identifier les causes, les modes de défaillance des matériels les plus critiques qui devront faire l'objet de tâches prioritaires de maintenance préventive pour réduire leurs effets. Cette étape, très importante dans le développement d'une démarche de maintenance basée sur la Fiabilité (Zwingelstein, 1996), est la première étape dans la mise en oeuvre d'une MBF (Figure 1).

La recherche des matériels critiques d'une installation industrielle repose sur la détermination du cheminement et des conséquences de leurs modes de défaillance fonctionnelles sur les fonctions principales assurées par le processus ou l'équipement. Cette recherche des matériels critiques fait appel à des décompositions hiérarchiques ascendantes ou descendantes fonctionnelles, matérielles ou mixtes du procédé, en systèmes, sous systèmes et matériel.

3.1.Méthodes d'analyse de la criticité des équipement

Les méthodes les plus utilisés dans la classification des équipements critiques sont (Noureddine R, Rais M, Benamar A, Noureddine F, 2011):

- La méthode de Pareto
- La méthode de la matrice de criticité.

D'autres méthodes de la famille des méthodes d'analyse multicritère d'aide à la décision peuvent être utilisées aussi telle que la méthode PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) (Noureddine R, Noureddine M, 2012)

Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté les étapes essentielles pour la mise en œuvre de la Maintenance Basée sur la Fiabilité (MBF). La première étape importante est la classification des matériels critiques. Pour cela on a identifié les méthodes utilisées qu'on va étudier dans le chapitre suivant.

1 Méthode de Pareto

1.1 Introduction

La méthode de Pareto affirme qu'une minorité de causes, d'entrées ou d'efforts généralement conduisent à la majorité des résultats, sorties ou récompenses. Pris littéralement, cela signifie que, par exemple, 80% de ce que vous accomplissez dans votre travail provient de 20% du temps passé au travail. Ainsi, le principe 80/20 (La méthode de Pareto) stipule qu'il y a un déséquilibre intrinsèque entre les causes et les résultats, les intrants et les extrants, et l'effort et la récompense.

Une bonne référence pour ce déséquilibre est fournie par la relation 80/20. Un schéma typique montrera que 80% des extrants résultent de 20% des intrants, que 80% des conséquences découlent de 20% des causes, ou que 80% des résultats proviennent de 20% de l'effort. La figure 1 montre ces modèles typiques, (koch, 1998).

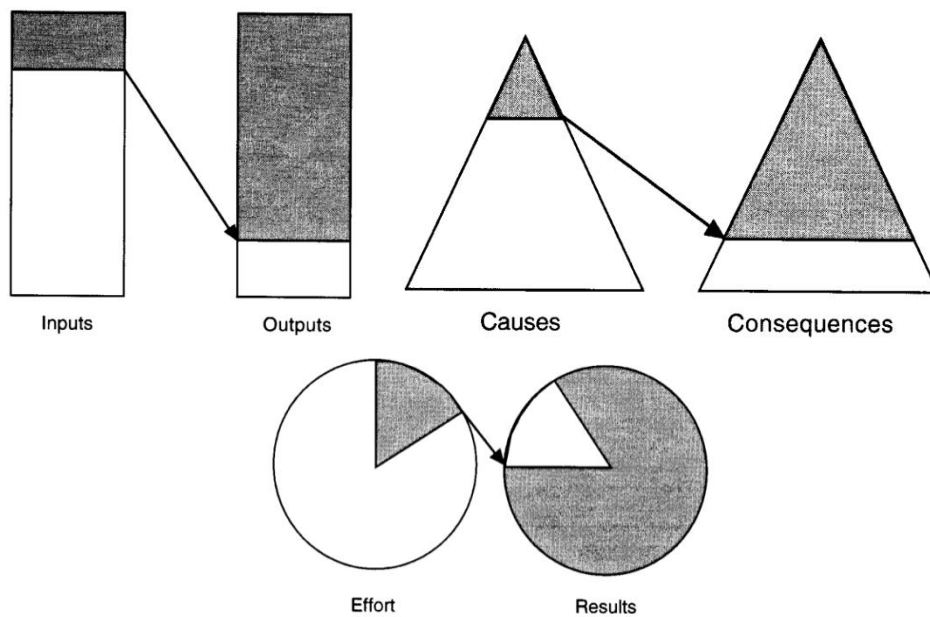


Figure 1. Le principe de 80/20 (koch, 1998)

Le principe de 80/20 a été découvert en 1897. Il y a exactement 123 ans, par l'économiste italien Vilfredo Pareto (1848–1923). Sa méthode a été appelée de plusieurs noms, comme le principe de Pareto, la loi de Pareto, la règle des 80/20, le principe du

moindre effort et le principe de déséquilibre. Le principe 80/20 a contribué à façonner le monde moderne, mais il est resté un secret.

Vilfredo Pareto était en train d'analyser des modèles de richesse et de revenu dans l'Angleterre du XIXe siècle. Il a trouvé que la plupart des revenus et de la richesse sont allés à une minorité des personnes de ses échantillons. Il a aussi découvert deux autres faits qu'il jugeait hautement significatifs, (koch, 1998).

L'une était qu'il y avait une relation mathématique cohérente entre la proportion de personnes (en tant que pourcentage de la population totale concernée) et le montant du revenu ou la richesse dont jouissait ce groupe. Pour simplifier, si 20% de la population apprécie 80% de la richesse, alors vous pouvez prédire de manière fiable que 10% aurait... disons, 65 % de la richesse, et 5 % avoir 50%, ce qui est important ici ce n'est pas les pourcentages, mais le fait que la répartition de la richesse dans l'ensemble de la population était prévisible déséquilibrée.

Le point clé n'est pas les pourcentages, mais le fait que la répartition de la richesse au sein de la population était, de manière prévisible et déséquilibrée.

L'autre découverte de Pareto, qui l'a vraiment excité, était que ce modèle du déséquilibre était répété systématiquement chaque fois qu'il regardait des données se référant à différentes périodes de temps ou différents pays, il a trouvé le même schéma se répétant, encore une fois, avec une précision mathématique. (koch, 1998)

1.2 Importance de la méthode de Pareto

La raison pour laquelle la méthode de Pareto est très importante c'est parce qu'elle est Contre-intuitive. Nous avons tendance à nous attendre à ce que toutes les causes aient même signification. Que tous les clients ont la même valeur. Que chaque entreprise, chaque produit et chaque machine est aussi bon que les autres. Et nous avons tendance à supposer que 50% des causes ou des intrants tiendront compte pour 50% des résultats ou produits. Il semble y avoir un naturel, l'attente selon laquelle les causes et les résultats sont généralement équilibrés et, bien sûr, parfois ils le sont. Mais cette «erreur 50/50» est l'une des plus inexactes et nuisibles.

Le principe 80/20 affirme que lorsque deux séries des données, relatives aux causes et aux résultats, peuvent être examinées et analysées, le résultat le plus probable est qu'il y aura un modèle de déséquilibre.

Le déséquilibre peut être 65/35, 70/30, 75/25, 80/20, 95/5 ou 99,9 / 0,1, ou tout ensemble de nombres entre les deux. Cependant, les deux nombres de la comparaison ne doivent pas nécessairement totaliser 100.

Le principe 80/20 affirme également que lorsque nous connaissons la vraie relation, nous devons être surpris de son déséquilibre. Quel que soit le niveau réel de déséquilibre, il est susceptible de dépasser notre estimation antérieure. Les dirigeants peuvent soupçonner que certains clients et certains produits sont plus rentables que d'autres, mais lorsque l'ampleur de la différence est prouvée, ils seront probablement surpris et parfois abasourdis. (Koch, 1998)

1.3 Equation de Pareto

Dans son cours d'Économie Politique 1897, Pareto base ses démonstrations à partir d'une définition simplifiée des variations de l'inégalité dans la distribution. En effet, il dit que "la diminution de cette inégalité sera définie par le fait que le nombre des pauvres va en diminuant par rapport au nombre de riches ou ce qui est la même chose par rapport au nombre total des membres de la société". Pour les besoins de la démonstration appelons "pauvres" tous ceux qui ont un revenu inférieur à un seuil de revenu x donné, et "riches" tous ceux qui ne sont pas dans cette catégorie. Étant donné ces définitions, l'exposé de la loi de Pareto permet de caractériser le sens de variation de l'inégalité.

La démonstration de la loi de Pareto dépend du domaine de son utilisation, donc il existe plusieurs formes même dans le domaine de fiabilité. On a choisi cette forme pour sa simplicité, (Thiombiano, Décembre 1999).

Soit X une variable de paramètres α et x_0 . On dit que X suit une loi de Pareto notée $L_p(\alpha, x_0)$ si la variable statistique X présente la fonction de répartition ayant les caractéristiques suivantes (Thiombiano, Décembre 1999) :

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x < x_0 \\ 1 - \left(\frac{x_0}{x}\right)^\alpha, & x \geq x_0 \end{cases} \quad (1)$$

Où $F(x)$ représente la proportion de personnes ayant un revenu inférieur à x . C'est une variable continue si α et x_0 sont positifs. Il en résulte par ailleurs la fonction complémentaire de répartition suivante (Thiombiano, Décembre 1999) :

$$\bar{F}(x) = (x_0/x) = 1 - F(x) \quad \forall x \geq x_0 \quad (2)$$

Cette fonction désigne la proportion de personnes qui ont un revenu supérieur à x . Par ailleurs x_0 est le revenu le plus faible de la société. (Thiombiano, Décembre 1999).

Il apparaît dans l'équation (2) que la fraction de "riches" $\bar{F}(x)$ est une fonction décroissante de α (quand x_0 et x sont fixés), la proportion de riches baisse lorsque α croît et la proportion de "pauvres" augmente d'autant. Ceci permet à Pareto de tirer sa conclusion que "l'inégalité des revenus augmente ou diminue avec α " (Thiombiano, Décembre 1999).

L'auteur tire une proposition de cette conclusion : "Une augmentation du revenu minimum et/ou une diminution de l'inégalité des revenus, ne peuvent se produire, soit isolément, soit cumulativement, que si le total des revenus croît plus vite que la population".

Cette proposition n'est pas démontrée par Pareto. Cependant elle peut être démontrée en tirant l'expression de l'espérance du revenu à partir de la loi de Pareto (Thiombiano, Décembre 1999).

La dérivation de l'espérance mathématique de x suppose d'abord celle de la fonction $f(x)$ de densité de probabilité correspondant à la loi :

$$f(x) = \frac{\alpha}{x_0} \left(\frac{x_0}{x}\right)^{\alpha+1} \quad \text{Pour } x \geq x_0 \quad (3)$$

L'espérance $E(X) = m_1$ s'obtient ainsi :

$$E(X) = m_1 = \int_0^{\infty} \frac{\alpha}{x_0} \left(\frac{x_0}{x}\right)^{\alpha+1} x dx = \frac{\alpha x_0}{\alpha - 1} \quad (4)$$

Le revenu moyen m_1 n'existe que si $\alpha > 1$.

En effet, m_1 est fonction à la fois de x_0 et α . Aussi $m_1 = m_1(x_0, \alpha)$ tel que donné par (4). Si les valeurs des paramètres s'accroissent avec Δx et $\Delta \alpha$ respectivement, alors m_1 s'accroît d'un certain montant Δm_1 . Approximativement, il peut être écrit (Thiombiano, Décembre 1999) :

$$\Delta m_1 = \frac{\partial m_1}{\partial x_0} \Delta x_0 + \frac{\partial m_1}{\partial \alpha} \Delta \alpha = \frac{\alpha}{\alpha - 1} \Delta x_0 - \frac{x_0}{(1 - \alpha)^2} \Delta \alpha \quad (5)$$

La conclusion de Pareto est que de façon générale "l'augmentation des richesses par rapport à la population produit soit l'augmentation du revenu minimum, soit la diminution de l'inégalité des revenus, soit les deux effets simultanément" (Thiombiano, Décembre 1999).

1.4 Méthode de Pareto dans la maintenance industrielle

Le diagramme de **Pareto** permet d'avoir une vision rapide de la contribution d'une catégorie d'éléments par rapport à d'autres. En maintenance, on pourrait par exemple l'utiliser pour visualiser l'importance relative des éléments suivants:

- Nombre de défaillances par équipement.
- Nombre de types de défaillances par équipement.
- Quantités cumulées d'indisponibilité par équipement.
- Quantités cumulées d'indisponibilité par type de défaillance.

Le "*diagramme de distribution*" contient les cumuls de chaque élément de la catégorie classés par ordre croissant. Le "*diagramme de répartition*" ou cumulatif s'obtient de la même façon, mais en traçant la courbe de la somme des critères que l'on a choisi (P.Jung, P.Paradinas, J.Jouhaneau, F-Y.Villemin, D.Hajage, O.Beaujard).

1.5 Mise en application de la loi de Pareto à la maintenance

La loi de Pareto suppose obligatoirement que l'on est un historique de pannes, et la définition de l'objectif de l'étude et de ces limites, les éléments étudiés peuvent être des matériels, des causes de pannes, des natures de pannes etc.

L'élaboration du diagramme de Pareto se fait en suivant les étapes suivantes :

- L'historique de pannes.
- Quantification de l'importance du critère à étudier.
- Totale de la somme et détermination du pourcentage de chacun par rapport à ce total.
- Classement des pourcentages par valeur décroissantes.
- Représentation graphique. (N.Yousfi, R.Medjoudj, F.Iberraken, 2013/2014)

2 Méthode de la matrice de criticité

2.1 Introduction

Depuis une trentaine d'années, la succession d'accidents significatifs en termes de dommages matériels et humains, majoritairement liés à l'expansion de l'activité industrielle, vient mettre en lumière la question primordiale de la sécurité.

En 1966, à Feyzin, 18 personnes ont trouvé la mort suite au BLEVE de plusieurs sphères de stockage. Par la suite, les accidents de Flixborough (Grande-Bretagne) en 1974, Seveso (Italie) en 1976, AZF (Toulouse) en 2001 ou plus récemment Buncefield (Grande Bretagne) en 2005 sont tous des accidents qui rappellent si besoin la nécessité de disposer de méthodes et d'outils performants pour estimer les risques.

Dans le domaine du risque industriel, la quantification des risques constitue une étape incontournable. Elle permet, au regard de la probabilité et de la gravité d'un accident, de juger de la suffisance ou non des mesures de prévention dont l'objectif est de prévenir l'apparition d'accident, et des mesures de mitigation/protection dont le but est de limiter les effets en cas d'accident. Or, afin de se prononcer sur l'acceptabilité d'un risque, il faut pouvoir le mesurer en le comparant à une échelle. (Dab W, Dal J. P, Pont F, Fontaine D, Gaston J. L, Gustin O, Iddir A, Laurent Y, Mortureu X.)

2.2 Définition de la matrice de criticité

La matrice de criticité permet de juger de l'acceptabilité d'un risque par intervention d'un ensemble de couples de valeurs de probabilité/gravité (P/G) au-delà desquels le risque passe du domaine de l'acceptable à celui de l'inacceptable.

Cette matrice peut être mise en place soit dans le cadre d'un projet dont les risques doivent être évalués, soit dans le cadre d'une analyse des risques actuels d'une entreprise en vue de les maîtriser.

Il est à noter que le nombre de niveaux de probabilité et de gravité, constituant une matrice de criticité, n'a rien d'universel. Néanmoins les matrices de criticité, dites 5×5 , c'est-à-dire composées de 5 niveaux de probabilité et de 5 niveaux de gravité, sont couramment utilisées.

La matrice de criticité comporte trois zones de risque :

- « Acceptable » : dans cette zone, les accidents présentent une probabilité suffisamment faible au regard de la gravité des conséquences associées ;
- « ALARP » (As Low As Reasonably Practicable) (Acceptable sous contrôle) : dans cette zone, l'ensemble des mesures envisageables a été mis en place et il n'est plus possible, avec un coût économique raisonnable, de diminuer ni la probabilité, ni la gravité.
- « Inacceptable » : dans cette zone, il est nécessaire de mettre en place des actions qui visent à réduire la gravité et/ou la probabilité, en définissant de nouvelles mesures de prévention et/ou de mitigation, afin de ramener si possible le risque dans la zone acceptable, ou a minima dans la zone ALARP.

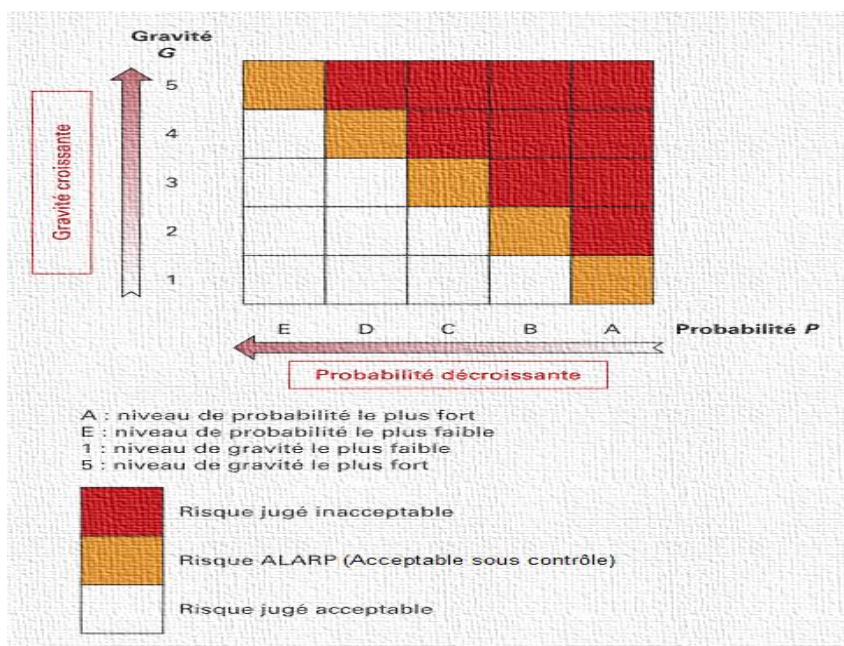


Figure 2. Exemple de matrice de criticité 5x5 (Dab W, Dal J. P, Pont F, Fontaine D, Gaston J. L, Gustin O, Iddir A, Laurent Y, Mortureu X.)

La notion d'acceptabilité d'un risque peut sembler subjective, surtout lorsque la vie d'individus est en jeu. En effet, la distinction entre les différentes zones de risque n'est pas aisée et dépend essentiellement des définitions données aux différents niveaux de probabilité et de gravité qui constituent la matrice de criticité. (Dab W, Dal J. P, Pont F, Fontaine D, Gaston J. L, Gustin O, Iddir A, Laurent Y, Mortureu X.)

2.3 But de la matrice de criticité

Le calcul de la criticité a pour objectif d'hierarchiser les processus et les équipements de production les plus pénalisants en termes de qualité, de sécurité et

d’environnement, production, fiabilité, coûts, Utilisation, etc. Une telle hiérarchisation permet de cibler les actions à entreprendre et d’optimiser les ressources de l’entreprise (financières, humaines, matérielles...).

En effet, la matrice de criticité proposée a une importance double: Elle permet, d’une part, de tenir compte des orientations stratégiques de l’entreprise en termes de qualité, sécurité et environnement et, d’autre part, de hiérarchiser les processus et les équipements ayant une influence sur ces systèmes. (Dakkak B, Chater Y, Talbi A, 2012)

Sécurité			1	2	3	4
Accidents	P		≥1/mois	≥1/3mois <1/mois	≥1/6mois <1/3mois	<1/6mois
	G		Grave	Moyen	faible	négligeable
Environnement			1	2	3	4
Rejets atmosphérique ou d’effluents liquide	P		Fréquent	Probable	Lointain	Improbable
	G		Grave	Moyen	faible	négligeable

Tableau 1. Critère de classification (Noureddine R., Rais M., Benamar A., Noureddine F, 2011)

		S	E	P	F	Co	U	Cr	Catégorie
Eq 01	P	1	2	2	1	1	1	12	A
	G	1	1	1	1	1	3		
	C	1	2	2	1	1	3		
Eq								16	B
...								32	
...								64	B
...								86	
	...							120	C
			...					156	
				...				224	D
					...			500	
						...		600	E
							...	750	

Tableau 2. Catégorisation des équipements par criticité (Noureddine R., Rais M., Benamar A., Noureddine F, 2011)

Eq : Equipement, S : Sécurité, P : Production, F : Fiabilité, Co : Coûts,

E : Environnement, U : Utilisation, C : Criticité par critère, Cr : Criticité de l’équipement.

3 Méthodes de cotation - détermination des paramètres G, F, N D

3.1 G / Gravité de la défaillance

Il s'agit ici de rechercher la hiérarchisation de la gravité des effets, en répondant à la question : « Quelle est la gravité relative de cet effet ? »

La formulation est simple, mais l'application s'avère plus délicate. Si on a attribué une cotation de 10 à 1, à chaque effet listé :

- 10, si l'effet porte sur de la sécurité en interne, comme pour le client utilisateur final. Le 10 est réservé à une préoccupation liée à la sécurité, si aucune préoccupation de sécurité n'est identifiée, alors la cotation de gravité commencera à 9 ! Le 9 lui-même pouvant être réservé par convention à l'intérieur du groupe, à un non-respect potentiel de réglementation en vigueur, mais sans impact sur la sécurité, bien sûr.

- 1, si l'effet est sans aucune gravité, l'échelle démarre à 1, le zéro n'existe pas dans ces échelles.

Il s'agit de fixer l'ordre relatif des priorités, en commençant par le critère de gravité des effets. (O.Boutou, G.Landy, B.Saintvoirin, 2007)

3.2 F/ Fréquence d'apparition d'une défaillance

La probabilité d'apparition du mode de défaillance, estimée en répondant à la question : « Quelle est la probabilité relative d'apparition de ce mode de défaillance ? ».

Si on attribue une cotation de 10 à 1, à chaque mode de défaillance listé :

- 10, si le mode de défaillance se produit de manière certaine ;

- 1, si le mode de défaillance n'a aucun risque de se produire, le zéro n'existe pas dans ces échelles. (O.Boutou, G.Landy, B.Saintvoirin, 2007)

3.3 ND/ Probabilité de Non Détection de la défaillance

La non-détection est la probabilité de ne pas détecter le mode de défaillance, avant que celui-ci ne quitte son lieu de production, en répondant à la question :

« Si le mode de défaillance se produit, quelle est l'efficacité relative des moyens de détection dans le plan de surveillance actuel ou envisagé ? »

Il faut coter, ici, l'efficacité du plan de surveillance ou du plan de contrôle, qu'il soit actuel ou envisagé. Si le travail se fait par échantillonnage, il faut écrire les fréquences de prélèvements, les quantités de pièces prélevées et les modalités de prélèvements, sinon on ne peut pas juger de l'efficacité des contrôles.

Si on attribue une cotation de 10 à 1 :

– 10 s'il n'existe aucun moyen de détecter le problème (ce point n'est pas contrôlé, ou pas contrôlable, par exemple : la présence d'une pièce à l'intérieur d'un sous-ensemble après assemblage...);

– 1 si la détection est certaine, un contrôle automatique à l'opération, le zéro n'existe pas dans ces échelles. (O.Boutou, G.Landy, B.Saintvoirin, 2007)

3.4 K/ Coefficient de pondération des critères

Pour tenir compte de l'importance de chacun des critères : qualité, sécurité, environnement, ... sur les performances, les objectifs et les orientations d'une entreprise, il est primordial d'introduire un coefficient de pondération K pour chaque critère dans le calcul de la criticité. Pour ce faire, on choisit une valeur de K comprise entre 0 et 1 suivant le niveau de prise en compte des critères dans les activités par rapports aux objectifs stratégiques fixés.

Avec:

- La gravité qualité (GQ): elle traduit l'impact d'un équipement ou d'un processus sur la qualité des produits et/ou services;
- La gravité sécurité (GS): elle traduit l'impact d'un équipement ou d'un processus sur la sécurité des biens et/ou des personnes;
- La gravité environnement (GE): elle traduit l'impact d'un équipement ou d'un processus sur l'environnement;
- La fréquence (F): elle traduit la fréquence d'apparition d'un symptôme influant les critères Q, S, E;
- L'indice de non détection (ND): Cet indice donne la probabilité de ne pas détecter l'influence d'un équipement ou d'un processus sur les systèmes QSE à cause des facteurs endogènes dont la détection n'est pas évidente.

La formule de la criticité C de chaque équipement ou processus est définie comme suit:

$$C = \sum_{i=1}^3 (K_i \times G_i \times F_i \times ND_i) \quad (6)$$

Avec:

K_i : représente le coefficient de pondération des systèmes Q, S, E respectivement pour i = 1, 2, 3;

G_i : représente les gravités Q, S, E respectivement pour i = 1, 2, 3;

F_i : représente les fréquences d'apparition d'un symptôme influant la qualité, la sécurité et l'environnement respectivement pour i = 1, 2, 3.

NDi : représente la non détection d'un symptôme influant la qualité, la sécurité et l'environnement respectivement pour $i = 1, 2, 3$. (Dakkak B, Chater Y, Talbi A, 2012)

Par conséquent, après avoir calculé la criticité, il est vital de proposer des actions d'amélioration pour les processus et les équipements ayant une criticité élevée. L'objectif étant de minimiser cette criticité à des niveaux admissibles.

De plus, l'indicateur du taux QSE (ITQSE), qui représente le rapport entre les résultats des actions préconisées et l'objectif attendu, permet d'évaluer la pertinence du plan d'actions.

$$ITQSE = \frac{\sum_{i=1}^3 A_{ri} + K_i}{\sum_{i=1}^3 A_{pi} + K_i} \quad (7)$$

Avec:

Ari: Taux réel de qualité, sécurité, environnement respectivement pour $i = 1, 2, 3$.

Api: Taux prévisionnel de qualité, sécurité, environnement respectivement pour $i = 1, 2, 3$.

Ki: Coefficient de pondération des systèmes qualité, sécurité, environnement respectivement pour $i = 1, 2, 3$. (Dakkak B, Chater Y, Talbi A, 2012)

En effet, sur un horizon de temps donné, les taux réels sont calculés comme suit :

3.5 Taux de qualité

Le taux qualité représente les pertes dues à une mauvaise fabrication :

$$Taux\ quaité = \frac{NPF - NPNC}{NPF} \quad (8)$$

Avec:

NPF: Nombre de Produits Fabriqués;

NPNC: Nombre de Produits Non Conformés. (Dakkak B, Chater Y, Talbi A, 2012)

3.6 Taux de sécurité

Le taux de sécurité représente le taux des accidents de travail (AT) et des maladies professionnelles (MP)

$$\text{Taux sécurité} = \frac{ETE - \text{nbre}(AT \text{ et } MP)}{ETE} \quad (9)$$

Avec:

ETE: Effectif Total de l'Entité. (Dakkak B, Chater Y, Talbi A, 2012)

3.7 Taux d'environnement

Le taux d'environnement est calculé comme suit:

$$\text{Taux environnement} = \frac{R1 + R2 + R3 + R4 + R5}{5} \quad (10)$$

Avec:

R1: le pourcentage de réduction des nuisances sonores,

R2: le pourcentage de réduction en consommation d'eau potable,

R3: le pourcentage de réduction en consommation d'électricité,

R4: le pourcentage de réduction des déchets solides et liquides,

R5: le pourcentage de réduction de la pollution de l'air. (Dakkak B, Chater Y, Talbi A, 2012)

Ces indicateurs constituent un tableau de bord et un moyen efficace pour gérer, piloter et atteindre les objectifs de l'entreprise en termes de QSE (Dakkak B, Chater Y, Talbi A, 2012).

Conclusion

L'étude menée dans ce chapitre nous a permis de présenter et de mieux maîtriser les méthodes les plus utilisées pour la hiérarchisation des équipements dans le domaine de la maintenance : la méthode de Pareto et la méthode de la matrice de criticité.

Introduction

La méthode PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation) appartient à la famille des méthodes de surclassement multicritères pour l'aide à la décision. Elle est basée sur la modélisation des comparaisons par paires des actions (décisions, alternatives...). Le modèle de comparaison par paires de PROMETHEE nécessite qu'une fonction de préférence soit associée à chaque critère. Le but de la fonction de préférence est de traduire la différence observée entre deux actions sur un critère donné, de l'échelle du critère à un degré de préférence normalisé de 0 à 1, (Mareschal, 2018). La méthode PROMETHEE se distingue en PROMETHEE I (classement partiel) et PROMETHEE II (classement complet).

Elles ont été développées et présentées pour la première fois en 1982. Quelques années plus tard, a été développé PROMETHEE III (classement basé sur des intervalles) et PROMETHEE IV (cas continu). Ensuite est venu en 1988 le module visuel interactif GAIA qui fournit une représentation graphique soutenant la méthodologie PROMETHEE. En 1992 et 1994, sont apparues deux extensions : PROMETHEE V (MCDA incluant les contraintes de segmentation) et PROMETHEE VI (représentation du cerveau humain). Un nombre considérable d'applications réussies a été traité par la méthodologie PROMETHEE dans divers domaines tels que la banque, la localisation industrielle, la hiérarchisation en maintenance, la planification de la main-d'œuvre, les ressources en eau, les investissements, la médecine, la chimie, les soins de santé, le tourisme, l'éthique en salle d'opération, la gestion dynamique, ... Le succès de la méthodologie est essentiellement dû à ses propriétés mathématiques et à sa convivialité particulière d'utilisation. (Brans J, Mareschal b, 2014)

1. L'aide multicritère à la décision (AMCD)

1.1. Définition

Philippe Vincke a défini l'aide multicritère ainsi : "L'aide multicritère à la décision vise, comme son nom l'indique, à fournir à un décideur des outils lui permettant de progresser dans la résolution du problème de décision à plusieurs points de vue, souvent contradictoires, doivent être pris en compte."

Pour *Bouyssou*, l'argument réaliste selon lequel la réalité étant multidimensionnelle, il est naturel que l'on prenne en compte plusieurs points de vue pour aider à la décision et donc qu'on utilise des méthodes multicritères, ne peut à lui seul justifier d'adopter une démarche

multicritère pour aider à la décision. Utiliser un tel argument conduirait à voir le monocritère comme un cas limite et dégénéré du multicritère. (Taibi, 2009)

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

- Plusieurs critères quantitatifs et qualitatifs sont pris en considération.
- Ces critères sont souvent hétérogènes.
- Ces critères sont généralement conflictuels.
- Ces critères sont généralement considérés d'inégale importance. (Taibi, 2009)

1.2. Etapes du processus d'AMCD

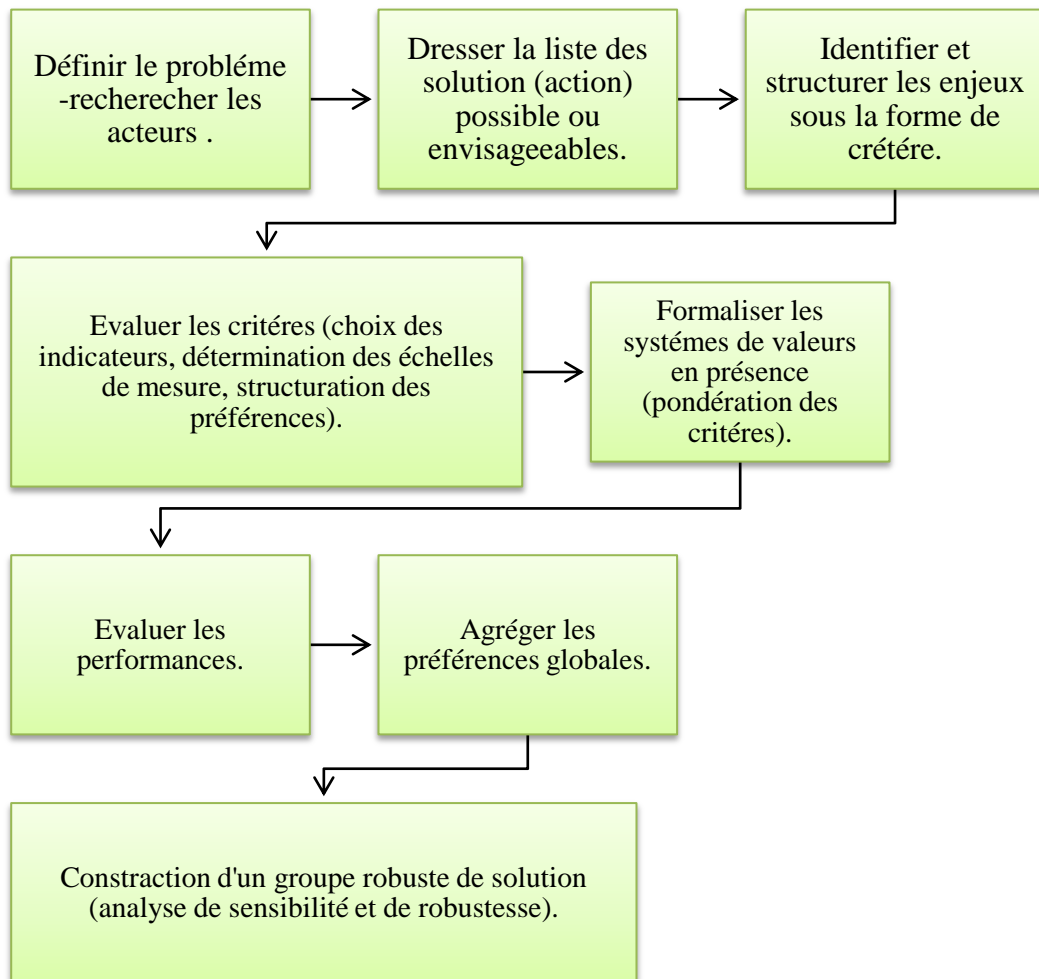


Figure 1. *Etapes du processus d'AMCD.*

Remarque

Cette séquence n'est pas nécessairement linéaire puisque plusieurs méthodes permettent des retours en arrière. Le rôle de ou des analystes est important du point de vue de l'aide à la décision lors de ces rétroactions. Les analystes interagissent alors de ces rétroactions. Les analystes interagissent alors avec le décideur ou les parties prenantes. (Waaub, 2012)

1.2.1. Définir le problème

- Rechercher les acteurs

Les controverses environnementales sont polycentrées, c-à-d multiples et complexes.

Chaque partie construit en interaction avec les autres un univers de pertinence, c-à-d :

L'ensemble de ce qui est en cause dans une controverse en cours, un univers se compose d'une variété d'entités, personnes, institutions, organismes vivants, objets, processus, énoncé de politiques, valeurs, etc. (Waaub, 2012)

1.2.2. Dresser la liste des actions :

- Problématique décisionnelle

1. Soit à déterminer un sous-ensemble d'actions considérées comme les meilleures parmi l'ensemble des solutions réalisables, le problème est alors un problème de **choix**.

2. L'ensemble des solutions réalisables en sous-ensembles suivant des normes préétablies, le problème en est un **tri**.

3. Soit le cas où le décideur a seulement à décrire les actions de l'ensemble des actions et leurs conséquences.

4. Soit ranger les actions de l'ensemble de la meilleure à la moins bonne, le problème est alors un problème de **rangement**. (Waaub, 2012)

1.2.3. Critères

Opération qui consiste à :

- Rechercher le nuage des conséquences de chaque action potentielle.

- Décomposer ces nuage en conséquence élémentaires, c-à-d de démêler l'écheveau verbal pour en faire une suite d'éléments simples.
- **Exhaustivité** : il ne faut pas oublier de critères.
- **Cohérence** : cohérence entre les préférences globales.
- **Non-redondance** : il ne faut pas de critères qui se dupliquent, donc plus nombreux que nécessaire. (Waaub, 2012)

1.2.4. Evaluation des critères

- **Choix des indicateurs**
 - Diverses unités de mesure (% , \$, kg , m³).
 - Diverses échelles de mesure :
 - Cardinale (+, -, xi).
 - Ordinale (plus petit) (plus grand) (=).
 - **Structure des préférences**

Consiste à déterminer des seuils d'indifférence, de préférence stricte et des zones de préférences faibles.

- **Zone d'indifférence** où la différence entre deux actions est petite et le décideur n'en préfère aucune.
- **Zone de différence faible**, qui marque une hésitation entre l'indifférence et la préférence stricte d'une action envers une autre.
- **Zone de préférence stricte** où une action est nettement préférée par rapport à une autre en fonction de leurs évaluations respectives. (Waaub, 2012)

1.2.5. Formation des systèmes de valeur

- **Pondération des critères** :
 - Certaines méthodes proposent une pondération des critères. Chaque critère se voit alors attribuer un poids faisant ressortir son importance relative.
 - Cette information affecte directement l'agrégation des préférences.

1.2.6. Évaluation des performances

- À la phase d'évaluation, chaque action est jugée selon chaque critère.
- L'ensemble des évaluations peut être présenté par un tableau à double entrée, appelé matrice ou tableau des performances.

- Une fois que la matrice est remplie, les spécialistes en aide à la décision appliquent l'approche opérationnelle avec l'outil d'analyse multicritère.

1.2.7. Agrégation des préférences

- Consiste en "une opération permettant d'obtenir des informations sur la préférence globale entre les actions potentielles, à partir d'information sur les préférences par critère"
- C'est ici que les données des évaluations des scénarios, des seuils des critères et des poids des critères sont intégrées au logiciel d'analyse multicritère et traitées.
- Cette étape permet donc d'agréger et de modéliser les préférences globales en tenant compte des convergences et des divergences exprimées par les acteurs dans le processus décisionnel, tout en respectant les possibilités d'incomparabilité, d'indifférence et de préférence d'une action par rapport à l'autre.
- Le résultat est un rangement des scénarios pour chaque acteur, selon ses préférences. (Waaub, 2012)

Il y'a deux approches d'agrégation :

- Agrégation complète des résultats (critère unique de synthèse).
- Agrégation partielle des résultats (surclassement de synthèse).
- **Agrégation des préférences(méthodes) critère unique de synthèse :**
- Identifiée à l'approche américaine basée sur l'éthique utilitariste.
- Application du principe de la majorité : dans la résolution des problèmes sociaux on cherche à choisir la solution qui présente le maximum d'avantages pour le plus grand nombre.
- **Critère unique de synthèse(lacunes) :**
- Postulat de la comparabilité des critères.
- Utilisation d'un indice moyen qui ne tient pas compte des impacts négatifs majeurs.
- Application du principe de la majorité qui ne tient pas compte des éléments de convergence et des éléments de divergence. (Waaub, 2012)
- **Surclassement de synthèse :**

Une relation de surclassement :

- Une action a_i est au moins aussi bonne qu'une autre a_{k_0} selon la plupart des critères ; et il n'existe pas de critère selon lequel a_i est beaucoup plus mauvaise a_{k_0} .

1.2.8. Construction d'un groupe robuste de solutions

- Analyse de sensibilité.
- Analyse de robustesse.
- **Analyse de sensibilité**

L'analyse de sensibilité est définie comme une analyse consistant à répéter l'analyse multicritère originale, en faisant varier les valeurs attribuées à l'origine aux différents paramètres de la méthode ; valeurs qui sont souvent empreintes d'un certain arbitraire ou d'incertitudes.

- Elle vise à définir les paramètres qui conditionnent le plus étroitement la solution choisie, c'est-à-dire où il suffit d'une faible modification pour changer la solution proposée. (Waaub, 2012)

1.3. Démarche multicritère

Il existe différentes démarches pour faire face à la situation de décision multicritère. Chacune met l'accent sur certains aspects aux dépens d'autres et, par conséquent, chacune a ses avantages et ses inconvénients.

Roy se base sur une approche de "bas vers le haut" (bottom-up) qui consiste à identifier toutes les conséquences pouvant résulter de la mise en œuvre des actions.

Keeney se base sur l'approche du "haut vers le bas" (top-down) qui consiste à construire une structure hiérarchique ayant à son premier niveau l'objectif global qui est éclaté en sous-objectifs jusqu'à ce que l'on atteigne un niveau mesurable que l'on qualifie d'attributs.

Laaribi a proposé une approche intermédiaire qui, selon lui, est de portée générale. Il décrit son approche comme suit :

Partant d'une situation de décision quelconque (perception d'un problème de décision), il y a lieu de tenter de dégager au départ les objectifs qu'on cherche à atteindre. En tenant compte de ces objectifs, un faisceau de points de vue pourrait se dégager, exprimant en quelque sorte des classes de critères. Aussi, les objectifs permettraient de définir des actions (globales) ou des scénarios (ensemble d'actions fragmentées), tandis que la famille de points de vue se traduit généralement en un ensemble de critères qui permettent de procéder à une évaluation des actions ou des scénarios. Une fois l'évaluation effectuée, on

procédera à l'investigation par une procédure d'agrégation multicritère appropriée afin de parvenir à une recommandation. (Taïbi, 2009)

1.4. Différentes démarches d'analyse multicritère

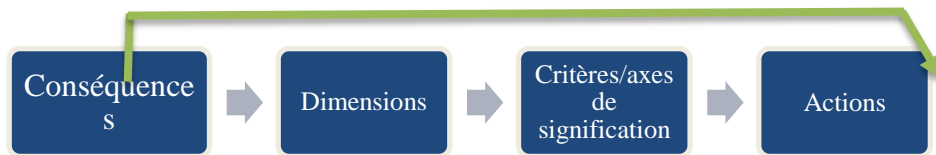


Figure 2 : démarche top-down de Kenney (Taïbi, 2009)



Figure 3 : démarche bottom-up de Roy (Taïbi, 2009)

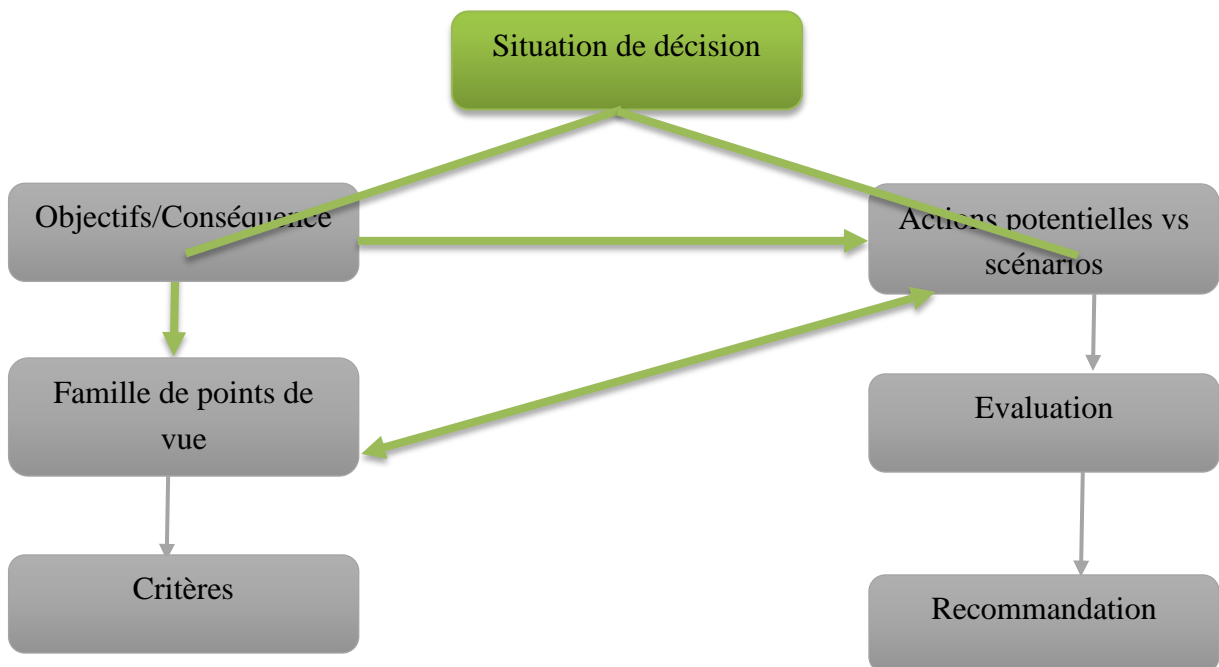


Figure 4 : Démarche intermédiaire de Laaribi. (Taïbi, 2009)

1.5. Modèle multicritère

Optimisation $\{ f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x) / x \in A \}$

A est un ensemble fini de n actions potentielles.

- $f_j(\dots)$, $j=1, \dots, k$ sont k critères qui sont des applications de A sur l'ensemble des nombres réels.
- **Mathématiquement mal posé :**
 - Pas de solution optimale.
 - Pas de sens mathématiques. (Mareschal, 2019)
- **Socio-Economiquement bien posé :**
 - Plus proche du problème de décision réel.
 - Recherche d'une solution de compromis. (Mareschal, 2019)
 - Les données relatives à un tel problème peuvent être représentées dans un tableau ($n \times k$) de dimension.

Actions/critères	$f_1(x)$	$f_2(x)$	...	$f_j(x)$	...	$f_k(x)$
a_1	$f_1(a_1)$	$f_2(a_1)$	...	$f_j(a_1)$	...	$f_k(a_1)$
a_2	$f_1(a_2)$	$f_2(a_2)$	...	$f_j(a_2)$	...	$f_k(a_2)$
...
a_i	$f_1(a_i)$	$f_2(a_i)$	...	$f_j(a_i)$	...	$f_k(a_i)$
...
a_n	$f_1(a_n)$	$f_2(a_n)$	...	$f_j(a_j)$	...	$f_k(a_j)$

Tableau 1. Tableau d'évaluation (tableau multicritère) (Taibi, 2009)

- Définition des actions

Soit A l'ensemble des actions, qui peut être :

- défini en **extension** : par énumération de ses éléments.

➔ petit nombre d'actions.

– défini en **compréhension** : par des contraintes. (Cf. programmation linéaire)

→ grand nombre ou infinité d'actions. (Mareschal B, 2017)

- **Définition des critères**

fonction f définie sur A , à valeurs dans un ensemble totalement ordonné, représentant un objectif du décideur

- **Famille cohérente de critères :**

- représenter tous les aspects du problème, tous les objectifs du décideur,
- éviter les redondances. (Mareschal B, 2017)

La plupart des méthodes actuelles d'aide à la décision multicritères (MCDA) supposent qu'un tableau d'évaluation multicritères est disponible pour analyse. C'est donc un problème pratique et de nombreuses approches différentes peuvent être utilisées pour le résoudre. (MARESCHAL B, ELHADOUCHI Mohamed, 2015)

Dans un premier temps on distingue :

- Approches externes indépendantes de la méthode MCDA utilisée.
- Approches internes qui dépendent de la méthode et reposent sur les mathématiques de la méthode utilisée. Dans cette catégorie d'approches, nous nous intéressons à la méthode de surclassement PROMETHEE.

2. Principe de la méthode PROMETHEE

D'après Brans (Taibi B, 2017) les méthodes PROMETHEE appartiennent à la classe des méthodes de surclassement et reposent sur les trois étapes suivantes :

1- Enrichissement de la structure de préférence

Nous allons définir une nouvelle notion, celle de critère généralisé, qui sera définie à partir d'une fonction de préférence. Cette notion est introduite afin de tenir compte des amplitudes des écarts entre les évaluations sur les différents critères, et également afin d'éliminer tous les effets d'échelle liés aux unités dans lesquelles les critères sont exprimés.

2- Enrichissement de la relation de dominance par la relation de surclassement

Une relation de la valeur de surclassement tenant compte de l'ensemble des critères est proposée et pour chaque paire d'actions, un degré de préférence global d'une action sur l'autre sera établi.

3 -Exploitation pour aide à la décision

La relation de surclassement est exploitée en vue d'éclairer le décideur. Prométhée I fournira un rangement partiel des actions, tandis que Prométhée II fournit un (Taibi B, 2017) rangement total.

2.1. Les trois phases de la méthode PROMETHEE

La mise en œuvre de la méthode peut être ramenée à l'exécution des trois étapes suivantes :

1-Choix de critère généralisés

A chaque critère C_1, C_2, \dots, C_n sera associé un critère généralisé choisi sur base d'une fonction de préférence et les effets d'échelle seront éliminés.

2-Détermination d'une relation de surclassement

Dans une deuxième phase, il convient de déterminer une relation de surclassement par le biais d'un indice de préférence (par exemple : l'écart maximum entre 2 actions) qui quantifiera les préférences du décideur.

3-Evaluation des préférences

L'évaluation de la préférence du décideur par la prise en compte des flux entrant et sortant.

Le principe de la méthode PROMETHEE consiste à établir un processus de comparaison numérique de chaque action par rapport à toutes les autres actions. Ainsi il est possible de calculer le plus (mérite) ou le moins (démérite) de chaque action par rapport à toutes les autres. Le résultat de cette comparaison permet le classement ordonné des actions. (Taibi B, 2017)

2.2. La notion de critère généralisé

Soit $C_i(a)$ un critère à optimiser (soit maximiser, soit minimiser) pour chaque action "a" appartenant à "A", $C_i(a)$ est une évaluation de cette action (critère C_i pour l'action "a"). Lorsque deux actions " a_1 " et " a_2 " sont comparées sur la base de ce critère, le

résultat de cette comparaison devra être donné sous la forme d'une expression de la préférence appelée la fonction de préférence. (Taibi B, 2017)

Une fonction de préférence spécifique est associée séparément à chaque critère dans un problème de décision multicritère. Nous considérons donc ci-après le cas d'un seul critère. La figure suivante montre la forme d'une fonction de préférence typique (type V - Fonction de préférence linéaire).

-L'axe horizontal correspond à la valeur de la différence entre deux actions sur un critère unique. Il est important de se rappeler que c'est la différence entre deux valeurs qui importe ici et non des valeurs absolues : les fonctions de préférence sont utilisées pour comparer deux actions. (Mareschal B, 2018)

- L'axe vertical correspond à un degré de préférence entre deux actions : une valeur de 0

signifie aucune préférence du tout, tandis qu'une valeur de 1 signifie une préférence incontestable absolue pour la meilleure action. (Mareschal, Preference functions and thresholds, 2018)

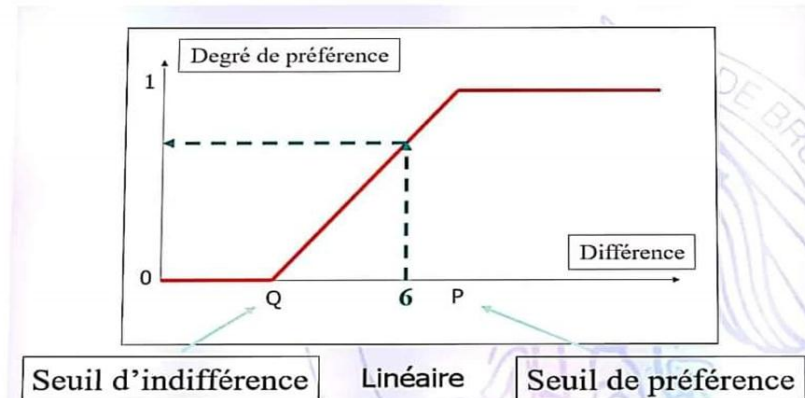


Figure 5. Fonction de préférence typique (type V—Fonction de préférence linéaire) (Mareschal B, 2018)

Q seuil d'indifférence : c'est la plus grande valeur de "d" en dessous de laquelle le décideur considère qu'il y a indifférence.

P seuil de préférence stricte : c'est la plus petite valeur de "d" au-dessus de laquelle le décideur qu'il y a préférence stricte.

2.3. Modélisation des préférences

2.3.1. Choix des fonctions de préférence

Un critère généralisé devra être associé à chaque critère $f_j(\cdot)$, $j=1, \dots, k$. Il s'agit d'une information complémentaire importante, et pour faciliter la tâche au décideur, un ensemble de six types lui est proposé :

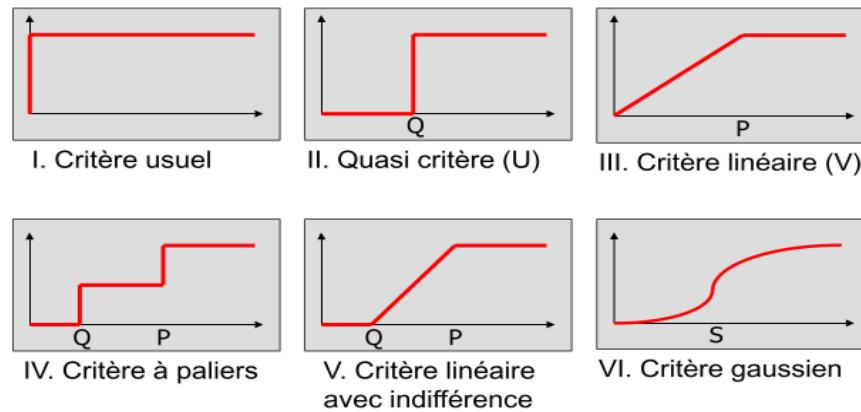


Figure 6. Critères généralisés (6 types) (Waaub, 2012)

-Type I : critère usuel

P est une fonction sans paramètre qui traduit une préférence stricte dès qu'il existe un écart entre les évaluations de l'action a et de l'action b. Il y'a préférence stricte ($P(d)=1$ dès que $d \neq 0$;

Si $d=0$, il y'a indifférence et $P(d)=0$.

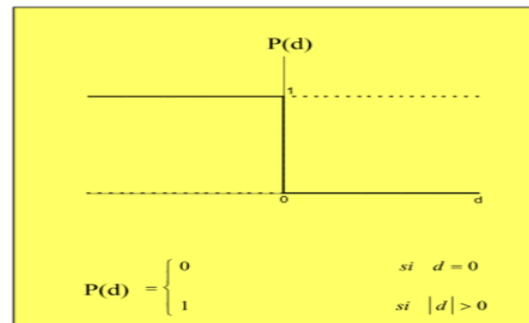


Figure 7.a. Vrai critère (type1) (Waaub, 2012)

-Type II : quasi-critère P est une fonction à un paramètre q , qui représente un seuil d'indifférence. IL faut donc que l'écart entre les évaluations des actions a et b soit suffisamment grand ($>q$) pour qu'il existe une préférence stricte.

Si d est inférieur à q , il y'a une d'indifférence entre a et b .

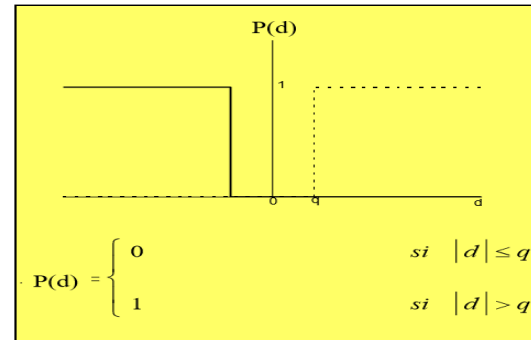


Figure 7.b. Quasi-critère (type2) (Waub, 2012)

-Type III : critère à préférence linéaire

P est une fonction à un paramètre qui représente un seuil de préférence stricte.

En utilisant ce type de critère, nous éliminons les sauts dans le degré de préférence au voisinage du seuil, il existe donc une préférence croissante donnant lieu à une préférence stricte dès que $d > p$, quand d est nulle, il y'a indifférence entre les actions a et b .

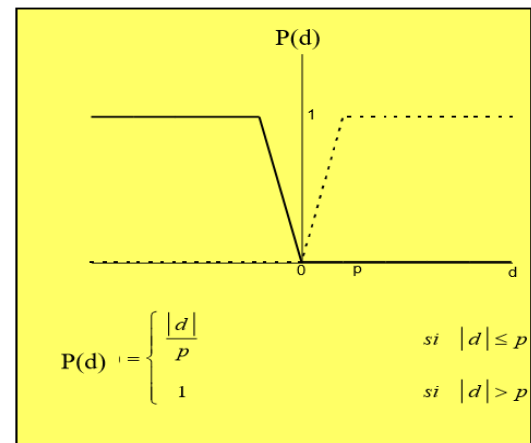


Figure 7.c. Critère linéaire (type 3) (Waub, 2012)

-Type IV : critère à paliers (Pseudo)

P est une fonction à deux paramètres p et q . Nous sommes donc en présence d'une zone d'indifférence entre 0 et q , suivie d'un palier de préférence faible entre p et q , et d'un palier de préférence strict pour $d > p$.

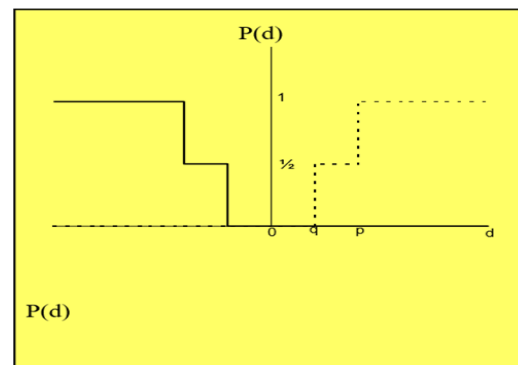


Figure 7.d. Critère à paliers (type4) (Waub, 2012)

-Type V : critère à préférence linéaire avec zone d'indifférence

P est une fonction à deux paramètres p et q. Nous sommes donc en présence d'une zone d'indifférence entre 0 et q, suivie d'une préférence croissante jusqu'à p et pour $d > p$, d'une situation de préférence stricte.

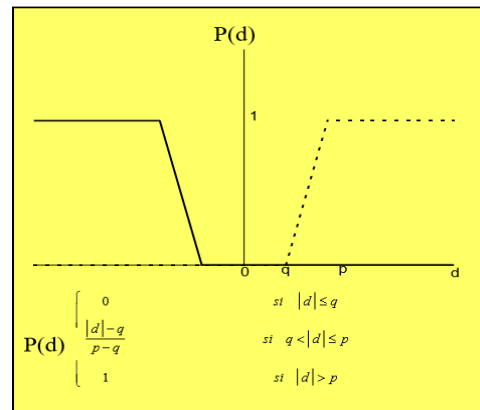


Figure 7.e. Critère linéaire avec indifférence (type 5) (Waub, 2012)

-Type VI : critère gaussien

P est une fonction à un paramètre σ ; appelé seuil gaussien, qui contrôle l'aplatissement de la fonction P. La valeur de ce seuil gaussien correspond à une préférence relativement faible.

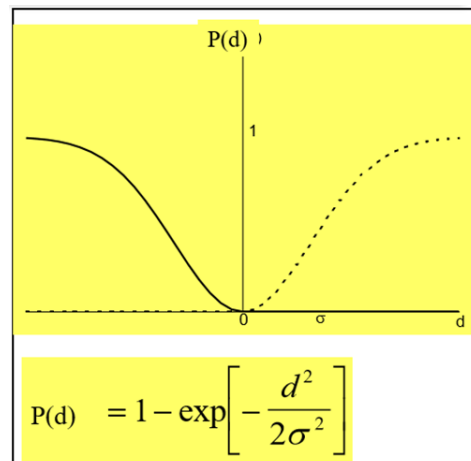


Figure 7.f. Critère gaussien (type 6). (Waub, 2012)

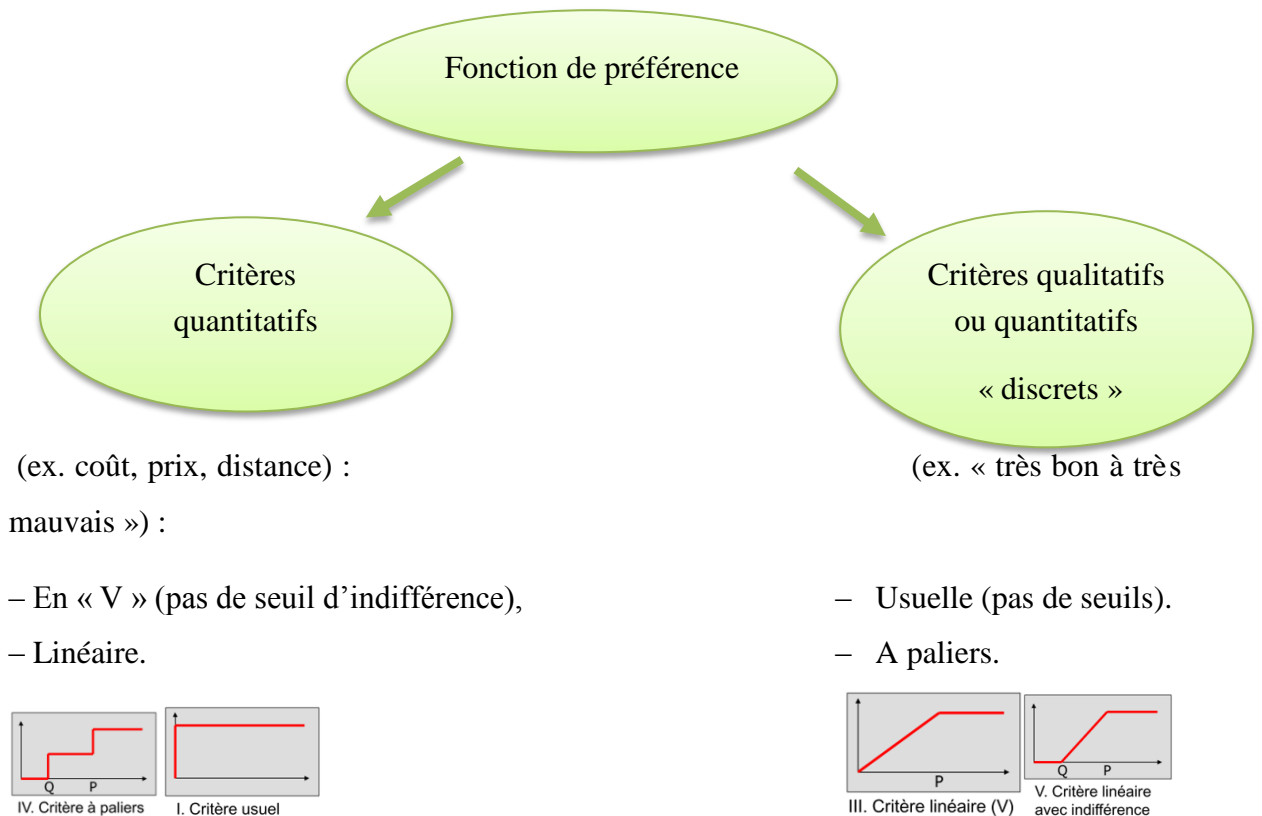


Figure 8. Choix de l'échelle

2.4. Choix du type de critère généralisé

Remarquons que, comme la plupart des méthodes multicritères, les méthodes **Prométhée** requièrent des évaluations numériques. Dans le cas où les différentes évaluations s'expriment comme des évaluations qualitatives, on devra associer aux niveaux d'une telle échelle des valeurs numériques afin de pouvoir choisir un type de critère généralisé. Ainsi, deux degrés de liberté importants sont laissés au choix du décideur : le type de critère généralisé et les seuils qui interviennent dans la définition de ce critère. (Taibi, 2009)

- Choix des seuils :

- Les significations des seuils d'indifférence q et de préférence stricte p ont une signification claire et ils sont en général choisis assez facilement par le décideur.

- Dans le cas d'un critère de type IV, le seuil S sera fixé entre q et p , plus proche de q si le décideur souhaite renforcer le degré de préférence pour des petits écarts, et plus proche de p s'il souhaite atténuer la progression du degré de préférence en fonction des écarts observés. (Taibi, 2009)

- Détermination des poids de chaque critère :

Il convient, une fois les critères fixés, de déterminer les poids qui doivent être associés. A cette fin plusieurs techniques peuvent être employées, à savoir :

- la technique Delphi : cette méthode consiste à réunir, de la part de chaque membre d'un groupe, composé d'experts isolés les uns des autres, leur proposition relative aux poids à accorder avec la justification nécessaire. Un coordinateur réunit toutes ces propositions et les transmet ensuite à chaque membre du groupe. Se déroule ensuite un deuxième tour au cours duquel chaque membre revoit sa pondération eu égard aux avis émis par ces collègues.

On constate généralement, après un certain nombre de tours, une convergence des valeurs et l'on obtient ainsi un consensus. La durée élevée de cette technique constitue son handicap majeur. (Taibi, 2009)

2.5. Procédure de synthèse de surclassement

2.5.1. L'indice de préférence multicritère

- L'indice de préférence multicritère fournit le degré de préférence du décideur pour une action par rapport à une autre tout en envisageant l'ensemble de tous les critères.
- Π définit une relation de préférence évaluée sur $[0, 1]$. Si $\pi(a_1, a_2)$ est proche de 0 nous sommes en présence d'une préférence faible, si elle est proche de 1 nous sommes en présence d'une préférence forte, de **a_1 sur a_2** sur l'ensemble des critères . (Waaub, 2012)
- Pour chaque critère **C_i** :
- Fonction de préférence **P_i**
- Poids **w_i**

Degré de préférence multicritère de **a** sur **b** :

$$\pi(a_1, a_2) = \sum w_i * P_i(a_1, a_2) \quad (3) \quad (\text{Taibi, 2009})$$

$$\pi(a_1, a_2) = (1/m) * \sum P_i(a_1, a_2) \quad (4) \quad (\text{Taibi, 2009})$$

Nous appellerons : $\pi(a_1, a_2)$ l'indice de préférence.

W_i le poids de différents critères ($w_i > 0$; $i = 1, \dots, k$).

" m " est le nombre de critères ("m" permet simplement une moyenne arithmétique; cette formule sera employée lorsque les poids ne sont pas spécifiés ou sont tous égaux). Lorsque les poids sont spécifiés la première formule sera utilisée. Il s'agit en fait de la moyenne pondérée de l'ensemble des intensités des fonctions de préférence ou encore une mesure de la préférence globale du décideur (pour tous les critères) de l'action " a_1 " par rapport à l'action " a_2 ".

Nous avons évidemment :

$$0 \leq \pi(a_1, a_2) \leq 1$$

De plus :

Si $\pi(a_1, a_2) = 0 \leftrightarrow$ faible préférence de " a_1 " par rapport " a_2 ".

Si $\pi(a_1, a_2) \approx 1 \leftrightarrow$ forte préférence de " a_1 " par rapport " a_2 ".

2.5.2. La relation de surclassement

Après avoir calculé les valeurs de $\pi(a_1, a_2)$ pour chaque paire d'actions, on peut construire le graphe valué $(A, \pi(a_1, a_2))$, ayant pour sommets les actions de A et tel que $\forall a_1, a_2 \in A$, les arcs (a_1, a_2) et (a_2, a_1) existent et ont comme valeurs respectives $\pi(a_1, a_2)$ et $\pi(a_2, a_1)$.

(Brans J.P, Bertrand M., 2003) fait remarquer que l'information obtenue grâce à cette relation de surclassement valuée est particulièrement réaliste. En effet, lorsque deux actions a_1 sont comparées, a_2 est préférée à (a_1, a_2) avec un certain degré $\pi(a_1, a_2)$ car a_1 est meilleure que a_2 sur certains critères; et inversement a_2 est préférée à a_1 avec un certain degré $\pi(a_2, a_1)$ car en général a_2 sera également meilleur que a_1 sur d'autres critères. (Taibi, 2009)

2.5.3. Flux de Préférence (Flux de surclassement)

- Les flux multicritères sont la combinaison linéaire des flux unicritères.

- Les flux entrants et sortant sont introduits pour permettre la construction d'un préordre partiel sur l'ensemble des actions en acceptant que des actions soient incomparables (même performance. (Waaub, 2012)
- **Le flux sortant ϕ^+** mesure le caractère surclassant des actions, soit l'intensité moyenne avec laquelle une action est préférée aux autres. (Mareschal B, 2014)
- **Le flux entrant ϕ^-** mesure le caractère surclassant des actions, soit l'intensité moyenne avec laquelle les autres actions sont préférées à une action. (Mareschal B, 2014)

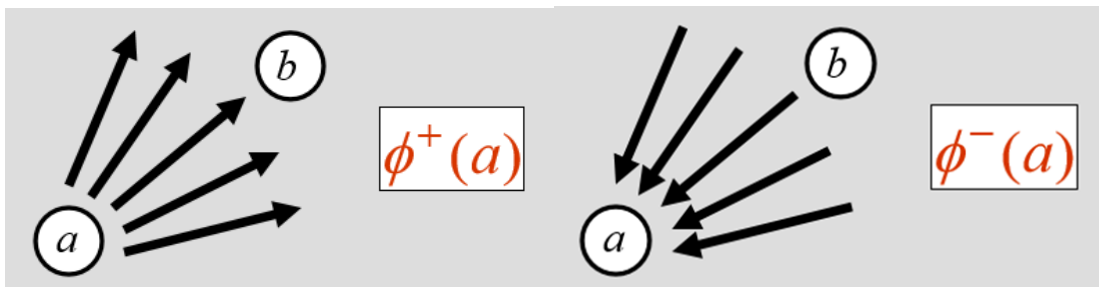


Figure 9. Flux de Préférence (Mareschal B, 2019)

Afin d'apprécier comment chaque action de **A** se comporte face aux (**n - 1**) autres actions, nous introduisons ici trois flux de surclassement.

2.5.3.1 Le flux de surclassement sortant

Le flux de surclassement positif (sortant) exprime de combien une action (a) surclasse toutes les autres ; plus le flux est élevé, meilleure est l'action. Le flux représente le caractère surclassant de l'action a. (Waaub, 2012)

Considérons :

$$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n \pi(a, x_j) \quad (6) \text{ (Waaub, 2012)}$$

2.5.3.2 Le flux de surclassement entrant

Le flux de surclassement négatif (entrant) exprime de combien une action (a) est surclassée par toutes les autres ; Le flux négatif représente le caractère surclassé de l'action. (Waaub, 2012)

$$\phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n \pi(x_j, a) \quad (7) \text{ (Waaub, 2012)}$$

2.5.3.3 Le flux de surclassement net

- Le flux de surclassement net est la différence entre le flux sortant et le flux entrant.
- Le flux net permet d'effectuer un rangement total des actions, il ne permet pas l'incomparabilité de ces dernières. (Waaub, 2012)
- L'information est moins riche que lors d'un rangement partiel mais il a l'avantage de fournir un classement complet, ce qui est souvent requis afin de négocier en vue d'une prise de décision. (Waaub, 2012)
- Le flux net est positif si l'action est en général préférée aux autres actions et négatif si les autres actions sont en moyenne préférées à l'action.

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) \quad (8) \text{ (Taibi, 2009)}$$

- Scores relatifs associés aux actions (Mareschal B, 2014)

- **Flux sortant et entrant :**

– Force : $0 \leq \phi^+ \leq 1$

– Faiblesse : $0 \leq \phi^- \leq 1$

- **Flux net :**

- Bilan : $-1 \leq \phi = \phi^+ - \phi^- \leq +1$

Flux nets unicritères : Scores normalisés par critère (Mareschal B, 2014) :

$$\text{critère } f_j \Rightarrow -1 \leq \phi_j \leq +1$$

Synthèse

Flux sortant : (force de a sur b)

$$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n \pi(a, x_j)$$

Flux entrant : (faiblesses de a sur b)

$$\phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n \pi(x_j, a)$$

Flux net : (score final de a sur b)

2.6. Exploitation de la valeur de la relation de surclassement

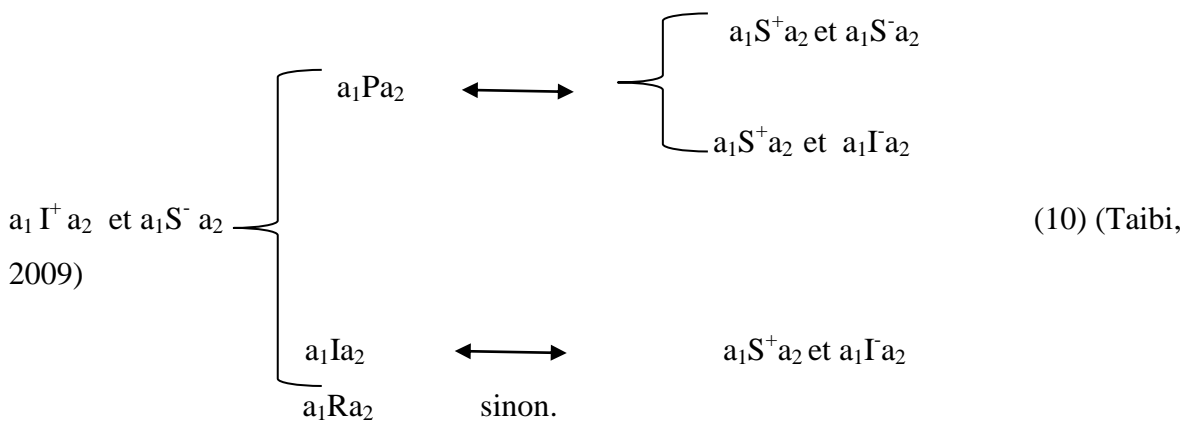
2.6.1 La méthode PROMETHEE I : Classement partiel

Le classement PROMETHEE I est un classement partiel. Cela signifie que toutes les actions ne sont pas forcément comparées et que le classement peut inclure des incomparabilités. Les flux sortants et entrant permettent de ranger les actions de A de façon naturelle. Désignons par (S^+, I^+) et (S^-, I^-) les deux préordres induits par ces flux. On sait qu'une action est d'autant meilleure que son flux sortant est élevé, et que son flux entrant est faible. (Taibi B, 2017)

$$(9) \quad \begin{array}{l} \left. \begin{array}{ll} a_1 S^+ a_2 & \text{ssi} \\ a_1 I^+ a_2 & \text{ssi} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \phi^+(a_1) > \phi^+(a_2) \\ \phi^+(a_1) = \phi^+(a_2) \end{array} \\ \left. \begin{array}{ll} a_1 S^- a_2 & \text{ssi} \\ a_1 I^- a_2 & \text{ssi} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \phi^-(a_1) < \phi^-(a_2) \\ \phi^-(a_1) = \phi^-(a_2) \end{array} \end{array}$$

Prométhée I construit un rangement partiel en prenant l'intersection de ces deux préordres.

- (P, I, R) dénotent respectivement la préférence, l'indifférence et l'incomparabilité.



Les résultats possibles de la comparaison de deux actions seront donc les suivants :

- **$a_1 P a_2$: a_1 est préférée à a_2 .**

a_1 est dans ce cas plus «puissante» et moins «faible» que a_2 . L'information fournie par les flux de surclassement va dans le même sens et peut être considérée comme sûre. Il est dans ce cas réaliste de déclarer a_1 préférée à a_2 . (Taibi, 2009)

- **$a_1 I a_2$: a_1 et a_2 sont indifférentes.**

La puissance et la faiblesse de a_1 et a_2 sont égales donc rien ne permet de départager objectivement a_1 et a_2 . (Taibi, 2009)

- **$a_1 R a_2$: a_1 et a_2 sont incomparables.**

Ici, une plus grande puissance d'une des actions est assortie d'une faiblesse moindre de l'autre et l'information fournie par les deux flux est alors contradictoire. On rencontre généralement cette situation lorsque l'action a_1 est nettement meilleure que sur un sous-ensemble de critères et que a_2 est meilleure que a_1 sur un autre sous-ensemble de critères. Il est dans ce cas raisonnable d'interdire au modèle de se prononcer en faveur d'une des actions et il appartient dans ce cas au décideur de trancher en faveur d'une des deux actions. (Taibi, 2009)

2.6.2 La méthode PROMETHEE II : Rangement complet

Le classement PROMETHEE II est un classement complet. Cela signifie que toutes les actions sont comparées et que le classement ne comporte aucune incomparabilité même lorsque la comparaison est difficile. Le classement qui en résulte peut donc être plus discutable, notamment en présence de critères fortement contradictoires.

Classement des actions par un classement complet (PROMETHEE II).

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a)$$

Le classement complet des alternatives peut éviter l'incomparabilité. Où $\phi(a)$ désigne le flux net de surclassement pour chaque alternative. Les relations de préférence sont les suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{ll} a_1 P a_2 & \longleftrightarrow \quad \phi(a_1) > \phi(a_2) \\ a_1 I a_2 & \longleftrightarrow \quad \phi(a_1) = \phi(a_2) \end{array} \right.$$

Remarquons que Prométhée II ne laisse pas de place à l'incomparabilité. L'information fournie par le préordre complet est plus simple à interpréter, mais est moins riche que celle fournie par PROMETHEE I. En effet, dans PROMETHEE II, une partie de l'information disparaît dans la différence entre les flux et le résultat obtenu peut donc être plus discutable. (Taibi, 2009)

Les étapes procédurales de la méthode PROMETHEE II sont :

- **Étape 1**

Critères bénéfiques (à maximiser)	Critères non-bénéfiques (à minimiser)
$R_{ij} = \frac{[x_{ij} - \min(x_{ij})]}{[\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})]}$	$R_{ij} = \frac{[\max(x_{ij}) - x_{ij}]}{[\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})]}$

Tableau 2. Equation de normalisation des données (PROMETHEE II) (Maity,S.R.& Chakraborty,S, 2015)

Tel que : $i = 1,2,3, \dots, m$ et $j = 1,2,3, \dots, n$ (ou m et n sont nombre des alternatives et critères).

Où x_{ij} est la mesure de performance de la i ème alternative par rapport au j ème critère et R_{ij} est la valeur normalisée de x_{ij} .

Où le nombre de critères d'évaluation, $\min(x_{ij})$ et $\max(x_{ij})$ sont respectivement les valeurs minimale et maximale de x_{ij} . Cette procédure de normalisation est nécessaire pour rendre les valeurs des critères sans dimension et comparables. Après la normalisation, toutes les valeurs des critères doivent être comprises entre 0 et 1. Dans certains cas, une procédure de normalisation partielle peut également être adoptée (Maity,S.R.& Chakraborty,S, 2015).

- **Étape 2 :** Calculez les différences d'évaluation avec l'alternative par rapport aux autres alternatives. Cette étape implique le calcul des différences de valeurs de critères entre différentes alternatives par paires.
- **Étape 3 :** Calculez la fonction de préférence, $P_j(a,b)$. Bien qu'il existe six types de fonctions de préférence généralisées, elles nécessitent souvent la définition de certains paramètres préférentiels, tels que les seuils d'indifférence et de préférence. Cependant, dans les applications en temps réel, il peut être difficile pour le décideur de spécifier quelle forme spécifique de fonction de préférence convient à chaque critère et également de déterminer les valeurs des paramètres impliqués. Pour éviter ce problème, la fonction de préférence simplifiée est adoptée ici :

$$P_j(a,b)=0 \text{ if } R_{aj} > R_{bj}$$

$$P_j(a,b)= (R_{aj} - R_{bj}) \text{ if } R_{aj} > R_{bj}$$

- **Étape 4 :** Calculez la fonction de préférence agrégée en tenant compte des pondérations des critères. Fonction de préférence agrégée ;

$$\pi(a, b) = \left[\sum_{j=1}^n w_j P_j(a, b) \right] / \sum_{j=1}^n w_j \quad (11)$$

- **Étape 5** : Déterminez les flux sortants et entrants de surclassement comme suit :

$$\varphi^+(a) = \frac{1}{m-1} \sum_{b=1}^m \pi(a, b) \quad (a \neq b) \quad (12)$$

- **Étape 6** : Calculer le flux de classement pour une alternative

$$\varphi(a) = \varphi^+(a) - \varphi^-(a)$$

Où $\varphi(a)$ est la valeur nette du débit de surclassement pour la variante a.

- **Étape 7** : Déterminez le classement de toutes les alternatives considérées en fonction des valeurs de $\varphi(a)$. Plus la valeur de $\varphi(a)$ est élevée, meilleure est l'alternative. Ainsi, la meilleure alternative est celle qui a la valeur $\varphi(a)$ la plus élevée.

2.6.3. La différence entre Prométhée I et II :

La différence entre les méthodes Prométhée I et II se trouve dans les différences de rangement des actions.

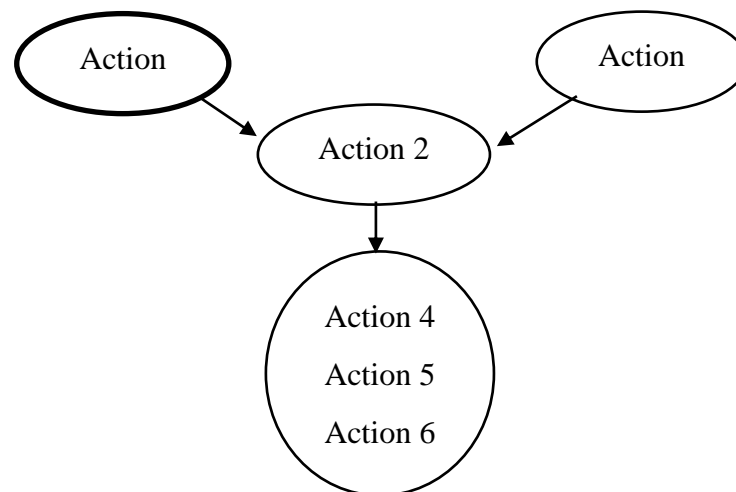


Figure 10. Rangement des actions (D'avignon G.R, Sauvageau M, 1996)

Les deux méthodes ont le même cheminement initial, mais leurs buts sont différents.

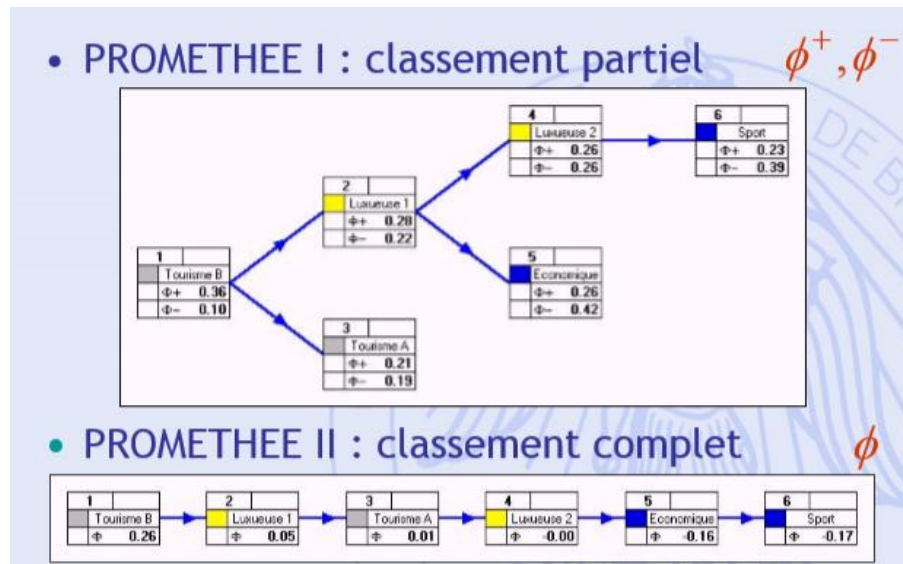


Figure 11. Classement partiel et classement complet (Mareschal B, 2019)

Les deux flux de préférence consolidant les comparaisons par paires des actions selon des points de vue opposés, ils induisent généralement deux classements différents sur l'ensemble des actions.

Le classement partiel PROMETHEE I est l'intersection de ces deux classements. Ainsi l'action a est préférée à l'action b dans le classement PROMETHEE I si et seulement si elle est préférée à b selon les deux flux de préférence.

Le classement PROMETHEE II est un classement complet. Cela signifie que toutes les actions sont comparées et que le classement ne comporte aucune incomparabilité même lorsque la comparaison est difficile. Le classement qui en résulte peut donc être plus discutable, notamment en présence de critères fortement contradictoires. Le flux net multicritères $\varphi(.)$ permet une évaluation globale des actions prenant en compte tous les critères il peut être comparé à une fonction d'utilité qui contient des informations de préférence claires et simples et qui repose sur des déclarations comparatives plutôt que sur des déclarations absolues.

Le classement partiel PROMETHEE I n'inclut pas d'incomparabilités particulièrement importantes. Le classement PROMETHEE II est plus intéressant.

2.6.4. GAIA

La méthode GAIA est une manière de décrire graphiquement les principales caractéristiques des problèmes de décision.

GAIA utilise une technique de réduction de dimension empruntée à l'analyse des données statistiques. Cette technique est appelée analyse en composantes principales (ACP).

Dans le cas où le décideur est à même de fixer des valeurs précises des poids attribués aux critères, la longueur de l'axe de décision PROMETHEE (π) permet déjà d'apprécier le degré de difficulté du problème. (Taibi, 2009)

Dans beaucoup de cas, le décideur hésite à fixer des valeurs précises pour ces poids. Il est conscient de l'importance que les poids peuvent avoir sur le processus décisionnel.

Dans PROMETHEE VI, il est proposé au décideur de fixer des intervalles dans lesquels les poids peuvent varier :

$$j=1,2,\dots,k \quad w_j^- \leq w_j \leq w_j^+ \quad (12)$$

Où w_j^- et w_j^+ sont des valeurs numériques fixées. De tels intervalles peuvent aussi être fixés à partir d'une valeur connue w_j en tolérant un pourcentage θ_j de variation autour de cette valeur:

$$j=1,2,\dots,k \quad w_j \cdot \theta_j \pm w_j$$

En général, le décideur se sent ainsi beaucoup plus à l'aise. Il a la conviction que la véritable distribution de poids qu'il souhaite adopter, sans qu'il soit en mesure de la préciser, fait partie de l'espace de liberté qui lui est offert. (Taibi, 2009)

2.7. Avantages de la méthode PROMETHEE

Les méthodes PROMETHEE sont parmi les méthodes les plus utilisées dans la catégorie des méthodes de surclassement. Ceci est dû à un certain nombre d'avantages offerts par ces méthodes. (Taibi, 2009)

- Cette méthode est parvenue à intégrer de façon simple les développements récents dans la modélisation des préférences.
- PROMETHEE, quoique dépourvue d'une base mathématique, a essayé de combler ce manque en procédant par la systématisation de la fonction de préférence. En effet, le décideur, ayant à choisir la forme de sa préférence parmi six formes, se sentirait plutôt rassuré. (Taibi, 2009)
- La simplicité de PROMETHEE la place sur une bonne position pour être utilisée si on cherche à ranger des actions potentielles et que le décideur ne trouve pas beaucoup de peine à déterminer les poids des critères. Bien souvent cette méthode est sujette à des modifications ou des extensions. (Taibi, 2009)

2.8 Inconvénients de la méthode PROMETHEE

PROMETHEE fait partie de la famille des méthodes de surclassement ; les critiques qui se trouvent dans la littérature s'adressent généralement à cette famille. Néanmoins on peut indiquer quelques critiques qui la concernent directement.

- En tant que méthode de surclassement de type rangement. PROMETHEE permet de ranger les actions mais ne permet de rendre compte des différences quantitatives relatives à ces actions.
- Le fait de prendre des seuils d'indifférence et de préférence constants peut être considéré comme une restriction. (Taibi, 2009)

Conclusion

L'objectif de ce chapitre a été d'aborder l'analyse multicritère de manière générale et plus particulièrement de présenter en détail la méthode de surclassement PROMETHEE. Cela nous a permis de bien la comprendre et de la maîtriser. Les méthodes PROMETHEE sont parmi les méthodes les plus utilisées dans leur catégorie car elles intègrent des développements récents dans la modélisation des préférences de façon simple. Elles sont recommandées si on cherche à ranger des actions potentielles et que le décideur ne trouve pas beaucoup de peine à déterminer les poids des critères. Nous tenterons de mettre en application la méthode PROMETHEE par le biais d'études de cas dans le chapitre suivant.

Introduction

Dans ce chapitre, nous mettons en application la méthode PROMETHEE à travers deux études de cas à l'aide du logiciel Visual PROMET. La première étude va servir à valider la méthodologie que nous utilisons ainsi que la maîtrise de l'outil logiciel. Dans la seconde étude, nous étudions un cas industriel dont les données ont été récoltées lors de notre stage à l'entreprise « ORSIM-BCR »

1 Visual PROMETHEE

Visual PROMETHEE est le logiciel dédié à la méthode PROMETHEE-GAIA.

1.1 Terminologie

La terminologie suivante est utilisée.

- Action : le terme action est utilisé pour désigner soit une décision possible, soit un élément à évaluer. Visual PROMETHEE compare différentes actions qui sont évaluées sur plusieurs critères.
- Catégorie : une action définit un sous-ensemble d'actions qui vise le même symbole et les mêmes couleurs dans l'analyse.

Commandé du meilleur au pire (par exemple bons clients, clients moyens et mauvais clients dans un contexte d'allocation de crédit), Les classes peuvent être créées ou modifiées à partir de la boîte de dialogue Classes.

- Cluster : un cluster définit un sous-ensemble de critères dans un ou plusieurs groupes de critères. Il s'agit du niveau supérieur de la hiérarchie des critères de Visual PROMETHEE.
- Coalition : une coalition est un groupe de décideurs. Les scénarios d'une même coalition partagent la même couleur, la même couleur de remplissage et la même forme pour une identification plus facile dans les analyses PROMETHEE et GAIA.
- Critère : un critère est un attribut associé à chaque action qui permet de comparer les actions et de déterminer les meilleures.

Elle peut être quantitative (un nombre est associé à chaque action, comme le prix d'un article) ou qualitative (dans ce cas, une échelle qualitative doit être définie avec un certain nombre de niveaux ordonnés comme par exemple : très mauvais, mauvais, moyen, bon, très bon).

- Décideur : Dans le cadre de Visual PROMETHEE, un décideur est une personne ou une organisation responsable d'une décision ou impliquée dans le processus de décision.

Pour un problème de décision donné, il peut y avoir un seul ou plusieurs décideurs.

Dans Visual PROMETHEE, chaque décideur doit être associé à un scénario et peut ainsi exprimer ses préférences et priorités indépendamment des autres décideurs.

- Problème de décision : dans Visual PROMETHEE, un problème de décision est défini par :
- Un ensemble d'actions : il s'agit des décisions ou choix possibles, ou des éléments à évaluer.
- Un ensemble de critères : ce sont les attributs qui sont utilisés pour comparer les actions. Ils représentent les objectifs du décideur.
- Un ou plusieurs scénarios : chaque scénario contient des évaluations spécifiques et des informations de préférence. Les scénarios peuvent représenter les points de vue de différents décideurs ou différentes hypothèses

1.2 Comment utiliser Visual PROMETHEE ?

- Définir un nouveau problème.
- Définir les actions.
- Définir les critères.
- Préférences de modèle.
- Définir les scénarios.
- Organisez les critères.
- Peser les critères.
- Classez différentes actions
- Utiliser l'analyse GAIA.
- Effectuer une analyse de sensibilité.
- Utiliser les préréglages de poids.
- Générer un rapport.

1.3 Outils d'analyses

- Lorsqu'on démarre Visual PROMETHEE, la fenêtre principale s'affiche. La fenêtre principale est organisée comme suit, de haut en bas :
 - Le menu principal s'affiche en haut de la fenêtre.

- Il existe deux barres d'outils avec des commandes importantes :
 - Gestion des données sur la rangée supérieure.
 - Gestion des analyses sur la rangée inférieure.
- La partie principale de la fenêtre est la feuille de calcul :
- La plupart des données sont affichées et peuvent être modifiées à partir de la feuille de calcul.
- Dans la partie supérieure se trouvent le nom du scénario actuel et les noms des critères ainsi que des cases à cocher pour activer / désactiver les critères et les informations sur l'unité et le groupe / groupe. Cliquez sur les boutons pour accéder aux boîtes de dialogue de scénario ou de critère.
- La feuille de calcul contient trois sections réductibles : Préférences, Statistiques et Évaluations. Cliquez sur les petites icônes dans la colonne la plus à gauche pour réduire / développer ces sections.
- Préférences : Pour chaque critère, les données suivantes sont disponibles :
 - Min / max : sélectionnez si le critère doit être minimisé ou maximisé.
 - Poids : saisissez le poids du critère (les poids sont automatiquement normalisés).

Les différentes analyses possibles sont présentées à travers l'étude de cas 1.

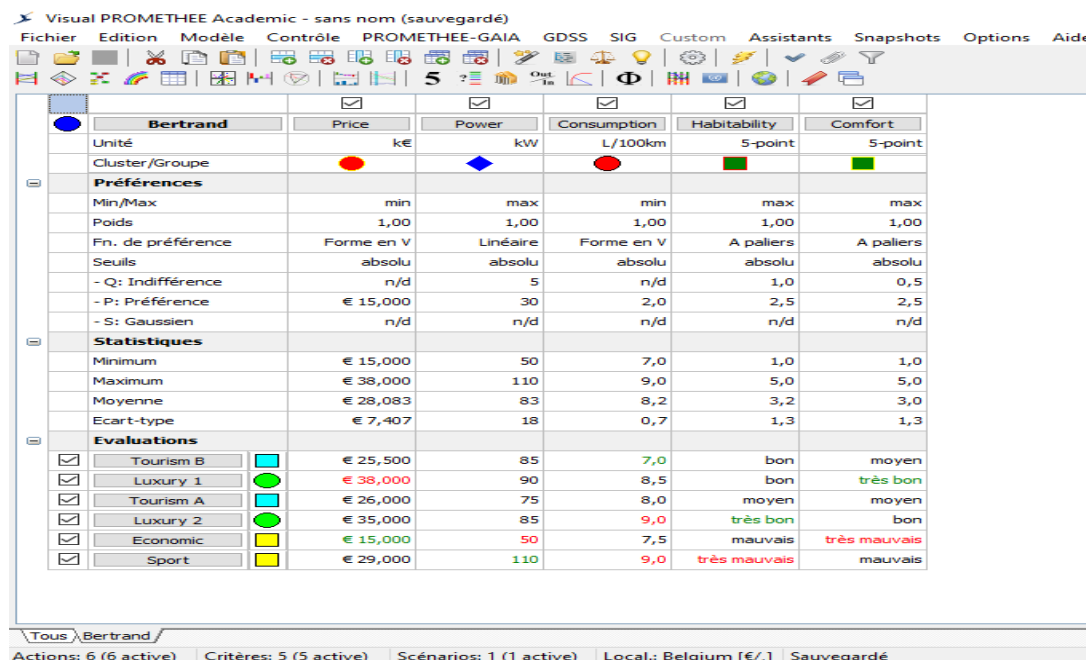


Figure1. Fenêtre principale

2 Etude de cas 1

Afin d'apprendre et de maîtriser le logiciel Visual PROMETHEE, on prend les même donnée utilisées dans la référence (Nouredine R,Nouredine M, 2012). L'étude de base concerne 50 équipements d'un complexe gazier et la problématique se limite à la hiérarchisation de 12 équipements présélectionnés selon 3 critères choisis. En second lieu, on a complété cette étude par d'autres analyses possibles dans GAIA.

2.1 Equipements considérés

Les 12 équipements (Nouredine R,Nouredine M, 2012) considérés avec leur codification sont désignés dans le tableau 1.

Désignation	Code
Compresseur deuxième étage pour MCR (multi-composant réfrigérant)	E1
Turbine de compresseur de gaz combustible	E2
Réactivation blower (soufflante)	E3
Compresseur premier étage pour MCR	E4
Compresseur de propane	E5
Echangeur principal	E6
Colonne absorbeur de MEA (monoethanolamine)	E7
Compresseur gaz combustible	E8
Pompe d'huile de lubrifiant principale	E9
Pompe de recyclage butane (secours)	E10
Pompe de recyclage butane (secours)	E11
Filtre de poussière	E12

Tableau 1. Codification des 12 équipements considérés

2.2 Classement des équipements selon la matrice de criticité

Une première classification avait été effectuée, selon 3 critère choisis et évalué (Nouredine R,Nouredine M, 2012), à partir de la méthode de la matrice de criticité, tableau 2.

Code	Criticité			Cr	Classe
	Production	Fiabilité	Coût		
E6	1	12	1	12	1
E4	6	16	1	96	2
E5	6	16	1	96	2
E1	9	16	1	144	3
E12	3	16	4	192	3
E2	16	16	1	256	4
E3	16	16	1	256	5
E10	16	8	2	256	6
E7	9	16	2	288	7
E11	16	12	2	384	8
E8	16	16	2	512	9
E9	16	16	6	1536	9

Tableau 2. Classement des équipements suivant la matrice de criticité.

2.3 Classement selon la méthode PROMETHEE

Nous avons réintégré tous d’abord la table de performances, partie en gris du tableau 2, dans le logiciel Visual PROMETHEE, Figure 1.

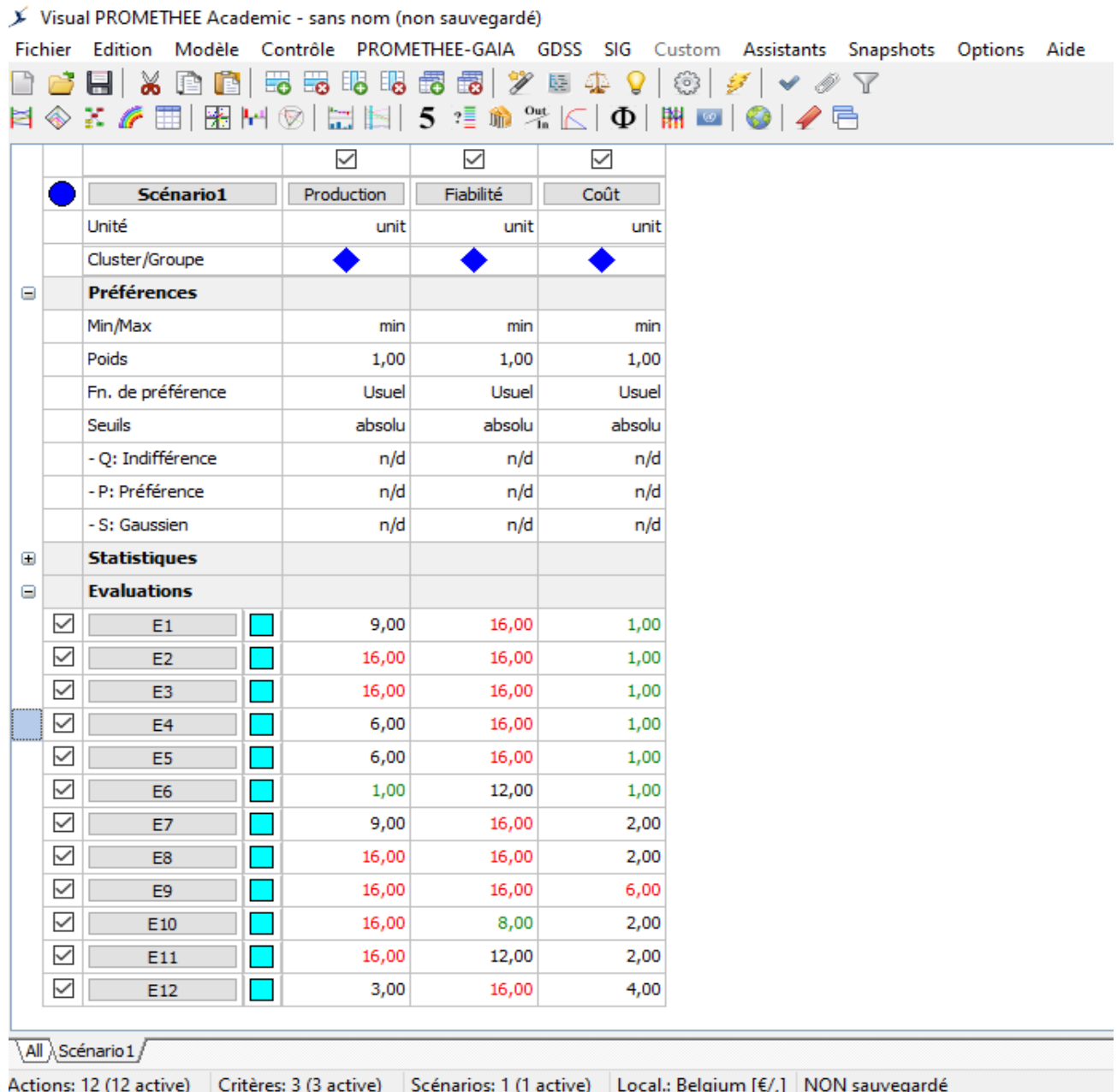


Figure 2. Evaluation des critères dans PROMETHEE.

On obtient les mêmes résultats de classement, Figure 2, que la référence (Nouredine R, Nouredine M, 2012). Ce qui permet de valider notre méthodologie.

Rang	action	Phi	Phi+	Phi-
1	E6	0,7576	0,7879	0,0303
2	E4	0,2727	0,4242	0,1515
2	E5	0,2727	0,4242	0,1515
4	E1	0,1515	0,3636	0,2121
5	E10	0,0303	0,3939	0,3636
6	E11	-0,0606	0,3333	0,3939
7	E2	-0,0909	0,1818	0,2727
7	E3	-0,0909	0,1818	0,2727
7	E12	-0,0909	0,3333	0,4242
10	E7	-0,1515	0,2424	0,3939
11	E8	-0,3939	0,0606	0,4545
12	E9	-0,6061	0,0000	0,6061

Figure 3. Classement des équipements suivant la méthode PROMETHEE.

2.4 Analyses selon la méthode PROMETHEE

2.4.1 GAIA

L'analyse GAIA est généralement un bon point de départ car elle est descriptive et peut aider le décideur à mieux comprendre le problème de décision.

Une première étape importante consiste à vérifier le niveau de qualité de GAIA plan. Il s'affiche en bas à droite de la fenêtre GAIA, Figure 3. Dans ce cas, il est égal à 75,4%, ce qui est bon.

En regardant la position de l'axe de décision (rouge) et l'orientation des axes des critères (bleue), la répartition actuelle des poids semble cohérente avec les objectifs. Cependant, une analyse de sensibilité au poids pourrait être menée pour vérifier la robustesse des classements PROMETHEE.

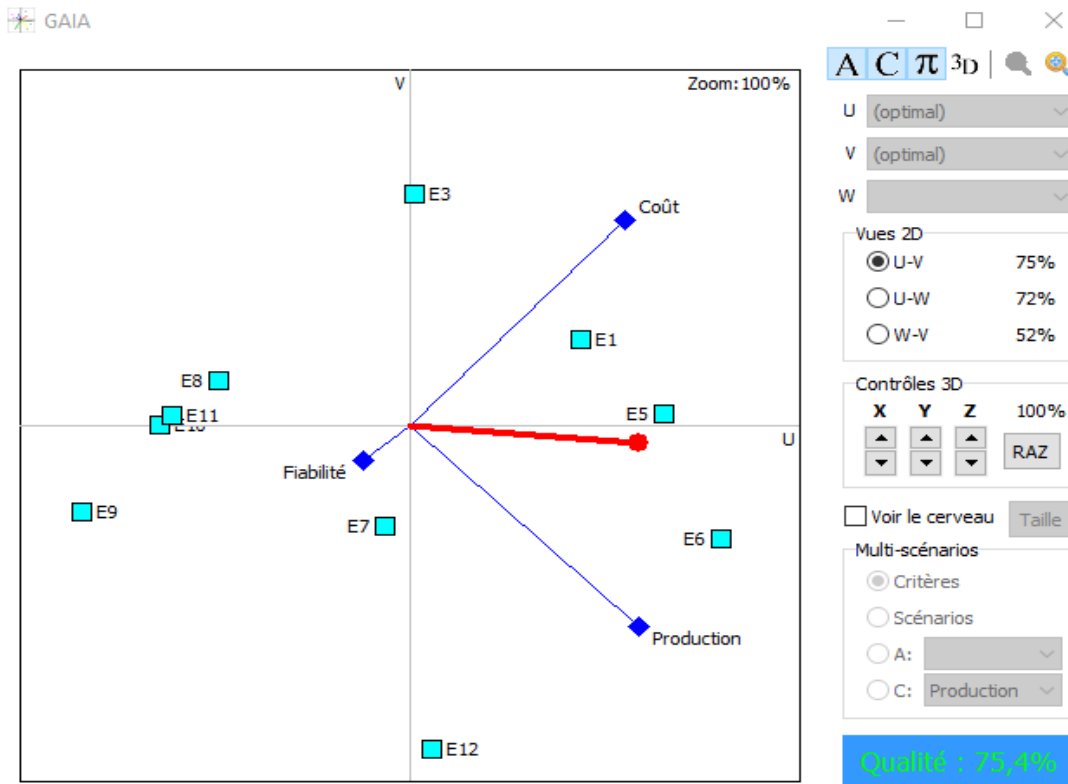


Figure 4. Analyse GAIA plan

2.4.2 Classement PROMETHEE I

Le Classement Partiel PROMETHEE I est basé sur le calcul des deux flux de préférences :

- Phi + (débit positif ou sortant) est une mesure de la force : Il est représenté sur la barre de gauche avec les meilleures (les plus grandes) valeurs en vert en haut de la barre et les pires en rouge en bas.
- Phi- (débit négatif ou entrant) est une mesure de faiblesse : Il est représenté sur la barre de droite avec les meilleures (plus petites) valeurs en vert en haut de la barre et les pires en rouge en bas.

Dans Visual PROMETHEE, le classement partiel de PROMETHEE I est affiché en traçant une ligne pour chaque action entre son score Phi + sur la barre verticale gauche et son score Phi- sur la barre verticale droite.

Lorsqu'une ligne est au-dessus d'une autre, cela signifie que l'action est préférée à l'autre. Quand deux lignes se croisent cela signifie que les actions sont incomparables dans PROMETHEE I.

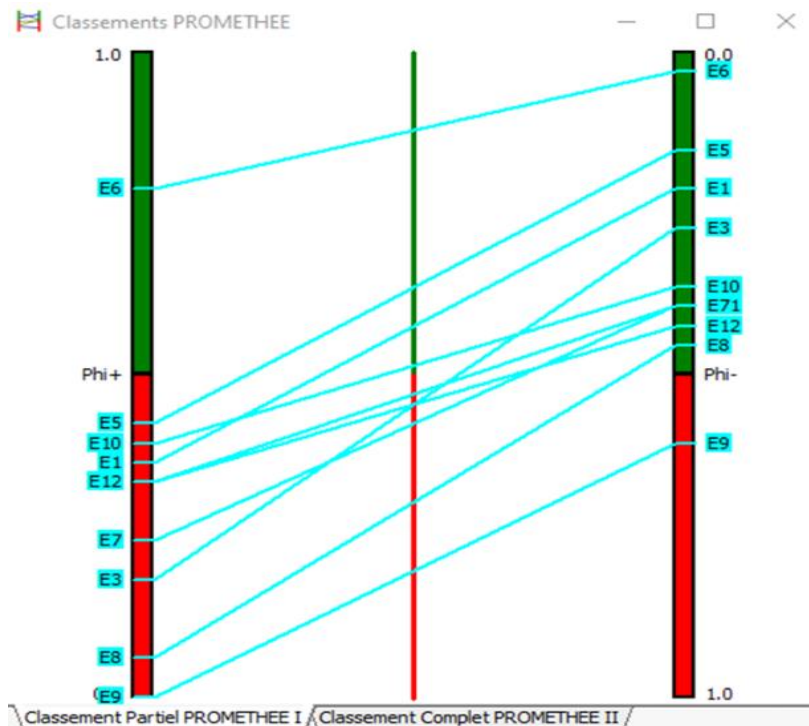


Figure 5. Classement PROMETHEE I

Dans l'exemple ci-dessus, nous voyons que le E6 est préféré à toutes les autres actions. E1 est incomparable avec E10. Et E3 est incomparable avec E7, E10, E12.

2.4.3 Classement PROMETHEE II

Le classement complet PROMETHEE II est basé sur le débit net Phi qui est l'équilibre (différence) entre Phi + et Phi-. Le score Phi peut être négatif : il s'agit d'un nombre compris entre -1 et +1. La fenêtre Classement PROMETHEE affiche les scores Phi sur une barre verticale, Figure 5.

Dans l'exemple ci-dessous, quatre groupes d'actions sont facilement identifiable :

- E6 au sommet.
- E5, E4, E1 en second.
- E10, E11, E7, E12 en troisième.
- E5, E10, E12, au milieu.

- E8, E9 en bas.

Il est à noter que le Classement Complet PROMETHEE II ne comportant aucune incomparabilité il est donc moins prudent que le Classement Partiel PROMETHEE I.

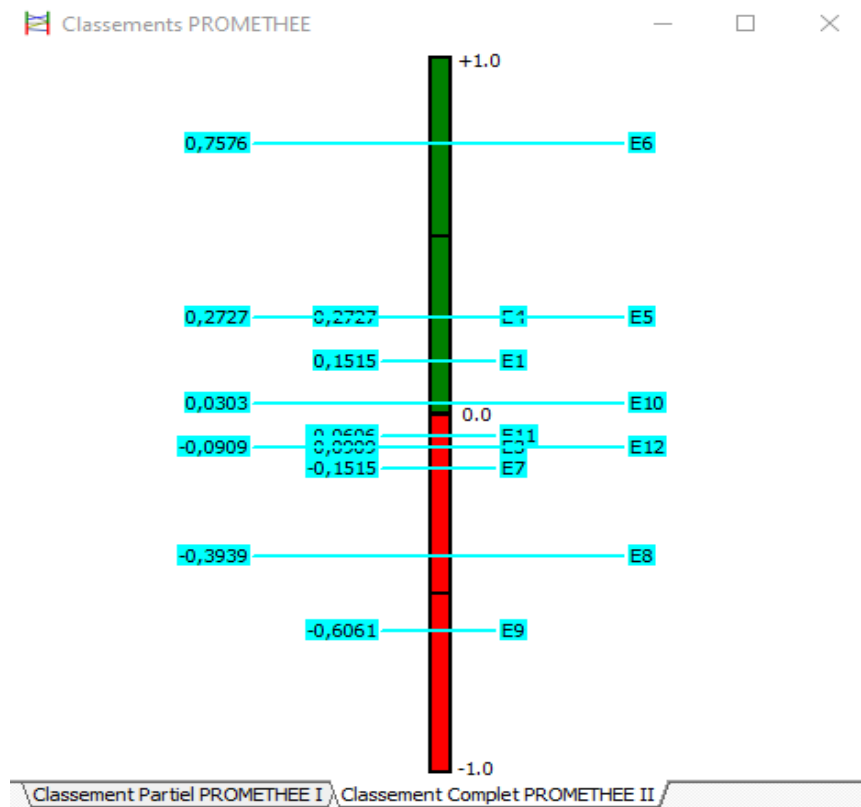


Figure 6. Classement PROMETHEE II

2.4.4 Diamant PROMETHEE

Le diamant PROMETHEE est une vue alternative du classement PROMETHEE, Figure 6.

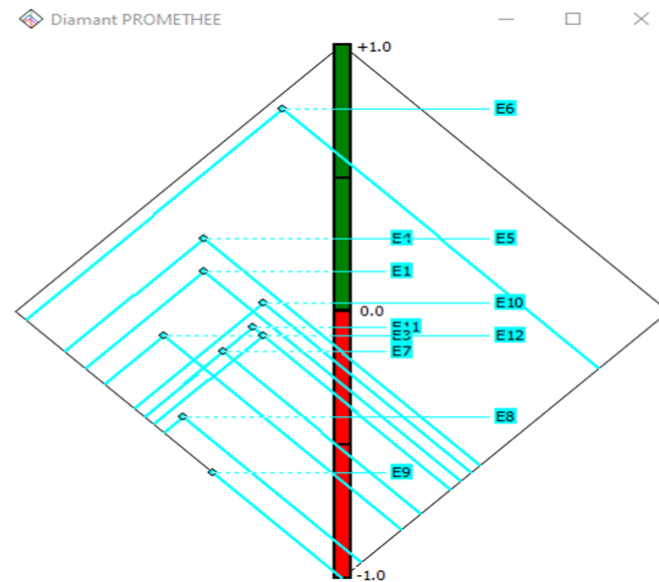


Figure 7. PROMETHEE Diamant

Le carré angulé à 45° correspond au plan (Phi + ; Phi-) orienté de telle sorte que l'axe vertical donne le score Phi. Chaque action est représentée par un cône.

Le sommet du cône est situé aux coordonnées (Phi + ; Phi-) de l'action. Lorsqu'un cône en chevauche un autre, cela correspond à une préférence. Lorsque deux cônes se croisent, il y a une incomparabilité dans le classement partiel PROMETHEE I.

Dans cet exemple, les actions E6, E1, E5, E10 sont clairement les meilleurs choix que les autres.

2.4.5 PROMETHEE Network

La représentation du réseau PROMETHEE du classement partiel PROMETHEE I est similaire aux anciens logiciels PROMETHEE tels que PromCalc ou Decision Lab. Les actions sont représentées par des nœuds et des flèches sont dessinées pour indiquer les préférences, Figure 7. Les incompatibilités sont donc très faciles à détecter.

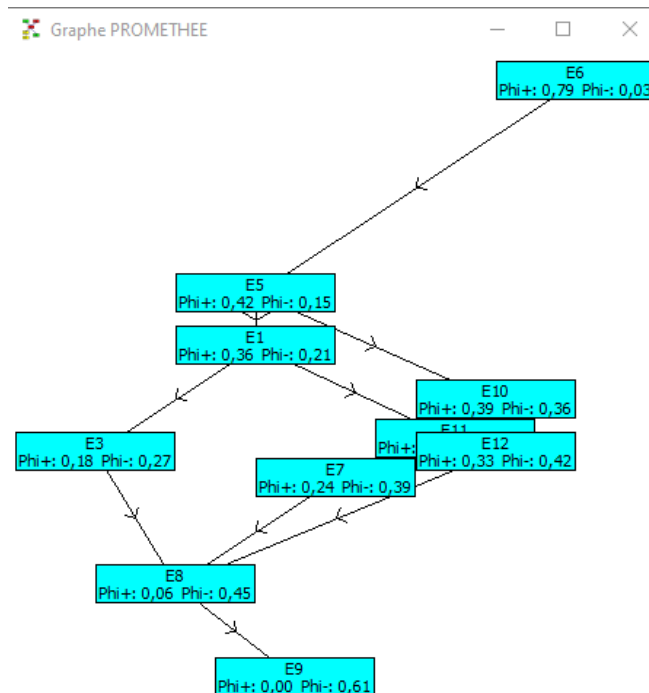


Figure 8. Réseau PROMETHEE

2.4.6 PROMETHEE Rainbow

Le PROMETHEE Rainbow est une vue désagrégée du classement complet PROMETHEE II, Figure 8. Pour chaque action, une barre est dessinée avec autant de tranches que le nombre de critères. Chaque tranche correspond à la contribution du critère au score de flux net Phi de l'action en tenant compte du poids du critère. De cette façon, la somme des tranches positives moins la somme des négatives est égale au score de flux net Phi de l'action.

Dans le cas étudié, Figure 8, il apparaît que :

- E6 n'a pas de contribution négative à son score Phi. Il n'a aucune faiblesse par rapport aux autres actions.
- Alors que E4, E5, E1, ont des scores Phi très proches l'un de l'autre, E1 semble assez différente des deux autres : sa barre est courte ce qui signifie qu'elle a un profil très moyen.
- Les autres actions ont des barres plus grandes avec des tranches positives et négatives, elles sont meilleures sur certains critères et pires sur d'autres.

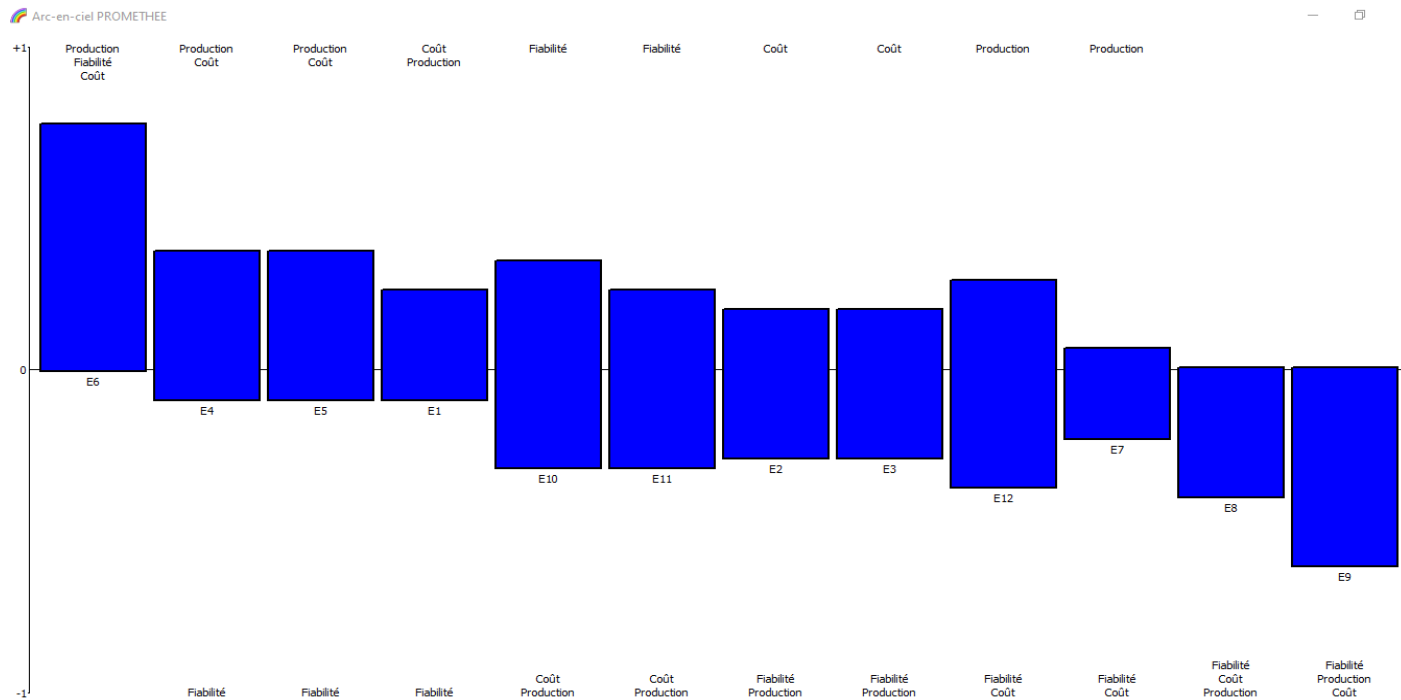


Figure 9. Arc-en-ciel PROMETHEE.

2.5 Analyse de Sensibilité avec PROMETHEE

L'analyse de sensibilité est essentielle dans l'aide à la décision multicritère. En effet, de nombreux paramètres doivent être définis dans un modèle multicritère. Les méthodes PROMETHEE et GAIA comprennent :

- Le choix des fonctions de préférence et des seuils associés.
- Le choix des poids alloués aux critères.

Une propriété intéressante des méthodes PROMETHEE est que les flux de préférence sont des fonctions linéaires des poids des critères. Cela facilite la réalisation d'analyses de sensibilité.

Dans Visual PROMETHEE, plusieurs outils sont disponibles pour l'analyse de la sensibilité au poids :

- The Walking Weights analysis.
- The Visual Stability Intervals.
- The Decision Maker Brain in the GAIA window.
- The Balance of Power window for multiple scenarios.

- **The Walking Weights analysis :**

La fenêtre Walking Weights contient deux graphiques, Figure 9 :

La partie supérieure montre les scores de flux net Phi (PROMETHEE II) pour les actions actives.

La partie inférieure montre les poids relatifs (en pourcentage) des critères.

Dans le cas étudié, Figure 9, les poids des critères sont verrouillés à 33%.

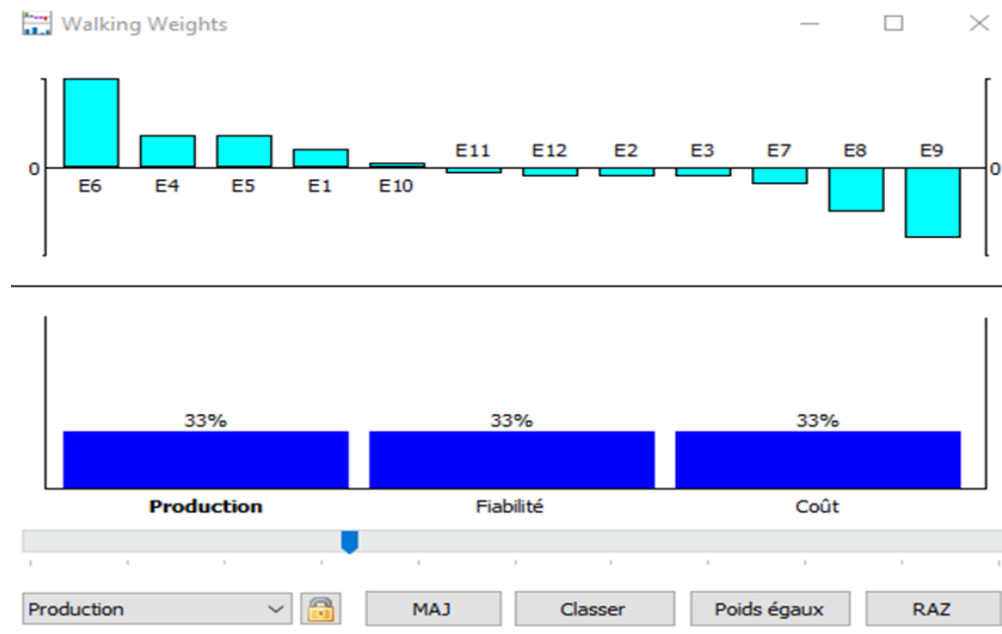


Figure 10. Analyse de Sensibilité interactive : « Walking Weights ».

- The Visual Stability Intervals

La fenêtre des intervalles de stabilité visuelle, Figure 10, montre comment les scores de débit net multicritères Phi changent en fonction du poids d'un critère.

La dimension horizontale correspond au poids du critère sélectionné. Et la dimension verticale correspond au score de débit net Phi. Pour chaque action, une ligne est dessinée qui montre le score de flux net en fonction du poids du critère. Au bord droit de l'affichage, le poids du critère est égal à 100% et les actions sont classées selon ce critère unique. Sur le bord gauche, le poids du critère est égal à 0%.

La position de la barre verticale verte et rouge correspond au poids actuel du critère. L'intersection des lignes d'action avec la barre verticale donne au PROMETHEE II un classement complet.

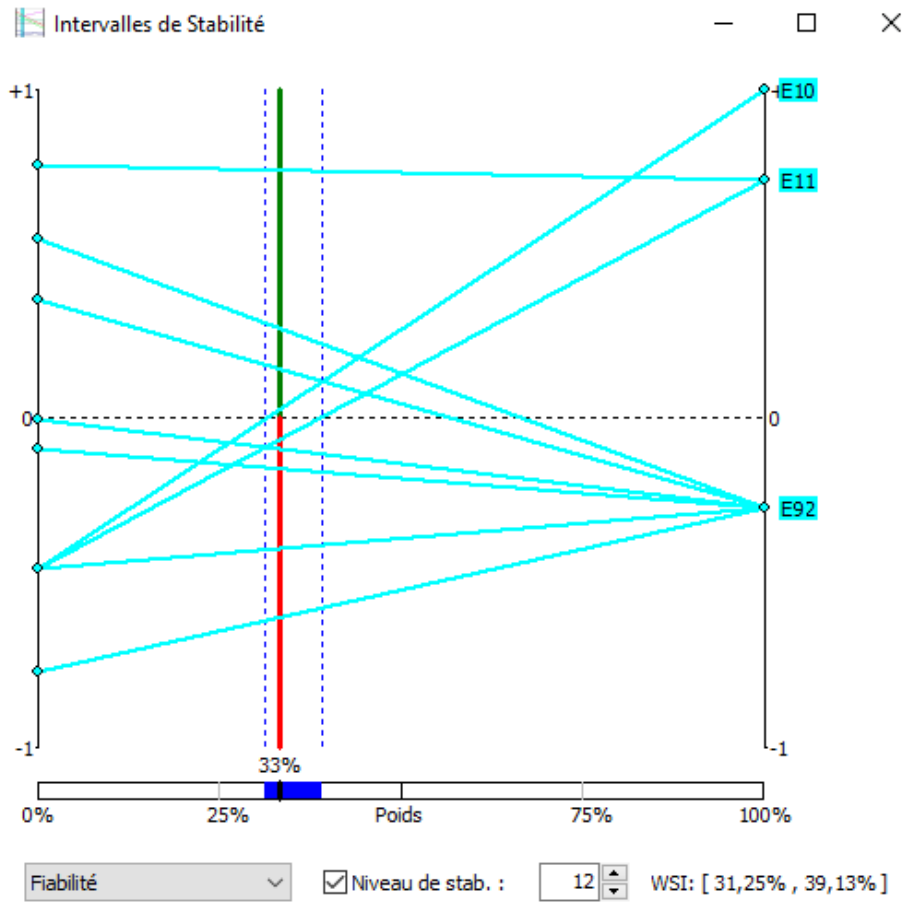


Figure 11. Intervalle de stabilité

On peut voir que le score E9 diminue lorsque le poids du critère fiabilité augmente, il est en effet fiable, tandis que le score de E10 augmente, il est moins fiable.

Lorsque la case à cocher « Niveau de stabilité » est cochée, deux lignes verticales en pointillés sont dessinées pour indiquer l'intervalle de poids dans lequel le haut du classement complet PROMETHEE II reste inchangé (WSI - intervalle de stabilité des poids). Le nombre d'actions prises en compte (niveau de stabilité) peut être réglé de 1 (action la mieux classée uniquement) au nombre d'actions actives (classement complet).

- **The Decision Maker Brain in the GAIA window:**

La fenêtre du cerveau du décideur est accessible en cliquant sur le bouton « Taille » sur le côté droit de la fenêtre GAIA. Ce bouton n'est actif que lorsque la case « voire le cerveau » est coché, Figure 11.

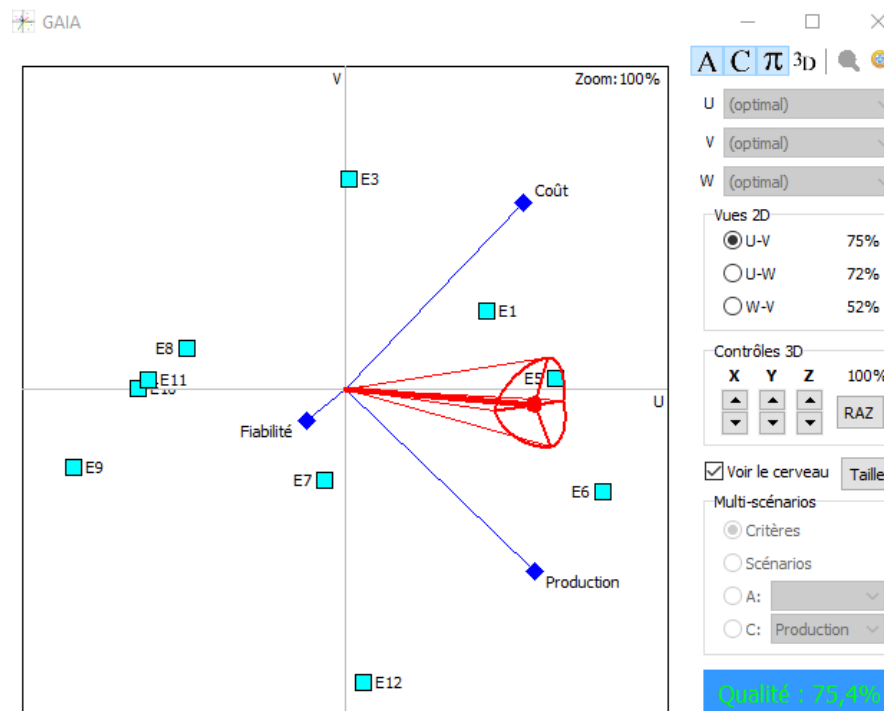


Figure 12. Plan GAIA

Trois informations différentes apparaissent dans le plan GAIA :

- Les actions sont représentées par des points.
 - Les critères sont représentés par des axes (bleu).
 - Les poids des critères sont représentés par l'axe de décision (rouge).
- La longueur d'un axe de critère est représentative de son pouvoir discriminant relatif :
- Tant que l'axe est plus long, le critère est plus discriminant.
 - La position des actions par rapport aux axes des critères indique la performance des actions sur les différents critères.

Considérons le critère coût dans notre cas. Ce qui est important, c'est la direction de l'axe correspondant :

L'axe des coûts est orienté vers la droite : Cela signifie que les actions situées à droite du plan GAIA sont mieux par rapport à l'axe de coût.

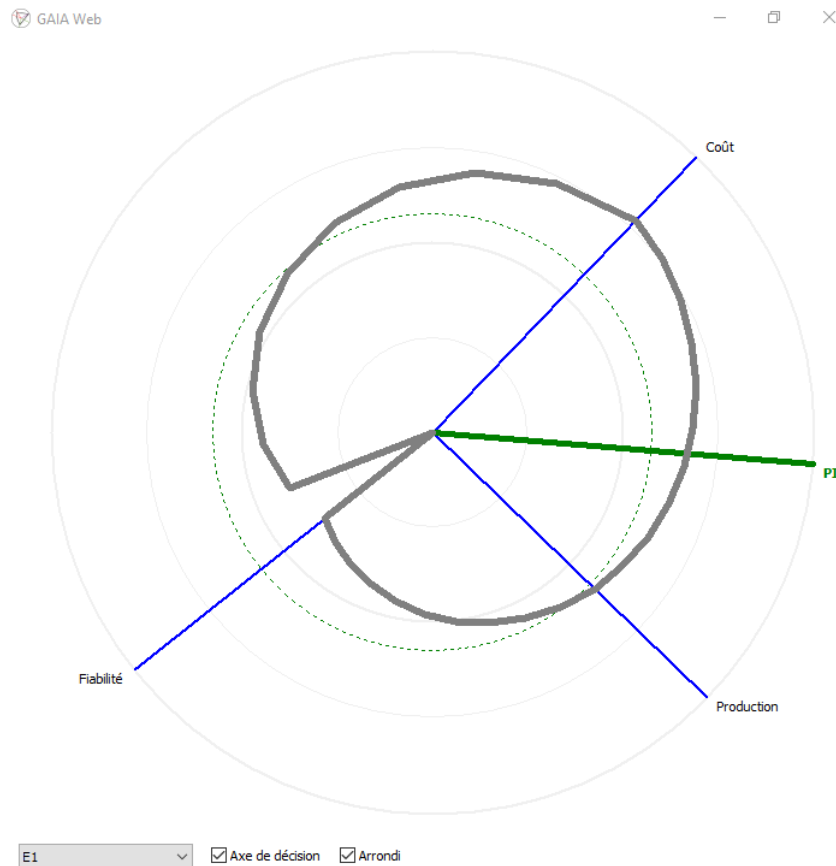


Figure 13. GAIA Webs de E1

Le GAIA Web est un affichage Web alternatif plus intelligent. Au lieu d'afficher les différents critères sous des angles arbitraires, les positions des axes des critères dans le plan GAIA sont utilisées comme référence. De cette façon, les critères qui sont fortement corrélés sont proches les uns des autres dans le Web GAIA et la forme Web est plus facile à comprendre.

- **The Balance of Power window for multiple scenarios:**

Le Balance of Power vous permet de changer facilement les poids des scénarios et de vérifier l'impact sur l'analyse, Figure 13.

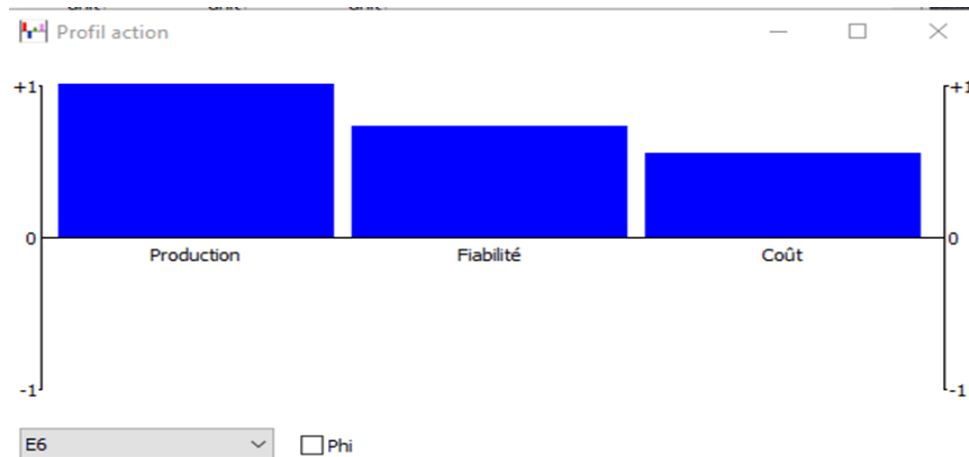


Figure 14. *Profil action*

A la Figure 14 on montre la représentation bidimensionnelle des flux d'entrée et de sortie. Une frontière « d'efficacité » est dessinée en rouge.

L'analyse Bank Adviser, Figure 15, permet d'évaluer une action par rapport à un ensemble d'actions de référence. Dans Visual PROMETHEE, l'ensemble de référence doit être une catégorie d'actions.

La fenêtre Bank Adviser contient deux zones :

- En haut se trouve le profil d'action : il s'agit du profil de l'action sélectionnée par rapport uniquement aux actions de l'ensemble de référence. Elle est donc différente de la fenêtre profil d'action où toutes les actions sont comparées les unes aux autres.
- En bas se trouve la règle : La règle montre l'échelle Phi (de -1,0 à + 1,0) et les positions de l'action sélectionnée (curseur large avec la valeur Phi et le rang de l'action indiqué en haut) et les actions de référence (barres plus fines, avec les actions de référence les plus proches indiquées sous la règle).

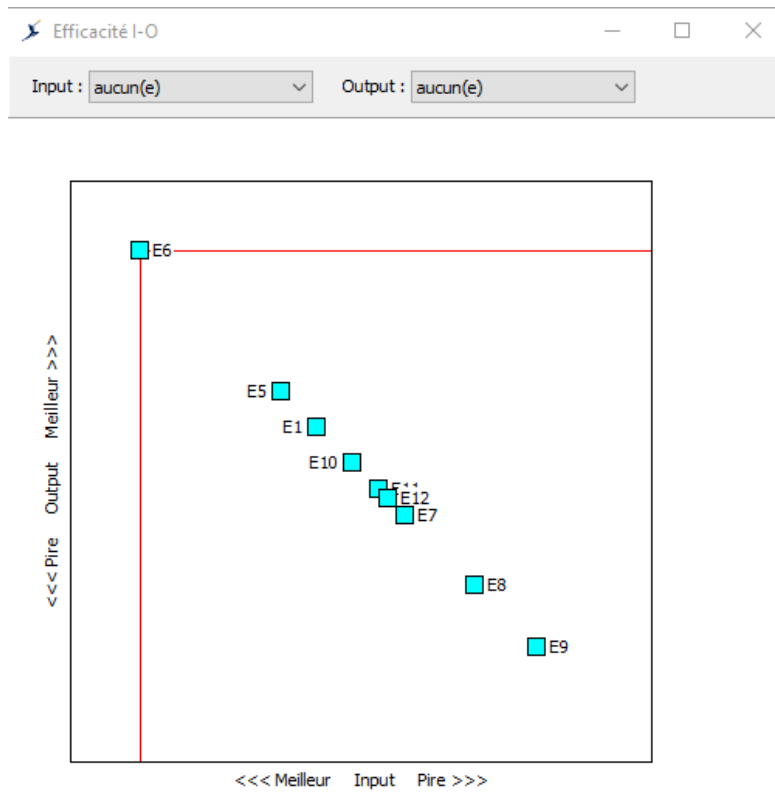


Figure 15. Efficacité

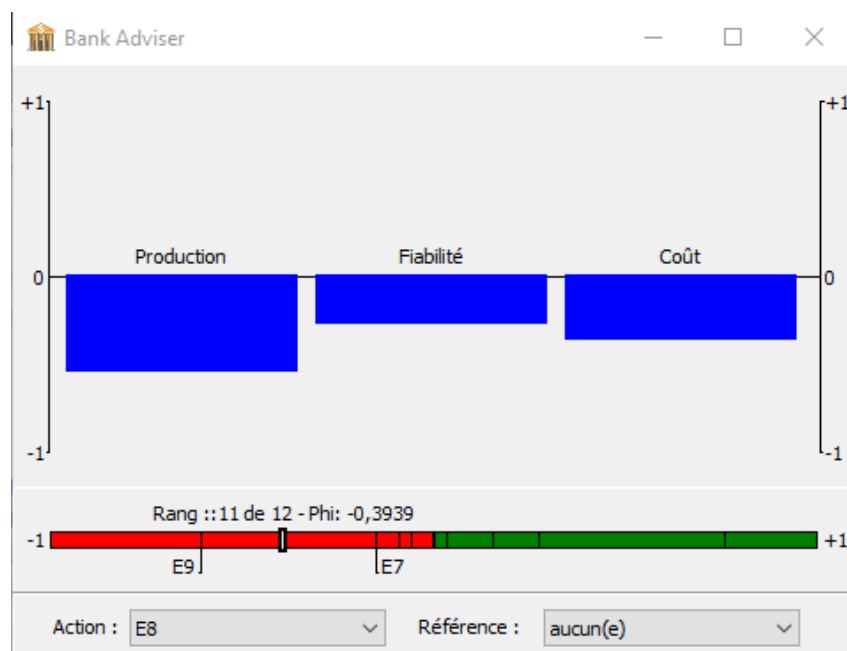


Figure 16. Bank Adviser

3 Etude de cas 2

Dans cette application, on a étudié une série d'équipements de l'entreprise « ORSIM-BCR », Société des Industries Mécaniques et Accessoires. ORSIM est une filiale du Groupe AGM et est implantée à Relizane, Oued Rhiou, spécialisée dans la fabrication et la commercialisation des produits de boulonnerie et visserie standard et spécifiques. Plus de 300 Equipements sont utilisés pour la fabrication de la gamme des produits (Installation de phosphatation, Presses à froid, Presses à chaud, Fileteuses, Tours de reprise, Installations de traitement de surface, Installations de traitements thermiques), (2016 ORSIM).

3.1 Données

Pendant notre stage pratique dans l'entreprise « ORSIM-BCR », on a collecté les informations et les données de 156 équipements appartenant à trois sections de l'usine (standard, spécifique et finition). Une partie de ces données brutes sont présentées dans le tableau 3.

TABLEAU/RECA ORSIM ,(Page -1 de 1

			H.March	IMP20	IMP22	IMP36	Capacité Disponible
			CAPACITE UT	PANNE	PANNE	MANQUE	ENERGIE
		D6418017 presse a double frappe c o h	543	0	68	0	875
		D6418018 presse a double frappe c o h	131	0	11	0	195
3605	5	D6418019 presse a double frappe c o h	8	0	0	0	8
		D6418021 presse a double frappe type: ch-11 m3-m6/long.6-60	8	0	0	0	15
3606	2	D6418023 presse a double frappe ch1h	15	0	0	0	23
3608	1	D6418025 presse a double frappe ch2l	67	0	0	0	90
360A	Total (H)		770	0	79	0	1 205
		D6278011 machine a fendre les l'tes de vis sima f1	108	0	0	0	121
3612	3	D6278013 mach.a f.tetes de vis sima f 1	750	6	0	0	853
360B	Total (H)		857	6	0	0	974
		D6278013 mach.a f.tetes de vis sima f 1	8	0	0	0	8
		D6433011 mach.a roul.filets sima rap7	90	0	27	0	150
		D6433012 mach.a roul.filets sima rap7	1 216	0	23	0	1 251
3615	2	D6433013 mach.a roul.filets sima rap7	203	0	0	0	222
3616	1	D6434023 mach.a roul.filets sima r10	8	0	0	0	8
3617	1	D6433015 mach.a roul.filets sima rap11	79	0	4	0	91
3619	1	D6434008 mach.a roul.filets sima r2	0	0	0	0	0
360C	Total (H)		1 603	0	53	0	1 728
3607	1	D6419031 presse a deux matrices triple frappe type: cf2 m5-m10	106	0	0	0	126
3703	1	D6420050 presse a 4 frap.s 2 nat.vis	1 062	0	107	9	1 827
		D6420021 presse a froid a quatre stations type: bka2 m6-12/lg1	942	31	116	6	1 535
3706	2	D6420022 presse a froid a quatre stations type: bka2 m6-12/lg1	506	8	138	2	1 199
3707	1	D6420095 presse a froid sacma sp 260	375	0	9	1	795
370A	Total (H)		2 989	38	370	17	5 481
		D6434035 automate a rouler les filets type:tr 4 pn m6-12/lg16-	1 232	3	70	0	1 702
3708	2	D6434036 automate a rouler les filets type:tr 4 pn m6-12/lg16-	934	0	78	0	1 463
		D6434031 automate a rouler filets tr6 pn6	1 663	17	303	0	2 643
3709	2	D6434033 automate a rouler filets tr6 pn6	2 216	11	540	1	3 462
3710	2	D6434081 autom.a rouler les filets w60 pn7	2 222	66	259	4	3 407
3711	1	D6370012 machine a appointer b 16	11	0	0	0	11
3713	1	D6434022 fileteuse automatique rap 20	1 558	5	50	0	2 289
3716	1	D6434100 machine a laminier les filet rp12	0	0	0	0	8
370B	Total (H)		9 835	102	1 300	5	14 982
3715	1	D6420090 presse fileteuse sacma sp 27 el	33	3	2	0	673
370C	Total (H)		33	3	2	0	673
3701	1	D6419021 pres.a 2 matr.tripl.frap.cf5	1 955	14	176	2	2 317
		D6420031 presse a 4 station bka 3	1 225	115	310	19	2 291
3705	2	D6420032 presse a 4 station bka 3	1 641	49	577	5	3 012
370D	Total (H)		4 820	177	1 062	26	7 620
		D6420041 presse transfert a quatre frappes type :wb 7 m12-m27	2 019	182	719	26	3 676
3702	2	D6420043 presse transfert a 4 frap.w7	2 570	53	542	11	3 919

Tableau 3. Données brutes (ORSIM-BCR, 2018)

3.2 Traitement des données

Parmi les 54 machines de la section standard on a choisi les 33 dont les données étaient complètes pour les hiérarchiser. Les critères retenus sont :

F : Fiabilité (CAPACITE UT)

M : Maintenabilité (IMP20+IMP22+IMP36)

U : Taux d'utilisation (CAPACITE UT/ capacité disponible)

Les données traitées sont ainsi introduites dans Visual PROMETHEE.

3.3 Analyse par Visual PROMETHEE

Nous introduisons dans Visual PROMETHEE les données traitées (Figure 17) où les critères F et U sont minimisés et M est maximisé.

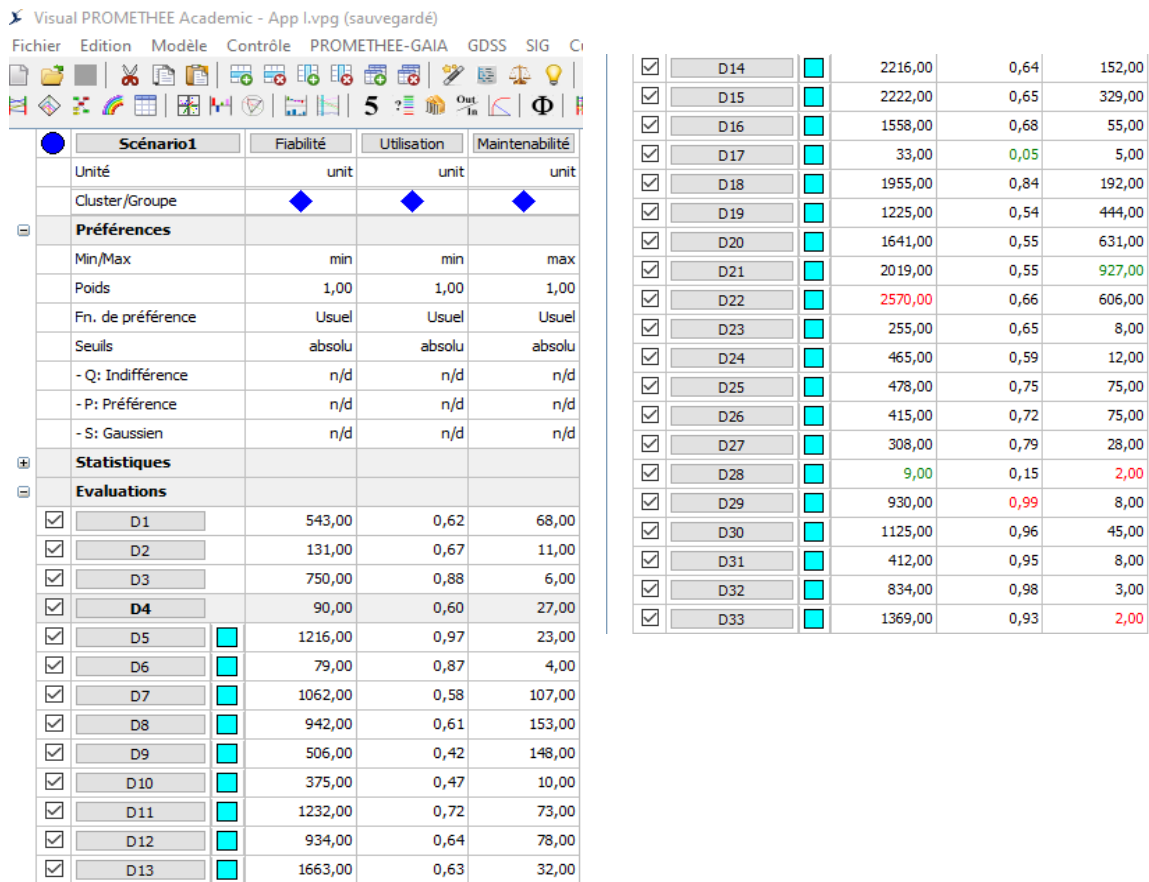


Figure 17. Evaluation des critères dans PROMETHEE.

3.3.1 Classement des équipements

Nous obtenons 28 classes en classant les ex-aequo : D17/D19 ; D7/D21 ; D14/D22 ; D6/D13 ; D11/D18, Figure18.

Rang	action	Phi	Phi+	Phi-
1	D9	0,5417	0,7708	0,2292
2	D17	0,3958	0,6979	0,3021
2	D19	0,3958	0,6979	0,3021
4	D4	0,3542	0,6771	0,3229
5	D20	0,3333	0,6667	0,3333
6	D28	0,3229	0,6563	0,3333
7	D10	0,3125	0,6563	0,3438
8	D8	0,2917	0,6458	0,3542
9	D7	0,2708	0,6354	0,3646
9	D21	0,2708	0,6354	0,3646
11	D1	0,2083	0,6042	0,3958
12	D24	0,1875	0,5938	0,4063
13	D12	0,1667	0,5833	0,4167
14	D26	0,1563	0,5729	0,4167
15	D2	0,0833	0,5417	0,4583
16	D25	0,0729	0,5313	0,4583
17	D23	0,0417	0,5104	0,4688
18	D27	0,0208	0,5104	0,4896
19	D15	-0,0417	0,4792	0,5208
20	D14	-0,0625	0,4688	0,5313
20	D22	-0,0625	0,4688	0,5313
22	D6	-0,1667	0,4167	0,5833
22	D13	-0,1667	0,4167	0,5833
24	D11	-0,1875	0,4063	0,5938
24	D18	-0,1875	0,4063	0,5938
26	D16	-0,2292	0,3854	0,6146
27	D31	-0,2708	0,3542	0,6250
28	D30	-0,3542	0,3229	0,6771
29	D3	-0,3958	0,3021	0,6979
30	D5	-0,4792	0,2604	0,7396
31	D29	-0,5208	0,2292	0,7500
32	D32	-0,5833	0,2083	0,7917
33	D33	-0,7188	0,1354	0,8542

Figure 18. Classement des équipements suivant la méthode PROMETHEE

3.3.2 Analyse Rainbow

L'analyse est présentée à la Figure 19.

- D9 ne présente aucune tranche négative car tous les critères contribuent positivement à son score de flux net. Cette action ne présente aucune faiblesse par rapport aux autres actions. C'est la plus critique.
- A l'opposé on trouve D33.
- Tandis que D15 présent une tranche équilibrée.
- Les autres actions ont des barres avec des tranches positives et négatives, elles sont meilleures sur certains critères et pires sur d'autres.

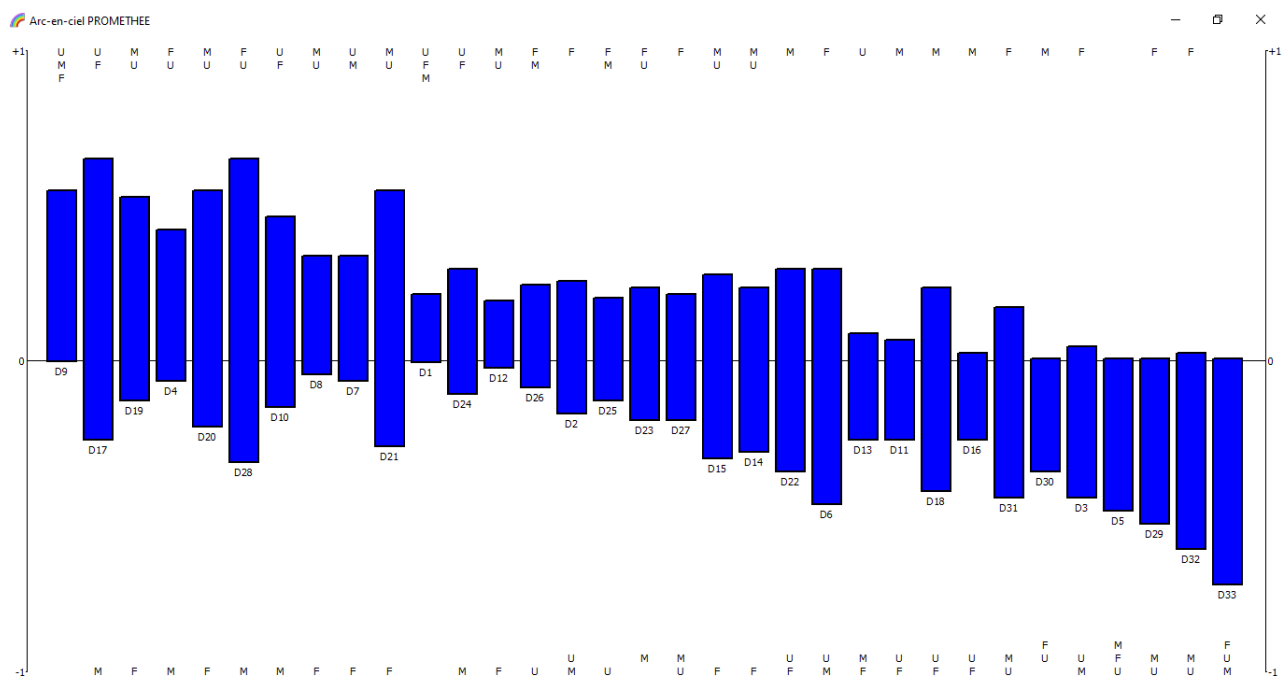


Figure 19. Arc-en-ciel PROMETHEE

3.3.3 Analyse de sensibilité

On présente l'analyse de sensibilité suivant le décideur maker brain dans GAIA window, Figure 20 et on discute les 7 équipements les plus critiques (20%).

- L'équipement D9 est plus critique sur le critère taux d'utilisation (U).
- Les équipements D19, D20 sont plus critique sur le critère maintenabilité (M).
- D4, D10, D17 et D28 sont plus critique sur le critère fiabilité (F)

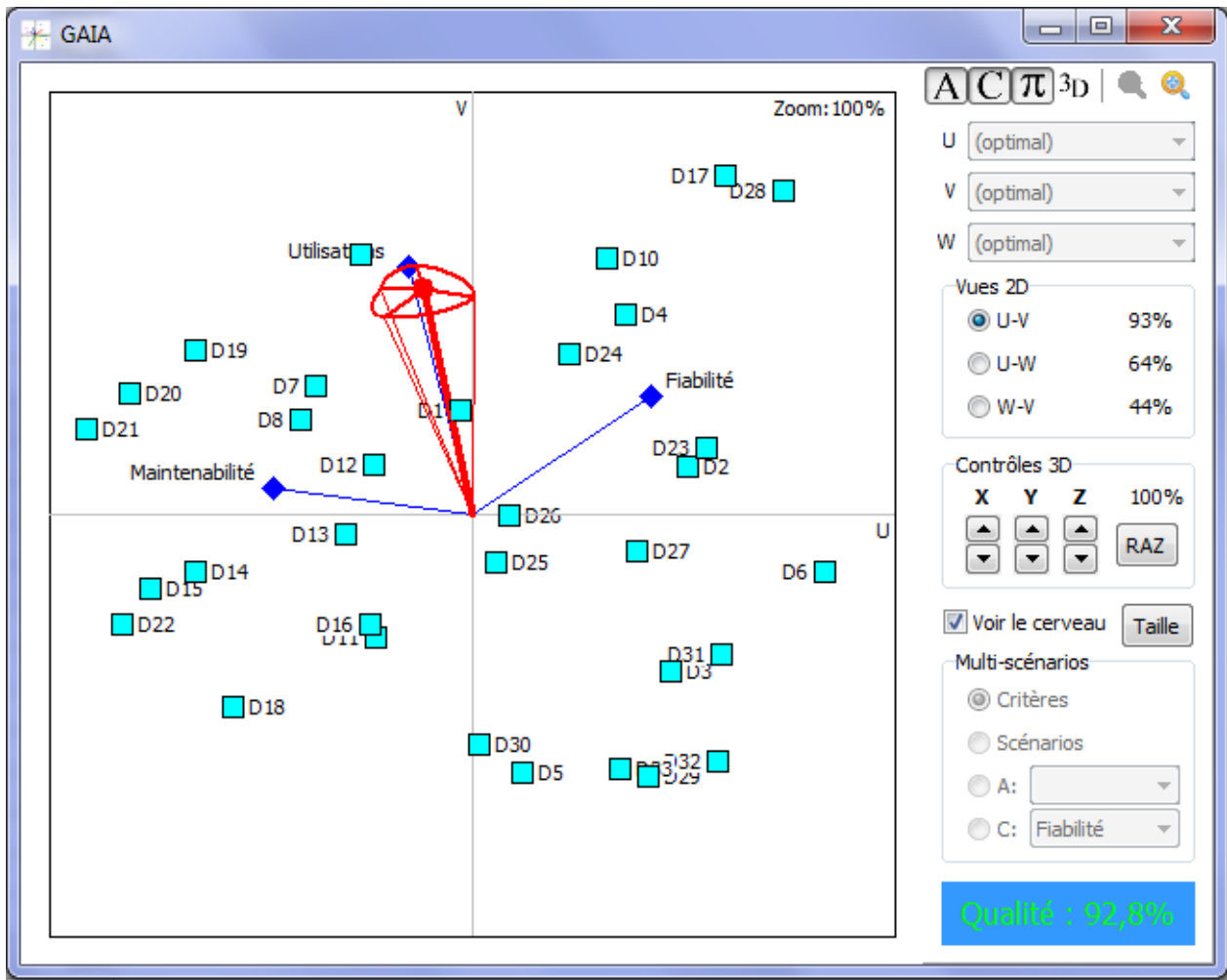


Figure 20. Analyse de sensibilité GAIA

Conclusion

Dans ce chapitre, nous mettons en application la méthode PROMETHEE à travers deux études de cas à l'aide du logiciel Visual PROMETHEE. La première étude a servi à valider la méthodologie que nous utilisons ainsi que la maîtrise de l'outil logiciel. Dans la seconde étude, nous avons étudié un cas industriel dont les données ont été récoltées lors de notre stage à l'entreprise « ORSIM-BCR ».

Conclusion générale

La maîtrise précise des équipements d'une installation industrielle constitue un préalable à toute démarche d'amélioration des actions de maintenance. Nous avons présenté une démarche centrée sur le concept d'agrégation multicritères pour la classification des équipements critiques.

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire peut se résumer en deux grandes étapes :

La première concerne l'étude bibliographique. Dans le premier chapitre nous avons dressé un aperçu sur les aspects de la Maintenance Basée sur la Fiabilité en général. On a identifié deux méthodes classiques (Pareto et matrice de criticité) ainsi que PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) parmi les méthodes d'analyse multicritère. Les deux méthodes classiques ont été étudié en détail dans le chapitre 2. Tandis que le chapitre 3 est consacré à l'étude de l'analyse multicritère de manière générale et plus particulièrement de la méthode de surclassement PROMETHEE. Cette méthode est recommandée dans les cas de hiérarchisation.

Dans la seconde étape on a appliqué la méthode PROMETHEE dans deux études de cas à l'aide du logiciel Visual PROMETHEE. La première nous a servi à maîtriser le logiciel et à valider la méthodologie. Dans la seconde application, nous avons hiérarchiser 33 équipements de la ligne standard de « ORSIM-BCR » à travers 3 critères sélectionnés (Fiabilité – Maintenabilité – Utilisation). On a fait apparaître les équipements les plus critiques dont les actions de maintenance devront être prioritaire.

Bibliographie

- Brans J, Mareschal B. PROMETHODS. 2014, p.164.
- Boutou O, Landy G, Saintvoirin B, AMDEC Guide pratique. AFNOR.
- Daniel R, Marc G, Denis M, Gaëtan B. Maintenance basée sur la fiabilité : un outil pour la certification. Paris,1996.
- Dakkak B, Chater Y, Talbi A. Proposition d'une matrice de criticité intégrant les systèmes Qualité, Sécurité et Environnement pour la fonction maintenance, novembre, 2012.
- Dab W, Dal J. P, Pont F, Fontaine D, Gaston J. L, Gustin O, Iddir A, Laurent Y, Mortureu X. Sécurité et gestion des risques. Techniques de l'Ingénieur.
- Houasnia, T. Pondération des taux de défaillance des équipements qui opèrent dans des milieux hostiles. Thèse de Mémoire, L'université du Québec à trois-rivières. 1999.
- John, M. RELiability-centred maintenance (éd. Second edition). Great Britain, 1997.
- Jung P, Paradinas P, Jouhaneau J, Villemin F-Y, Hajage D, Beaujard O, (S, d). Etude-méthodes-analyse-historique-maintenance-forage-pétrolier. (S.d.). Récupéré sur mémoire online.
- Koch, R. Praise for the 80/20 principle, 1998.
- Mareschal B. Agir dans des contextes complexes et conflictuels L'aide à la décision multicritère. Solvay Brussels School of Economics & Management.2014,
- Mareschal B. PROMETHEE METHODS. 2014, p25.
- Mareschal B. PROMETHEE METHODS. Université Libre de Bruxelles,2017, p 14.
- Mareschal B. PROMETHEE METHODS. Université Libre de Bruxelles.2017, p 15.
- Mareschal B.2018. <http://www.prometheegaia.net/FR/assets/preffunctions.pdf>.
- Mareschal B. PROMETHEE-GAIA Aide à la décision multicritère Logiciel Visual PROMETHEE Etude Targa-AIDE. 2019, mars. Récupéré sur [http : www.prometheegaia.net](http://www.prometheegaia.net).
- Mareschal B, Elhadouchi Mohamed. Handling missing values in discrete MCDA problems. 2015.
- Mareschal, B. Preference functions and thresholds.2018.
- Mareschal, B. PROMETHEE-GAIA : aide à la décision multicritère. Logiciel Visual PROMETHEE Etude Targa-AIDE. 2019, p15.

- Maity S. R, Chakraborty S. Tool steel material selection using PROMETHEE II method. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.2015, 78(9-12), 1537–1547. Doi :10.1007/s00170-014-6760-0.
- Noureddine R, Rais M, Benamar A, Noureddine F. Contribution à l'implantation de la MBF au sein du complexe industriel GL1Z. Avril 24-25 ,2011.
- Noureddine R, Benamar A, Noureddine F. Maintenance basée sur les modes de défaillance dominants. Application à une installation gazière. Octobre 19-21, 2009.
- Noureddine R, Noureddine M. Application du concept d'agrégation multicritères dans le processus de maintenance. Journal of Decision Systems.November,2012,319-329.
- Thiombiano T. La loi de Pareto : une loi sur l'inégalité ou sur la pauvreté ? réponses théorique et empirique. Décembre 1999.
- Taibi B. La méthode PROMETHEE comme outil d'aide à la décision multicritère. Université de Saida.Revue Algérienne d'Economie et de Management 2017, n° (09).
- Taibi, B. L'analyse multicritère comme outil d'aide à la décision : Application de la méthode PROMETHEE. Mémoire de Magistère, Université Aboud-Bekr-Telemcen.2009, p142.
- VPsolution. (2013, September 5). PROMETHEE METHODS, 1.4. Récupéré sur www.promethee-gaia.net.
- Waaub J, P. Aide multicritère à la décision. Comme outil de mise en œuvre de l'ÉE.École d'été SIFEE-IEPF, (2012).
- Yves, M. La sûreté de fonctionnement : méthodes pour maîtriser les risques. Technique de l'ingénieur, 75019Paris-techniques de l'ingénieur. 2012.
- Yousfi N, Medjoudj R, Iberraken F. Optimisation de la maintenance par la fiabilité. Mémoires, Université de Bejaia, diplôme de master en électromécanique. (2013/2014).
- Zwingelstein, G. La maintenance basée sur la fiabilité : guide pratique d'application de la RCM. Paris,1996.