

Faculté des sciences économiques, commerciales et des sciences de gestion

THESE

Présentée pour l'obtention du **grade de DOCTEUR EN SCIENCES**

En : sciences économiques.

Spécialité : Recherche opérationnelle et management des entreprises

Par : BELARIBI Fatima Zohra.

Utilisation des méthodes d'aide multicritère à la décision dans la gestion des ressources en eau : Application de la méthode PROMETHEE à la sélection d'un procédé de dessalement de l'eau de mer.

Soutenue publiquement, le : 27 / 06/ 2021 , devant le jury composé de :

Mr B. SENOUCI	Professeur	Ecole supérieure d'Oran.	Président.
Mr A.BENHABIB	Professeur	Univ. Tlemcen	Directeur de thèse.
Mr A.KHELID	Professeur	Univ. Alger3	Examinateur.
Mr A.SMAHI	Professeur	Univ. Tlemcen	Examinateur.
Mr M. TERBECH	Maitre de conférences	Univ. Maghnia	Examinateur.
Mme W.BERRACHED	Maitre de conférences	Univ. Tlemcen	Examinatrice.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail A la mémoire De Mon frère

Dr BELARIBI Mouhammed.

Remerciements

Je remercie le bon Dieu le tout puissant qui m'a donné la force, le courage et la volonté d'aller jusqu'au bout de cette thèse.

En tout premier lieu, je tiens à remercier très chaleureusement le Professeur **BENHABIB Abderrazak**, mon directeur de thèse, de m'avoir donné l'opportunité de réaliser cette thèse dans un cadre de recherche de haut niveau et d'avoir encadré cette recherche. Merci pour votre confiance, votre disponibilité durant ces années et votre rigueur scientifique, votre patience et vos précieux conseils ont permis à ce travail d'aboutir. Je vous témoigne ici toute ma reconnaissance.

Je présente du plus profond de mon cœur mes remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui m'ont aidée à réaliser ce travail, entre autres ma famille en particulier mes chers parents qui m'ont beaucoup encouragée, mes sœurs, mon frère, mes professeurs et mes enseignants qui ont contribué à ma formation et mes amis (es) Ainsi que toutes les personnes des différents organismes contactés dans le cadre de mes investigations.

Résumé

L'Algérie a vécu plus d'une décennie la sécheresse, les ressources conventionnelles en eau étaient insuffisantes pour subvenir aux besoins de la population, ceux qui ont incité les autorités algériennes à chercher d'autres ressources pour garantir l'alimentation en eau potable de cette population. La solution la plus adaptée et qui ne dépend pas des aléas climatiques, était le dessalement d'eau de mer. Parmi les stations de dessalement nouvellement construites (2012), la station de dessalement de Honaine (wilaya de Tlemcen) d'une capacité de 200000 m³/jour ; et utilisant la technologie de l'osmose inverse. Le coût énergétique du procédé de dessalement d'osmose inverse représente jusqu'à 50 % du coût du mètre cube d'eau produite. La réduction de la consommation spécifique d'énergie est un enjeu majeur afin de satisfaire la demande croissante avec meilleure qualité et à moindre coût. Le recours aux autres procédés de dessalement est devenu indispensable comme le procédé de Multi Stage Flash distillation (MSF), le Multi Effets Distillation (MED), la compression du vapeur (Vapor Compression) (VC) et l'électrodialyse(ED)..etc., Cependant, pour faire le choix du procédé adéquat pour la station de dessalement de Honaine, on fera recours aux méthodes d'aide à la décision multicritères (MCDA) qui présentent la meilleure manière pour ce genre de problématique (Classement et Choix) et qui ont marqué leurs efficacités dans la matière de prise de décision.

Dans cette thèse, un nouveau groupe de méthode d'aide à la décision multicritère est introduit : Méthodes PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation), c'est parmi les méthodes MCDA récemment développées qui ont reçu beaucoup d'attention au cours des dernières années en raison de leurs capacités à classer un ensemble fini d'alternatives basées sur des critères contradictoires.

La comparaison des procédés de dessalement était basée sur divers critères environnementaux, techniques et économiques. Le logiciel *Visual-Promethee* a été aussi utilisé pour analyser la structure du processus de sélection, pour déterminer les poids des critères et pour calculer le classement final des procédés.

Les résultats obtenus indiquent que l'ED était la technologie la plus adéquate pour la station sélectionnée et ont classé l'utilisation d'électrodialyse, osmose inverse, compression de vapeur, distillation à effets multiples et flash à plusieurs étages dans l'ordre décroissant de priorité. De plus, l'analyse de sensibilité a montré que la variation des poids des critères n'affecte pas le résultat du modèle.

Mots clés : Aide multicritère à la décision – Méthode PROMETHEE – gestion des ressources en eau - dessalement de l'eau de mer – procédés de dessalement d'eau de mer – Station de dessalement HONAINE, Tlemcen.

Abstract

Algeria has lived more than a decade drought, conventional water resources were insufficient to meet the needs of the population, those who urged the Algerian authorities to seek other resources to ensure drinking water supply of this population. The most suitable solution, which does not depend on climatic hazards, was seawater desalination. Among the newly built desalination plants (2012), the Honaine desalination plant (Tlemcen wilaya) with a capacity of 200000 m³ / day; and using Reverse Osmose (RO) technology. The energy cost of the RO desalination process represents up to 50% of the cost per cubic meter of water produced. The reduction of the specific energy consumption is a major stake in order to satisfy the growing demand with better quality and at a lower cost. The use of other desalination processes has become indispensable, such as multi-stage flash distillation (MSF), multi-effects distillation (MED), vapor compression (VC) and electro dialysis (ED). etc., However, to make the choice of the appropriate process for the desalination plant in Honaine, multi-criteria decision support methods (MCDA) will be used which present the best way for this kind of problem (Ranking and Choice) and who have marked their efficiency in decision-making.

In this thesis, a new multicriteria decision support method group is introduced: PROMETHEE Methods (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation), this is among the recently developed MCDA methods that have received a lot of attention in recent years. past years because of their ability to categorize a finite set of alternatives based on conflicting criteria.

The comparison of desalination processes was based on various environmental, technical and economic criteria. Visual-Promethee software was also used to analyze the structure of the selection process, to determine the weights of the criteria and to calculate the final ranking of the technologies.

The results obtained indicate that ED was the most technology for the selected station and classified the use of electro dialysis, reverse osmosis, vapor compression, multi-effect distillation, and multi-stage flash in descending order of priority. In addition, the sensitivity analysis showed that the variation of the weights of the criteria does not affect the result of the model.

Keywords: Multi-Criteria Decision Aid (MCDA) – PROMETHEE - water resources management - Desalination – Desalination Process – desalination plant of HONAINÉ, Tlemcen.

ملخص

قد عانت الجزائر من الجفاف لأكثر من عقد من الزمان، ولم تكن الموارد المائية التقليدية كافية لتلبية احتياجات السكان، الأمر الذي حث السلطات الجزائرية على التماس موارد أخرى للمياه. إن أفضل الحلول التي لا تتأثر بالتقلبات والمخاطر المناخية هي تحلية مياه البحر، ومن بين محطات التحلية التي تم بناؤها حديثاً (2012) محطة تحلية هونين (ولاية تلمسان) بطاقة انتاجية قدرها 200000 م³/اليوم من المياه؛ والتي تستخدم طريقة التناضح العكسي في عملية تحلية المياه، وتمثل تكلفة الطاقة في عملية تحلية المياه بالتناضح العكسي ما يصل إلى 50٪ من التكلفة الاجمالية لكل متر مكعب من المياه المنتجة. إن الحد من استهلاك الطاقة في عملية تحلية المياه هو تحد رئيسي من أجل تلبية الطلب المتزايد مع نوعية أفضل وبتكلفة أقل. ولذلك أصبح اللجوء الى تقنيات أخرى لتحلية المياه أمراً ضرورياً، مثل تقنية التقطير السريع متعدد المراحل MSF وتقنية التقطير متعدد التأثيرات MED وتقنية الضغط البخاري، والتقنية الكهربائية... الخ

ولاختيار التقنية المناسبة لمحطة تحلية المياه في هونين سنقوم باستخدام أساليب دعم القرار متعدد المعايير والتي تعتبر أفضل وسيلة لهذا النوع من المشاكل (الترتيب والاختيار) والتي تتميز بكفاءتها في المساعدة في اتخاذ القرار.

في هذه الأطروحة، يتم تقديم مجموعة جديدة من أساليب دعم اتخاذ القرار متعدد المعايير: طرق PROMETHEE وهي من بين الأساليب التي وضعت مؤخراً والتي تلقت الكثير من الاهتمام في السنوات الماضية بسبب قدرتها على تصنيف مجموعة محدودة من البدائل على أساس معايير متضاربة.

واستندت المقارنة بين عمليات تحلية المياه إلى معايير بيئية وتقنية واقتصادية مختلفة، واستخدم برامجي visual PROMETHEE للقيام بعملية الاختيار وتحديد أوزان المعايير وإيجاد الترتيب النهائي لتقنيات تحلية المياه.

وتشير النتائج المتوصل إليها إلى أن تقنية ED كانت التقنية الأكثر قابلية للتطبيق للمحطة المختارة، وكان الترتيب كما يلي: التقنية الكهربائية ED ثم تقنية التناضح العكسي RO ثم تقنية الضغط البخاري VC ثم تقنية التقطير متعدد التأثيرات MED و في الأخير تقنية التقطير السريع متعدد المراحل MSF. وبالإضافة إلى ذلك، أظهر تحليل الحساسية أن الاختلاف في أوزان المعايير لا يؤثر بشكل كبير على نتيجة النموذج.

الكلمات المفتاحية: طرق اتخاذ القرار متعددة المعايير - طريقة PROMETHEE - إدارة الموارد المائية - تقنيات تحلية المياه - محطة تحلية المياه هونين، تلمسان

Table des matières

Table des matières.

Table des matières détaillée.

Table des figures.

Liste des tableaux.

Liste des abréviations, des sigles et des acronymes.

Introduction générale.

Partie 01 : LA PRISE DE DECISION MULTI-CRITERE.

Chapitre 01 : L'aide multicritère à la décision

Chapitre 02 : Les méthodes d'aide à la décision multicritère

Chapitre 03 : Les méthodes PROMETHEE

Partie 02 : LA GESTION DES RESSOURCES EN EAU ET LE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER.

Chapitre 04 : La gestion des ressources eau.

Chapitre 05 : Le dessalement de l'eau de mer.

Chapitre 06 : Les procédés de dessalement de l'eau de mer.

Partie 03 : SELECTION DUN PROCEDE DE DESSALEMENT DE LEAU DE MER AVEC PROMETHEE. : Etude de cas

Chapitre 07 : Etat des lieux des ressources en eau dans la wilaya de Tlemcen.

Chapitre 08 : la station de dessalement de « Honaine » Tlemcen

Chapitre 09 : Application de la méthode PROMETHEE

CONCLUSION GENERALE.

Références bibliographiques.

Annexes.

Table des matières détaillée

Table des matières	07
Table des matières détaillée	08
Table des figures.	13
Liste des tableaux.	15
Liste des abréviations, des sigles et des acronymes.	16
INTRODUCTION GENERALE	
1. Intérêt du sujet.	18
2. La problématique.	19
3. L'hypothèse.	20
4. Recherches antérieures.	20
5. Méthodologie du travail	21
6. Plan du travail.	21
Partie 01 : LA PRISE DE DECISION MULTI-CRITERE	
Chapitre 01 : L'aide multicritère à la décision.	24
1. Introduction.	25
2. Histoire de l'approche multicritère à la décision	25
3. Définition de l'aide multicritère à la décision.	26
4. Principe général d'analyse multicritère.	27
5. Concepts et Terminologie.	29
5.1. Le décideur et l'analyste.	29
5.2. Les alternatives et les critères.	30
5.2.1. Les alternatives, les objectifs et les attributs	30
5.2.2. Les critères.	30
5.2.2.1. Les différents types de critères.	31
5.2.2.2. Les propriétés des critères.	32
6. Les différentes problématiques multicritères.	32
6.1. Problématique du choix.	33
6.2. Problématique du tri.	34
6.3. Problématique de rangement.	35
6.4. Problématique de la description.	36
7. Conclusion.	37
Chapitre 02 : Les méthodes d'aide à la décision multicritère.	38
1. Introduction.	39
2. Classement des méthodes multicritères	39
3. Méthodes de l'approche du critère unique de synthèse.	40
3.1. Méthode SMART.	40
3.2. Méthodes MAVT.	40
3.3. Méthodes MAUT.	41
3.4. Méthode AHP (Analytic Hierarchy Process).	42
3.5. Méthode TOPSIS.	44
3.6. Méthode UTA.	44
3.7. Méthode EVAMIX.	45
4. Les méthodes de surclassement.	46
4.1. Les Méthodes ELECTRE.	47

4.1.1. ELECTRE I.	47
4.1.2. ELECTRE II.	48
4.1.3. ELECTRE III.	49
4.1.4. ELECTRE IS	50
4.1.5. ELECTRE IV	50
4.1.6. ELECTRE TRI.	51
4.2. Les méthodes PROMETHEE.	52
4.3. Critique des méthodes de surclassement.	52
5. Les méthodes interactives.	53
6. Synthèse des trois familles de méthodes d'aide à la décision multicritère.	53
7. Les limites des méthodes multicritères.	55
8. Croissance des articles appliquant les MCDM dans la gestion de l'eau.	55
9. Les Méthodes de MCDM appliquées dans la gestion de l'eau	56
10. Domaines d'application des méthodes MCDM.	56
11. Distribution par revues des articles MCDM appliqués dans la gestion de l'eau.	57
12. Conclusion	58
Chapitre 03 : Les méthodes PROMETHEE.	59
1. Introduction.	60
2. Aperçu historique des méthodes PROMETHEE.	60
3. Principe des méthodes PROMETHEE.	61
4. Les étapes des méthodes PROMETHEE.	61
4.1. Les fonctions de préférence.	61
4.1.1. Choix des fonctions de préférence.	62
4.1.2. Choix des paramètres relatifs aux fonctions de préférence.	65
4.2. Les poids des critères.	65
4.3. Evaluation des préférences.	65
5. PROMETHEE I.	66
6. PROMETHEE II.	67
7. PROMETHEE III	68
8. PROMETHEE IV.	69
9. PROMETHEE V.	69
10. Sélection de PROMETHEE Software	70
11. Avantages et inconvénients des méthodes Prométhée.	72
11.1. Les avantages.	72
11.2. Les inconvénients.	73
12. Applications récentes de PROMETHEE en gestion des ressources en eau.	73
13. Conclusion.	74
Partie 02 : LA GESTION DES RESSOURCES EN EAU ET LE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER.	
Chapitre 04 : La gestion des ressources eau.	76
1. Introduction.	77
2. Les ressources en eau.	77
2.1. Les ressources renouvelables en eau douce.	78
2.2. Les eaux conventionnelles.	78
2.2.1. Les ressources conventionnelles renouvelables.	78
2.2.2. Les ressources conventionnelles non renouvelables.	78

2.3. Les eaux non- conventionnelles.	78
3. La gestion des ressources en eau dans le monde.	79
3.1. Répartition des ressources en eau dans le monde.	80
3.2. Usages et pollution des eaux douces dans le monde.	81
3.3. Problèmes et défis auxquels sont confrontés les gestionnaires de L'eau.	82
4. La gestion intégrée des ressources en eau.	83
5. La gestion des ressources en eau en Algérie.	83
5.1. Stratégies pour remédier aux problèmes de gestion de l'eau en Algérie.	84
6. Conclusion.	85
Chapitre 05 : Le dessalement de l'eau de mer.	86
1. Introduction.	87
2. Histoire de dessalement.	87
3. Définition du dessalement de l'eau de mer.	88
4. Caractéristiques des eaux marines et saumâtres	89
4.1. Les eaux marines.	89
4.2. Les eaux saumâtres.	89
5. Etapes de dessalement de l'eau de mer.	90
5.1. Captation d'eau de mer.	90
5.2. Le prétraitement.	92
5.3. Procédé de dessalement.	92
5.4. Le post traitement ou minéralisation.	92
6. Impacts environnementaux du dessalement.	93
7. Situation du dessalement dans le monde.	94
7.1. La répartition géographique et les principales régions concernées.	95
8. Situation du dessalement en Algérie.	96
8.1. Les stations de dessalement en Algérie.	97
8.2. Importance du dessalement de l'eau de mer pour l'Algérie.	99
9. Conclusion.	100
Chapitre 06 : Les procédés de dessalement de l'eau de mer.	101
1. Introduction.	102
2. Les différents procédés de dessalement.	102
3. Le classement des différents procédés	103
4. Procédés de distillation.	104
4.1. La distillation.	104
4.2. Principe de la distillation	105
4.3. Distillation à simple effet.	106
4.3.1. Principe.	106
4.4. Distillation à mul.les effets (MED)	106
4.4.1. Principe.	107
4.4.2. Avantages du Multiple effets.	108
4.4.3. Inconvénients du Multiple effet.	108
4.5. Distillation par détente successive ou procédé 'Flash' MSF	108
4.5.1. Principe.	108
4.5.2. Avantages du MSF.	109
4.5.3. Inconvénients du MSF.	109
4.6. Distillation avec compresseur de vapeur (VC).	109
4.6.1 Principe.	109
4.6.2 Avantages et inconvénients de la compression de vapeur.	110

4.7. Distillation solaire.	111
4.7.1. Principe.	111
4.7.2. Avantages.	111
4.7.3. Inconvénients.	112
4.8. Avantages et Inconvénients des procédés de distillation.	112
5. Procédés à membranes	113
5.1. L'électrodialyse (ED).	113
5.1.1. Principe.	113
5.1.2. Avantages.	113
5.1.3. Inconvénients.	114
5.2. L'osmose inverse (RO).	114
5.2.1. Principe du (RO)	114
5.2.2. Avantages de l'osmose inverse.	115
5.2.3. Inconvénients de l'osmose inverse.	115
6. Autres procédés de dessalement.	116
6.1. Echange ionique.	116
6.2. Dessalement par congélation.	116
6.2.1. Principe.	116
6.2.2. Inconvénients.	117
7. Comparaison des différents procédés de dessalement.	117
8. Conclusion.	120
Partie 03 : SELECTION DUN PROCEDE DE DESSALEMENT DE LEAU DE MER AVEC PROMETHEE. : Etude de cas.	
Chapitre 07 : Etat des lieux des ressources en eau dans la wilaya de Tlemcen.	122
1. Introduction	123
2. Description de la région d'étude (wilaya de Tlemcen).	123
2.1. Situation géographique.	123
2.2. Population et activités.	124
2.3. Caractéristiques hydrologiques de la ville de Tlemcen.	125
2.3.1. Les sous bassins versants.	125
2.3.2. Le réseau hydrographique du GUT.	125
3. Les travaux réalisés en matière de mobilisation des ressources en eau à Tlemcen	125
4. Conclusion.	126
Chapitre 08 : la station de dessalement de « Honaine » Tlemcen.	127
1. Introduction	128
2. Présentation de la station de dessalement de 'Honaïne'.	128
2.1. Situation géographique.	129
2.2. Caractéristiques de l'eau de mer	129
2.3. Principales caractéristiques de fonctionnement de la station de dessalement de Honaine.	130
3. Processus du dessalement appliqué dans la station du dessalement de Honaïne.	131
3.1. Phase de Captation d'eau de mer et de pompage.	132
3.2. Phase de filtration (prétraitement).	133
3.2.1. Le pré-traitement chimique.	134
3.2.1. Le pré-traitement physique.	136
3.3. Phase de procédé de dessalement.	141
3.4. Phase de reminéralisations (post traitement).	141

3.5. Pompage de l'eau dessalée.	142
4. Conclusion.	142
Chapitre 09 : Application de la méthode PROMETHEE.	143
1. Introduction.	144
2. Complexités dans la sélection de la technologie de dessalement.	144
3. Contexte de décision : identification des alternatives et critères de décision.	144
3.1. Identification des alternatives.	144
3.2. Les principaux critères d'évaluation : Critères de choix d'un procédé de dessalement.	145
4. Collecte des données et matrice dévaluation.	147
5. Choix et justification de la méthode de résolution.	148
6. Application de PROMETHEE sur les procédés de dessalement.	148
6.1. Estimation des poids des critères.	149
6.2. Fonction de préférence pour chaque critère.	150
6.3. Implémentation du Visual PROMETHEE	156
6.3.1. Le logiciel Visual PROMETHEE.	156
6.3.2. Application du logiciel Visual-Promethee 1.4 Academic Edition.	156
6.3.2.1. Les poids des critères.	158
6.3.2.2. Les flux de préférences Φ^+ Φ^- Φ .	159
6.3.2.3. Classement partiel du Visual PROMETHEE 1.4 Academic Edition.	160
6.3.2.4. Classement complet du Visual PROMETHEE 1.4 Academic Edition.	161
6.3.2.5. Diamant PROMETHEE.	162
6.3.2.6. Graphe PROMETHEE	163
6.3.2.7. Arc-en-ciel PROMETHEE.	163
6.3.2.8. Analyse de performance efficacité.	164
6.3.2.9. Le plan GAIA.	165
6.3.3. Discussion des résultats.	169
6.3.4. Analyse de sensibilité.	169
7. Conclusion.	180
CONCLUSION GENERALE	
1. Conclusion.	182
2. Perspectives.	183
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE	
Bibliographie.	185
Webographie.	192
ANNEXES	
ANNEXE 01 : Exemple sur la méthode PROMETHEE.	193

Tables des figures

Figure 1.1.1 : Principe générale d'analyse multicritère.

Figure 1.1.2 : La problématique du choix.

Figure 1.1.3 : La problématique du tri.

Figure 1.1.4 : La problématique du rangement.

Figure 1.2.1 : Croissance des articles appliquant les MCDM dans la gestion de l'eau (2000-2017).

Figure 1.2.2 : Distribution des articles MCDM par méthodes appliquées dans la gestion de l'eau (2000 et 2017).

Figure 1.2.3 : Répartition des méthodes MCDM par domaine d'application (2000 et 2017).

Figure 1.2.4 : Liste des revues ayant publiées sur les méthodes MCDM appliquées dans la gestion de l'eau (2000 et 2017).

Figure 1.3.1 : les étapes du PROMETHEE.

Figure 1.3.2 : Les six types de critères.

Figure 2.4.1 : la disponibilité en eau douce par état en 2007.

Figure 2.5.1 : Production d'eau douce par condensation sur une éponge.

Figure 2.5.2 : Schéma d'une station de dessalement.

Figure 2.5.3 : Grilles de prise d'eau.

Figure 2.5.4 : Puit côtier.

Figure 2.5.5 : Prise d'eau mobile.

Figure 2.5.6 : Capacités de dessalement dans le monde.

Figure 2.5.7 : Le dessalement par pays.

Figure 2.5.8 : Répartition mondiale de la production d'eau de dessalement.

Figure 2.5.9 : le dessalement de l'eau de mer en Algérie.

Figure 2.6.1 : Les différents procédés de dessalement.

Figure 2.6.2 : procédés de dessalement selon le principe sur lequel ils se basent.

Figure 2.6.3 : procédés de dessalement selon le type d'énergie consommée.

Figure 2.6.4 : Principe de la distillation simple.

Figure 2.6.5 : Principe de la distillation à simple effet

Figure 2.6.6 : Principe de la distillation à multiples effets.

Figure 2.6.7 : Procédé de dessalement par distillation multi flash MSF.

Figure 2.6.8 : Procédé de dessalement par compression de vapeur.

Figure 2.6.9 : Principe de distillation solaire.

Figure 2.6.10 : Principe des phénomènes d'osmose et d'osmose inverse.

Figure 3.7.1. Situation géographique de la wilaya de Tlemcen.

Figure 3.8.1 : Photo de la station de dessalement de Honaine.

Figure 3.8.2 : Schéma générale de la station de Honaine.

Figure 3.8.3: Schéma des étapes de traitement à la station de dessalement de Honaine.

Figure 3.8.4 : Le captage de l'eau de mer.
Figure 3.8.5 : Photo du bloc de pompes de captation.
Figure 3.8.6: Photo d'une citerne de stockage d'hypochlorite de Sodium.
Figure 3.8.7: photo de la citerne de stockage de chlorure ferrique.
Figure 3.8.8 : Photo des citernes de stockage du métabisulfite de sodium.
Figure 3.8.9: Schéma de l'étape de filtration.
Figure 3.8.10 : filtres à sables et anthracite (Station de dessalement-Honaïne).
Figure 3.8.11 : filtres à cartouches au niveau de la station (Station de dessalement-Honaïne).
Figure 3.8.12: Photo du bloc d'osmose inverse.

Figure 3.9.1 : Fenêtre de création d'un nouveau problème.
Figure 3.9.2 : Fenêtre de Visual-Promethee après remplir la matrice d'évaluation.
Figure 3.9.3 : Fenêtre des poids des critères.
Figure 3.9.4 : Fenêtre des flux positives et négatives et nets.
Figure 3.9.5 : Fenêtre du classement partiel de PROMETHEE.
Figure 3.9.6 : Fenêtre du classement complet de PROMETHEE.
Figure 3.9.7: Fenêtre du Diamant PROMETHEE pour les techniques de dessalement.
Figure 3.9.8 : Fenêtre du Graphe PROMETHEE pour les techniques de dessalement.
Figure 3.9.9 : Fenêtre d'Arc-en-ciel PROMETHEE pour les techniques de dessalement.
Figure 3.9.10 : Fenêtre d'analyse de performance efficacité pour les techniques de dessalement.
Figure 3.9.11: Fenêtre du plan GAIA pour les techniques de dessalement.
Figure 3.9.12 : Fenêtre GAIA web pour la technique (ED).
Figure 3.9.13 : Fenêtre de changement des poids [walking weights] .
Figure 3.9.14 : fenêtre de l'intervalle de stabilité pour le critère C1.
Figure 3.9.15: Fenêtre intervalle de stabilité pour le critère salinité de l'eau produite.
Figure 3.9.16 : Fenêtre intervalle de stabilité pour le critère cout de l'investissement.
Figure 3.9.17: Fenêtre intervalle de stabilité pour le critère cout de la maintenance.
Figure 3.9.18: Fenêtre intervalle de stabilité pour le critère cout de la maintenance.
Figure 3.9.19 : Fenêtre intervalle de stabilité pour le critère degré de complexité.
Figure 3.9.20 : Fenêtre intervalle de stabilité pour le critère acceptation de la technologie du dessalement.
Figure 3.9.21 : Fenêtre intervalle de stabilité pour le critère degré de l'utilisation de l'Energie verte.

Liste des tableaux

- Tableau 1.1.1** : Les différentes problématiques de décision.
- Tableau 1.2.1** : Échelle de Saaty de la méthode AHP.
- Tableau 1.2.2** : Récapitulatif des méthodes de critère unique de synthèse.
- Tableau 1.2.3** : Propriétés des procédures ELECTRE.
- Tableau 1.2.4** : Présentation synthétique des avantages et faiblesses des trois familles de méthodes d'aide à la décision multicritère.
- Tableau 1.3.1** : Les six types de critères.
- Tableau 1.3.2** : Tableau comparatif des méthodes PROMETHEE.
- Tableau 1.3.3** : PROMETHEE Software disponible.
- Tableau 1.3.4** : Différentes caractéristiques des logiciel PROMETHEE disponibles.
- Tableau 2.4.1** : Chute des ressources en eau potable par habitant en Algérie.
- Tableau 2.5.1** : La salinité moyenne des mers.
- Tableau 2.5.2** : Grandes unités de dessalement en Algerie.
- Tableau 2.5.3** : Petites stations (monoblocs) en Algerie.
- Tableau 2.5.2** : Procédés de dessalement.
- Tableau 2.6.1** : Classification des procédés de dessalement.
- Tableau 2.6.2** : Caractéristiques des différents procédés.
- Tableau 3.8.1** : Caractéristique de l'eau de mer-honaine.
- Tableau 3.8.2** : Principales caractéristiques de fonctionnement de la station de dessalement de Honaine.
- Tableau 3.9.1** : les critères d'évaluation avec leurs natures et unités.
- Tableau 3.9.2** : Données des différentes techniques de dessalement de l'eau de mer (Tableau d'évaluation.)
- Tableau 3.9.3** : Matrice d'évaluation.
- Tableau 3.9.4** : Poids de chaque critère.
- Tableau 3.9.5** : Unité de mesure du critère 01.
- Tableau 3.9.6** : Informations sur critère 01.
- Tableau 3.9.7** : Unité de mesure du critère 02.
- Tableau 3.9.8** : Informations sur critère 02.
- Tableau 3.9.9** : Unité de mesure du critère 03.
- Tableau 3.9.10** : Informations sur critère 03.
- Tableau 3.9.11** : Unité de mesure du critère 04.
- Tableau 3.9.12** : Informations sur critère 04.
- Tableau 3.9.13** : Unité de mesure du critère 05.
- Tableau 3.9.14** : Informations sur critère 05.
- Tableau 3.9.15** : Unité de mesure du critère 06.
- Tableau 3.9.16** : Informations sur critère 06.
- Tableau 3.9.17** : Unité de mesure du critère 07.
- Tableau 3.9.18** : Informations sur critère 07.
- Tableau 3.9.18** : Unité de mesure du critère 08.
- Tableau 3.9.20** : Informations sur critère 08.

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES.

ADE	Algérienne Des Eaux
AHP	Analytic Hierarchy Process.
CMED	Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement
DRE	Direction des Ressources en Eau
ELECTRE	Election et Choix Traduisant la Réalité
MACBETH	Measuring attractiveness by a categorical based evaluation technique.
MAUT	Multi-Attribute Utility Theory
MAVT	Multi-Attribute Value Theory.
TOPSIS	Technique for order preferences by similarity to ideal solutions.
SMART	Simple Multi Attribute Rating Technique.
MCA	Analyse Multicritères.
MCDM	Multiple Criteria Decision Making.
MRE	Ministère des Ressources en Eau.
ONU	Organisation des Nations-Unies.
PNE	Plan National de l'Eau.
PNUE	Programme des Nations-Unies pour l'Environnement
PROMETHE	Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations.
SEPA	Services d'Eau Potable et d'Assainissement.

INTRODUCTION GENERALE

- 1. Intérêt du sujet.**
- 2. La problématique.**
- 3. L'hypothèse.**
- 4. Recherches antérieures.**
- 5. Méthodologie du travail**
- 6. Plan du travail.**

1. INTERET DU SUJET :

L'intérêt pour l'analyse multicritère comme support à la décision dans la gestion de la ressource en eau connaît actuellement un essor prodigieux chez les décideurs et scientifiques de nombreux organismes gouvernementaux et centres de recherches dans le monde. Cet essor coïncide avec le passage d'un mode de gestion traditionnel axé sur l'intervention à un mode de gestion intégrée des ressources axé sur la planification et le développement durable des ressources. Le fait que cette nouvelle approche de gestion fasse intervenir une plus grande complexité du système à gérer, un volume de plus en plus grand d'information de toute nature et interaction complexe entre les différents problèmes liés à l'eau, oblige de plus en plus le décideur à s'appuyer sur des outils mathématiques d'aide à la décision qui lui permettront d'obtenir une vision globale des problèmes à résoudre et une idée de l'impact probable que ses décisions auront sur l'environnement physique et humain.

L'Homme ne pouvant considérer à la fois qu'un nombre limité d'informations, les méthodes d'aide à la prise de décision permettent d'aider les acteurs de la décision à organiser et synthétiser leurs informations. Tout problème décisionnel complexe requiert de prendre en compte de façon explicite différents points de vue, traduisant la coexistence de plusieurs acteurs défendant des objectifs conflictuels (fondés sur des systèmes de valeur non identiques). Les approches classiques (théorie de l'utilité, théorie des jeux, analyse coûts-bénéfices, programmation mathématique, etc.) ne considèrent qu'une fonction à objectif unique à maximiser ou à minimiser. En cela, elles ne garantissent pas une modélisation fidèle des problèmes de décisions réels.¹

Plusieurs approches multidimensionnelles ont été proposées pour surmonter les difficultés des approches classiques. La première fût l'approche appelée « Prise de décision multicritère », développée par l'École américaine. Plus récemment, l'École européenne a proposé une nouvelle approche à ces problèmes. Appelée « Aide multicritère à la décision » (AMCD). L'AMCD (même si elle n'est pas encore parfaitement axiomatisée), elle essaie d'aborder la complexité des problèmes décisionnels en relaxant les contraintes de formalisation mathématique et en offrant une modélisation plus flexible des problèmes réels. Par ailleurs, plusieurs applications sur des problèmes de la vie courante ont validé avec succès la faisabilité de cette approche. Pour ces raisons, l'AMCD est aujourd'hui un des plus importants champs de recherche de la recherche opérationnelle.

D'un point de vue technique, l'AMCD aborde différentes classes de problèmes décisionnels (choix, classification, classement, rangement), prenant explicitement en considération plusieurs points de vue (attributs multiples ou critères multiples), dans le but d'aider les décideurs (ou les acteurs) à trouver une solution cohérente au problème posé ainsi que des solutions de second rang, ces modèles permettent d'éclairer les décideurs sur les voies à prendre pour améliorer une

¹ [Adla A.2010] « Aide à la Facilitation pour une prise de Décision Collective : Proposition d'un Modèle et d'un Outil. ». Université Paul Sabatier - Toulouse III.

situation, à travers la compréhension du fonctionnement des systèmes étudiés en simulant et quantifiant les conséquences de plusieurs scénarios possibles, construits d'une manière interactive avec des acteurs défendant des intérêts stratégiques différents. Par ailleurs, des outils modernes de modélisation des préférences (tel que les ensembles flous et les ensembles approchés) ont été appliqués avec succès dans le cadre de l'AMCD.

Les aspects scientifiques et les applications pratiques ont attiré de nombreux chercheurs et praticiens vers le domaine de l'AMCD, stimulant ainsi les développements théoriques et méthodologiques, les applications concrètes et la mise en œuvre de logiciels particuliers.

2. LA PROBLEMATIQUE :

Près de 87% du territoire de notre pays représente une zone désertique, les précipitations sont faibles, irrégulières et localisées surtout dans le nord. Cela signifie qu'il faudra, aux responsables en hydraulique en charge de la gestion de l'eau, définir une stratégie et une politique pouvant relever les défis et les enjeux à venir.

L'impossibilité de se contenter des ressources naturelles pour faire face aux besoins croissants en eau douce a fait des eaux de mers, des eaux saumâtres et des eaux usées l'objet d'études et de développement de divers procédés permettant l'amélioration et la satisfaction de la demande (dessalement, réutilisation des eaux usées, etc..).

Les procédés de dessalement sont nombreux et en constantes évolution, chaque technique offre son lot de solutions mais engendre aussi différents inconvénients, le choix du procédé doit alors dépendre de plusieurs facteurs à la fois techniques et économiques, chercher le rapport qualité/prix est primordial afin de tirer le meilleur parti du dessalement.

Les procédés de dessalement les plus utilisés sont (à titre indicatif et non exhaustif) :

- **Multi-flash distillation MSF**
- **Multiple effets distillation MED**
- **Compression de vapeur VC**
- **Osmose inverse RO**
- **Électro dialyse ED**

Et par conséquent ils ne peuvent pas asseoir une pratique commune dans leur prise en charge et exploitation. Ainsi, ils seraient intéressés par un classement de ces procédés selon les critères qui représentent parfois des points de vue antagonistes. Un procédé jugé intéressant pour un critère peut ne pas l'être pour d'autres critères.

Alors nous partons sur la problématique suivante :

« Comment classer ces procédés de façon adéquate afin de faciliter la décision du choix du meilleur procédé et qui réponds aux différentes spécificités des stations de dessalement de l'eau de mer ? »

INTRODUCTION GENERALE

Pour pouvoir comparer ces différents procédés et déterminer le plus optimal parmi eux, nous avons utilisé la méthode PROMETHEE. Pour ce faire, nous avons fixé un certain nombre de critères et associé un poids ainsi qu'un critère généralisé à chaque critère.

Les facteurs à prendre en compte dans le choix d'un procédé de dessalement sont de quatre ordres :

- Les critères techniques
- Les critères économiques
- Les critères d'évaluation sociaux et comportementaux
- Les critères environnementaux.

Pour faire le choix du meilleur procédé, et qui répond à la revendication du développement durable, on appliquera la méthode PROMETHEE I et II avec le logiciel Visual-Promethee, suivi d'une analyse de sensibilité. Cela nous permettra aussi de montrer la pertinence des outils d'aide multicritère à la décision en matière de la gestion des ressources en eau.

3. L'HYPOTHESE :

Pour répondre à la problématique posée ci-haut, nous partons de l'hypothèse selon laquelle :

- L'application d'un nouveau procédé susceptible d'accroître la production interne et d'améliorer ainsi la qualité de l'eau pourra jouer un véritable rôle dans le processus du développement de la station de Honaine Tlemcen.

4. RECHERCHES ANTERIEURES :

Concernant les problèmes d'ingénieries ou de gestion liés aux ressources en eau, l'application des méthodes d'aide multicritère à la décision remonte au début des années soixante-dix déjà [Roy et al. 1992]. Connel et al. (2000) suggèrent leur utilisation pour le développement d'une gestion convenable des ressources en eau.²

Bien que, beaucoup reste encore à faire pour l'application des approches multicritères à de réels problèmes de design et d'aménagement en ingénierie impliquant des objectifs conflictuels comme le soulignent [Rajui et al. 2000 ; Bhattarai et Starkl, 2005]. D'autres auteurs tels que (Royet et al., 1992 ; Duckstein et al., 1994 ; Abu-Taleb M. F et Mareschal B, 1995 Bender et Simonovic, 2000 [cités par Rajui et al. 2000]; Hämäläinen R. P., et al., 2001 ; Hedia T., 2004) ont aussi cherché à promouvoir leur utilisation dans ce domaine³

Parmi les différentes méthodes employées, on trouve les méthodes de surclassement de synthèse qui constituent une des approches les plus prolifiques en aide multicritère à la décision [Martel et Matarazzo, 2005]. L'idée est de construire des relations binaires en comparant par pair toutes

²[Raju et al. 2000] « Multicriterion Analysis for Sustainable Water Resources Planning: A Case Study in Spain. » Water Resources Management, 14, 435–456.

³ [FATOUMATA B.2009] « Analyse multicritère pour la priorisation des interventions en matière d'approvisionnement en eau en milieu rural au Sénégal : cas de la région de Diourbel » Mémoire de maîtrise en science (M. Sc.) SCIENCE ET GÉNIE GÉNIE CIVIL, UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC.

les actions potentielles pour ensuite les exploiter de sorte à obtenir une recommandation finale. Dans cette catégorie, les méthodes de la famille ELECTRE et PROMETHEE sont bien connues et ont été appliquées dans divers problèmes concrets [Martel et Matarazzo, 2005] notamment en gestion des ressources en eau [Raju et al. 2000]. Ainsi, (Roy et al. 1992) proposent une méthodologie pour la “priorisation” de l’allocation des ressources en eau dans une région de Pologne en utilisant la méthode de surclassement. ELECTRE III. D’autres méthodes de la famille ELECTRE ont été utilisées (ELECTRE 1, Tri, 3 et 4) dans la gestion des ressources en eau pour l’allocation de ressource ou de projet.

(Morais et Almeida, 2006, Raju et al. 2000) [Raju et al. 2000] ont aussi utilisé la méthode PROMETHEE dans une étude de cas sur la gestion des ressources en eau en Espagne. Elle a longtemps été une alternative à ELECTRE III. Certains considèrent d’ailleurs qu’elle en est une simplification. Elle poursuit en effet le même but (le rangement), avec des moyens analogues (le surclassement), tout en étant beaucoup moins complexe que [Shärlig A., 1996].

D’autres familles de méthodes ont aussi été employées dans le domaine de la gestion des ressources en eau. Il s’agit notamment des méthodes de critère unique de synthèse. C’est une classe de méthodes fondées sur l’agrégation complète des critères en un critère unique. C’est le cas de AHP [Bhattarai et Starkl, 2005], et de MACBETH [Bana e Costa et al., 2004]. Cette dernière méthode, utilisée dans le cadre du présent mémoire est présentée dans la section suivante.⁴

5. METHODOLOGIE DU TRAVAIL :

Pour mener à bien cette étude, nous avons adopté une approche pluridisciplinaire : mobilisant l’histoire, l’hydrologie, la géographie, les mathématiques, l’économie et la gestion. Grâce à cette posture, nous avons tenté de dresser un tableau, d’élaborer une synthèse aussi claire et précise que possible d’une situation complexe, aux multiples facettes.

Les sources sont constituées par les nombreuses publications spécialisées de chercheurs arabes, francophones et anglo-saxons. Les informations sur le sujet sont fort dispersées, parfois contradictoires ou peu fiables car elles peuvent refléter « l’opinion politique du chercheur ». Aussi avons-nous, souvent, privilégié les données provenant d’organismes internationaux : ONU, FAO, World Ressource.

Au niveau empirique, la collecte des données relatives à la wilaya de Tlemcen s’est effectuée grâce aux différents sites officiels et à quelques rencontres avec des spécialistes en hydraulique, et notamment des ingénieurs travaillant dans la station de dessalement de Honaine.

6. PLAN DU TRAVAIL :

Cette étude se décline en trois parties :

- La première partie est intitulée « *La prise de décision multicritère.* » elle contient trois chapitre, le premier : *L’aide multicritère à la décision* , Le second chapitre : « *Les*

⁴ [FATOUMATA B.2009]

méthodes d'aide multicritère à la décision : Vue synthétique » et le troisième chapitre : « *Les méthodes PROMETHEE* » constitue un exposé des différentes méthodes multicritères à la décision.

- La deuxième partie est intitulé « **La gestion des ressources en eau** » Nous nous attacherons dans un premier temps à définir les concepts et analyser le système de gestion des ressources en eau dans sa globalité.

Chapitre 06 : Les procédés de dessalement de l'eau de mer.

- Concernant la troisième partie, elle sera question, en premier lieu, d'une présentation du contexte hydrique de la wilaya de Tlemcen qui est notre région d'étude « *Etat des lieux des ressources en eau dans la wilaya de Tlemcen* » , suivie de la description de la station de dessalement de « Honaine » Tlemcen, Le dernier chapitre sera consacré pour l'application numérique de la méthode *PROMETHEE I et II* à l'aide du logiciel *Visual-Promethee* avec une analyse de sensibilité et à la fin une interprétation des résultats obtenus.

PARTIE 01 :

LA PRISE DE DECISION MULTI-CRITERE.

CHAPITRE 01 : L'aide multicritère à la décision.

CHAPITRE 02 : Les méthodes d'aide multicritère à la décision.

CHAPITRE 03 : Les méthodes PROMETHEE.

CHAPITRE 01 :

L'aide multicritère à la décision.

- 1. Introduction.**
- 2. Histoire de l'approche multicritère à la décision**
- 3. Définition de l'aide multicritère à la décision.**
- 4. Principe général d'analyse multicritère.**
- 5. Concepts et Terminologie.**
 - a. Le décideur et l'analyste.**
 - b. Les alternatives et les critères.**
 - i. Les alternatives, les objectifs et les attributs**
 - ii. Les critères.**
 - c. 5.2.2.1. Les différents types de critères.**
 - d. 5.2.2.2. Les propriétés des critères.**
- 6. Les différentes problématiques multicritères.**
 - a. Problématique du choix.**
 - b. Problématique du tri.**
 - c. Problématique de rangement.**
 - d. Problématique de la description.**
- 7. Conclusion.**

1. Introduction :

Techniquement, l'aide à la décision multicritère est développée pour traiter plusieurs classes de problèmes de décision (choix, tri, classification, rangement...) tout en considérant plusieurs critères (attributs), souvent conflictuels et non commensurables, tout en cherchant à modéliser au mieux les préférences et les valeurs du ou des décideurs.

Dans ce chapitre on va présenter la problématique d'aide à la décision et quelques outils méthodologiques disponibles dans la littérature, qu'offre l'aide multicritère à la décision. Ces outils méthodologiques seront utilisés dans la démarche d'aide multicritère à la décision constituant la base de notre approche qui sera présentée dans la partie 03.

2. Histoire de l'approche multicritère à la décision:

L'histoire de la prise de décision multicritère remonte au 18^{ème} siècle quand Le *Marquis de Condorcet* a publié pour la première fois son livre intitulé « *la prise de décision par la pluralité de voix* » avec l'apparition des origines des systèmes de vote « voting systems » qui étaient souvent attribués à Le Chevalier Jean-Charles De Borda en (1733-1799). Cependant, Ramon Llull (1232-1316) a introduit le concept de la comparaison par paires avant Condorcet, tandis que Nicolaus Cusanus (1401-1464) a introduit « la méthode de pondération » environ trois siècles et demi avant Borda. Ainsi, il est à noter également qu'une lettre de Pline Le jeune (~ AD 105) à Titus Aristo prouve qu'il a introduit la stratégie de vote d'approbation ternaire « *the ternary approval voting strategy* » et qu'il s'est intéressé aux systèmes de vote long temps avant Ramon Llull et Nicolaus Cusanus. Il y a quelques similitudes entre « *La méthode de pondération* » de Borda et les théories récentes d'utilité de valeur et entre la méthode de Condorcet et les méthodes actuelles de surclassement.¹

Pareto en (1896) a fondé pour la première fois une base pour aborder les décisions concernant les problèmes en présence de critères multiples. Un des résultats les plus importants de la recherche de Pareto était l'introduction du concept d'efficacité. Koopmans (1951) a élargi le concept de l'efficacité de Pareto par l'introduction du concept de l'ensemble efficace qu'il a défini comme étant un ensemble de solutions alternatives non-dominées.² Pendant les années 1940 et 1950, Von Neumann et Morgenstern (1944) ont introduit la théorie de l'utilité, l'une des bases méthodologiques principales des méthodes multicritères modernes de la prise de décision et la science de décision en général. Un changement important au sujet de l'analyse multicritères a été introduit par Simon, qui a développé la théorie de la « rationalité limitée ». Simon stipule qu'un décideur choisit une solution satisfaisante “satisficing” plutôt qu'une solution optimale et que la rationalité n'est pas indépendante du processus de la décision, mais doit être trouvée dans le processus lui-même (Simon 1976). Ce point peut être vu comme le début des approches d'aide à la décision.³

Dans les années 60, l'analyse multicritère a commencé à avoir son propre vocabulaire. Charnes et Cooper (1961) ont élargi la théorie traditionnelle de la programmation mathématique par la proposition de la programmation par buts « goal programming ». Fishburn (1965) a étudié

¹ [Michael. D et Constantin.Z. 2004] « Multi-criteria Decision Aid Classification Methods », Kluwer Academic Publishers, USA.

² [Michael. D et Constantin.Z. 2004].

³ [Omann ,I.2004] « Multi-criteria decision aid as an approach for sustainable development analysis and implementation. » These de doctorat, Université de Karl-Franzens.

l'extension de la théorie de l'utilité en présence de critères multiples. Il est à noter que toutes ces études reviennent à des chercheurs travaillant aux Etats-Unis. Vers la fin des années 60, la prise de décision multicritère a attiré l'attention des chercheurs européens. Roy (1968), l'un des pionniers de ce domaine, a introduit les méthodes de surclassement. Il est considéré le fondateur de l'école « européenne » de la prise de décision multicritère.⁴

En 1972, le premier congrès sur les approches multicritères a eu lieu en Caroline du Sud aux Etats Unis. Le premier ouvrage complet des approches multicritères a été présenté en 1976 par Keeney et Raiffa dont le contenu est encore utile jusqu'à aujourd'hui. Ils ont basé leur étude sur la théorie de la décision, qui pour la plupart est associée aux arbres de décision, la modélisation de l'incertitude et la règle d'utilité prévue. En élargissant la théorie de la décision pour s'adapter aux conséquences multi-attribues, Keeney et Raiffa ont proposé une intégration théorique de l'incertitude liée aux conséquences futures et les objectifs multiples. Ils ont agrandi l'ensemble des axiomes de telle sorte que les décisions dont les objectifs sont multiples peuvent être analysées.⁵

Dans les années 80, des méthodes interactives d'ordinateur ont été proposées. Elles ont facilité considérablement la communication entre les décideurs. En 1985, les méthodes multicritères avaient acquis de la réputation mondiale. Pendant les années 90, les méthodes de l'analyse multicritère ont évolué théoriquement et pratiquement en profitant des recherches avancées dans le domaine de la technologie de l'information et l'intelligence artificielle.

Les approches multicritères sont développées fondamentalement dans deux écoles, l'école européenne et l'école américaine. La première se diffère de la dernière du fait qu'elle cherche à donner des recommandations alors que l'école américaine essaye d'approcher une solution idéale dérivée d'un ensemble d'axiomes.⁶ L'école européenne étudie les méthodes discrètes et les relations de sur-classement tandis que l'école américaine s'intéresse aux méthodes de l'utilité additive.⁷

3. Définition de l'aide multicritère à la décision

Différentes définitions ont été proposées pour l'aide multicritère à la décision. Nous reprenons ici celle de Vincke 1989⁸: « *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 ou plusieurs points de vue, souvent contradictoires, doivent être pris en compte.* »⁹

Traditionnellement, l'activité de l'aide à la décision se base sur l'idée de l'existence d'une fonction objectif (ou un critère) bien définie et unique et qui s'impose aux yeux de tous pour caractériser la bonne direction dans laquelle il convenait de faire évoluer le système dont on s'intéressait. En procédant ainsi, on a l'avantage d'aboutir à un problème "bien posé" mathématiquement dans ce sens qu'il est posé en des termes tels que la solution optimale, est entièrement déterminée par sa formulation.

Néanmoins, en pratique les conséquences sont suffisamment complexes, pour qu'une seule fonction objective (un seul critère) ne puisse appréhender adéquatement toute l'information nécessaire à la

⁴ [Michael. D et Constantin.Z. 2004].

⁵ [Department for Communities and Local Government.2009] « Multi-criteria analysis: a manual. » London.

⁶ [Roy. B. and Vanderpotten. D, The European School of MCDA.1996] « Emergence, Basic Features and Current Works. » Journal of Multi-Criteria Decision Analysis 5, 22-38.

⁷ [Gaouas Oussama.2011] « Approches multicritères en conception bioclimatique et optimisation par le biais d'un langage architecturale », Magister en : Architecture, Université Mohamed Khider – Biskra Faculté des Sciences et de la technologie.

⁸ [Vincke. 1989] « L'aide multicritère à la décision. » Éditions de l'Université de Bruxelles, Paris, Éditions Ellipses.

⁹ [Mohamed Mammeri,2013] « Une approche d'aide multicritère à la décision pour l'évaluation du confort dans les trains : construction d'un modèle d'évaluation. ». Université Paris Dauphine.

comparaison globale des différentes alternatives d'action possibles. D'après [Martel.1999]¹⁰, ces conséquences sont multiples et s'apprécient en des termes forts variés (économiques, techniques, de confort, etc.).

Pour [Bouyssou .1993]¹¹, 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. Toujours selon [Bouyssou 1993], adopter une démarche multicritère, ce n'est pas postuler que "dans la réalité" un seul critère est à l'œuvre mais c'est, plus simplement, vouloir aider à la décision en n'exhibant qu'un seul critère. Il y a, selon lui, à la base d'une démarche multicritère en aide à la décision, un "acte de foi" consistant à croire que construire explicitement plusieurs critères peut avoir un "rôle positif" dans le processus de modélisation.¹²

4. Principe générale d'analyse multicritère a la décision

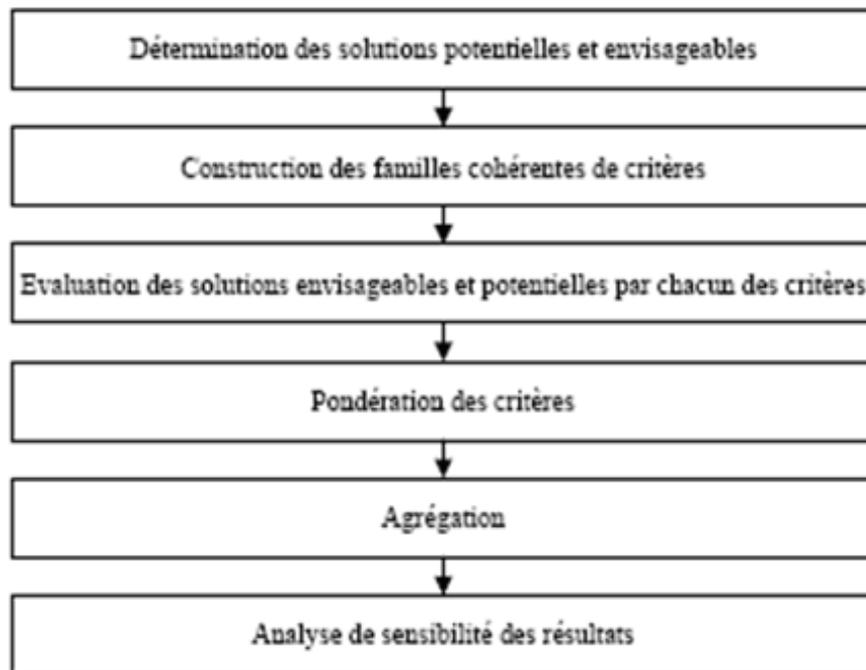
En toute généralité, lorsqu'on pose un problème multicritère, il s'agit de trouver *la solution ou bien l'alternative la plus adéquate*, compte tenu de la famille de critères F, cette solution pouvant prendre diverses formes (choix, affectation, classement). On peut alors opérer en quatre étapes :

¹⁰ [Azondékon, H.S. and Martel, J.M. (1999) « Value of additional information in multicriterion analysis under uncertainty. » European Journal of Operational Research, 117, 45-62.

¹¹ [Roy B., Bouyssou D., 1993] « Aide multicritère à la décision : méthodes et cas »Economica, Paris.

¹² [Roy B., Bouyssou D., 1993].

Figure 1.1.1 : Principe générale d'analyse multicritère



1. **Dresser la liste des actions potentielles :** Il s'agira lors de cette étape d'établir l'ensemble d'actions A sur lequel va être portée la décision, mais aussi d'identifier le problème d'aide à la décision soumis par le décideur en vue de l'associer à une des problématiques existantes liées à la décision multicritère. Cette étape constitue la base de départ pour élaborer le modèle de décision associé au problème. L'ensemble d'actions A devra être aussi complet que possible, ce qui n'est pas toujours évident.
2. **Analyse des conséquences et détermination des critères à prendre en considération :** Ces critères découlent des conséquences des actions, c'est-à-dire de « tout effet ou attribut de l'action susceptible d'interférer avec les objectifs ou avec le système valeurs d'un acteur du processus de décision, en tant qu'élément primaire à partir duquel il élabore, justifie ou transforme ses préférences ». Il est rare qu'une action n'ait qu'une conséquence. Ainsi, on parlera de l'ensemble des conséquences.
3. **Modélisation des préférences et établissement d'un tableau de performances :** L'homme d'étude (l'analyste) tentera d'apporter des éléments de réponses en élaborant un tableau de performances contenant l'ensemble des actions potentielles qu'il a établi mais également l'ensemble des critères bâtis lors de l'étape précédente. Cette phase constitue un élément clé du processus d'aide à la décision car elle permet d'entrevoir l'approche qui sera utilisée pour la résolution, c'est -à- dire pour la recherche d'un compromis entre actions.
4. **Agrégation des performances et élaboration de la recommandation :** Il s'agit ici d'établir un modèle des préférences globales, c'est-à-dire une représentation formalisée de telles préférences relativement à un ensemble A d'actions potentielles, que l'analyste juge appropriée au problème d'aide à la décision. Lors de cette étape, l'analyste choisira, en fonction des exigences et du type de problème de décision qui lui est soumis par le décideur, une des approches

ou méthodes d'agrégation des performances à entreprendre pour déterminer le compromis voulu et ainsi aboutir à l'élaboration d'une recommandation finale permettant d'atteindre le but fixé de l'étude.

5. Concepts et Terminologie :

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

5.1. Le décideur et l'analyste

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

Le rôle du décideur : Une des tâches importantes du décideur est de se dévoiler ses jugements personnels, de s'en convaincre lui-même, et de décider, nous appelons ce rôle l'auto-conviction. Cette tâche d'auto-conviction peut se faire d'une façon totalement intuitive ou à l'aide d'une analyse plus formelle et plus structurée.¹³

Le décideur peut utiliser une analyse formelle pour différentes raisons :

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

Généralement, une analyse faite uniquement pour se convaincre soi-même est différente d'une analyse dont le but est de défendre des choix. Une analyse personnelle peut très bien incorporer des impressions très subjectives. Par contre, une analyse d'une décision publique est sujette à des discussions au cours desquelles tous les points vulnérables de la proposition sont attaqués. Le raisonnement effectué par le décideur doit être, dans ce cas, le plus objectif possible et doit avoir des fondements solides pour contrer toutes les attaques éventuelles. L'autre rôle que peut avoir un décideur est celui d'un conciliateur de points de vue opposés. Ces derniers correspondent, selon la nature du problème étudié, à des critères d'évaluation, des alternatives (qui sont généralement contradictoires) ou à des points de vue antagonistes des différents acteurs.¹⁴

Une analyse formelle qui décompose le problème en plusieurs parties peut aider à la mise en œuvre d'un processus de conciliation. En effet, cette analyse permet de mettre en évidence les sources principales de différences d'opinions, d'avoir plus d'informations sur les avantages des différentes alternatives. Ceci permet au décideur de limiter le champ de son action et de mieux guider le processus de la conciliation.

¹³ [OTHMANI. I. 1998] « Optimisation multicritère : fondements et concepts. Modélisation et simulation. » Université Joseph-Fourier – Grenoble. France.

¹⁴ [OTHMANI I. 1998].

La structure de préférence du décideur Une composante principale du processus de décision multicritère concerne les importances attribuées aux différents critères considérés.

Ces importances sont représentées par des expressions quantitatives souvent appelées poids ou par le biais d'expressions ordinales désignées par le terme priorités.

Dans la plupart des processus de décision, décrire la structure de préférence du décideur entre les différentes alternatives revient, principalement, à évaluer les poids ou les priorités.

5.2. Les alternatives et les critères :

5.2.1. Les alternatives, les objectifs et les attributs :

L'ensemble des alternatives désigne l'ensemble des scénarios, des candidats, des sites, etc..., sur lesquels porte la décision. L'identification de cet ensemble de solutions réalisables est une tâche primordiale dans la définition du problème.¹⁵

Cet ensemble peut être défini de deux façons :

- Explicitement par un ensemble fini d'alternatives de cardinal relativement faible,
 - Implicitement par un ensemble de propriétés ou de conditions que les alternatives doivent vérifier (c'est le cas d'un ensemble d'alternatives spécifié par ses variables de décision vérifiant un système de contraintes explicites).
- **Les objectifs :** Un objectif indique le sens de l'amélioration qu'un décideur souhaite apporter à un système lors d'un changement d'état. Il reflète l'aspiration du décideur. Les trois manières de poursuivre un objectif sont de le maximiser, de le minimiser ou de le maintenir dans un certain état. Des exemples industriels classiques de ces situations sont : maximiser le profit, minimiser le coût ou maintenir un équilibre économique.

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

- **Les attributs :** Les attributs correspondent à des caractéristiques des alternatives. Les attributs permettent d'évaluer les niveaux des objectifs.¹⁶

1.2.2. Les critères :

Un critère, normalement exprimé sous la forme d'une fonction, est l'évaluation d'une action potentielle de l'ensemble A d'après un point de vue. Il est ainsi possible de comparer les résultats des actions *a* et *b* avec une fonction *g* qui regroupe différents critères selon un point de vue. Ceci s'exprime de la manière suivante :

$$g(b) \geq g(a) \Rightarrow b \text{ Sg } a$$

Où *Sg* est une relation binaire signifiant : "au minimum aussi bien, par l'évaluation du point de vue considéré par la fonction *g*".

¹⁵ [Imed OTHMANI. 1998].

¹⁶ [Imed OTHMANI. 1998].

La modélisation des préférences relativement à deux actions potentielles a et b permet de définir les relations binaires suivantes :

– **la non-préférence** : correspond à l'absence de raisons qui justifieraient une préférence entre l'action a ou l'action b , ce qui se passe dans les situations d'indifférence (I) et d'incomparabilité (R).

$$a \sim b \Leftrightarrow (a I b \text{ ou } a R b)$$

– **la préférence** : correspond à l'existence de raisons claires et positives qui justifient une préférence stricte (P) ou faible (Q).

$$a b \Leftrightarrow (a P b \text{ ou } a Q b).$$

– **le sur-classement** : correspond à l'existence de raisons claires et positives qui justifient une préférence mais sans qu'aucune séparation significative ne soit établie entre les situations de préférence stricte (P), préférence faible (Q) et d'indifférence (I).

$$a S b \Rightarrow (a P b \text{ ou } a Q b \text{ ou } a I b).$$

5.2.2.1. Les différents types de critères

A partir de ces relations, nous pouvons définir plusieurs types de critères en regard des propriétés exprimées :

- **Vrai-critère :**

$$a P g b \Leftrightarrow g(a) > g(b) \text{ et } a I g b \Leftrightarrow g(a) = g(b)$$

Qui est un critère où l'incertitude entre deux évaluations d'actions par g est limitée aux cas d'égalités. Par exemple, lors de la décision de placement d'une entité sur un ensemble de machines disposant de caractéristiques processeurs différents, le vrai-critère permettra d'établir un classement des meilleures machines candidates jusqu'aux moins bonnes en autorisant les ex-aequo par rapport au critère de type de processeur. Le vrai-critère suppose que les actions potentielles soient toutes comparables les unes aux autres, ce qui correspond à un pré-ordre total.

- **Pseudo-critère :**

$$a P g b \Leftrightarrow g(a) - g(b) > p(g(b)), a Q g b \Leftrightarrow q(g(b) < g(a) - g(b) \leq p(g(b))), a I g b \Leftrightarrow g(a) - g(b) \leq q(g(b))$$

Qui est un critère où l'incertitude est définie à trois niveaux, en utilisant les définitions de préférence stricte et faible, et d'indifférence. Les limites entre les niveaux sont fonction du résultat de l'évaluation des actions par g . Tout comme dans la notion de vrai-critère, un classement est réalisé et les ex-aequos sont possibles, cependant la notion d'incomparabilité est tolérée. Par exemple, si une décision doit être prise, en prenant en compte un critère de charge et de communication, pour le placement d'une entité sur un ensemble de machines lors d'allocation de ressources, il est possible que la décision amène soit à privilégier une machine pour laquelle la charge est faible soit une autre machine pour son débit de communication. Ces deux décisions peuvent être considérées comme aussi bonnes l'une que l'autre pour le placement, même si celui-ci est différent au niveau de la localisation, car l'évaluation des critères n'amène pas de classement

strict des actions potentielles. En effet, une action est considérée 'équivalente à une autre en termes de décision par l'utilisation du seuil d'indifférence qui ajoute **une notion de flou à l'expression des critères.**

- **Quasi-critère :**

$$aPgb \Leftrightarrow g(a) - g(b) > q(g(b)) \text{ et } aIgb \Leftrightarrow g(a) - g(b) \leq q(g(b))$$

Qui est un critère où l'incertitude entre deux 'évaluations d'actions est composée d'un intervalle. Cet intervalle est fonction du résultat de l'évaluation des actions par g . Nous pouvons reprendre l'exemple précédent à la différence près qu'il n'y a pas de seuils à partir desquels est réalisé le classement des actions potentielles mais des intervalles d'incertitudes sur les évaluations. Ceci permet d'introduire une notion de flou dans le classement.¹⁷

5.2.2.2. Les propriétés des critères :

Une décision peut être prise selon plusieurs critères définis ou non, probabilistes ou en fonction du résultat d'une action et/ou d'une décision précédente. Le processus de décision commence par la formation, la transformation et l'argumentation des choix effectués qu'ils soient vus comme contraintes et/ou préférences. Il est rare que les actions à mener après une décision soient uniques. Ceci est d'autant plus vrai si l'on considère des actions résultantes comme le placement, la migration ou la duplication. Afin d'augmenter la qualité de service, le choix de cette action peut être réalisé par une analyse multicritère.¹⁸

6. Les différentes problématiques multicritères :

Quatre problématiques de références furent considérées par **Bernard ROY**. Les trois premières sont à but perspectif et concernent respectivement les problèmes formulés en termes de choix, de tri et de rangement ; la dernière est plus modérée dans son objectif puisqu'elle est simplement à vocation descriptive.¹⁹

Il arrivera souvent qu'un problème concret donne lieu à un mélange de problématiques de choix, de tri, et de rangement.

¹⁷ [Vincent PORTIGLIATTI. 2003] « Contribution à l'allocation dynamique de ressources pour les composants expressifs dans les systèmes répartis » Thèse de doctorat de l'université de Franche-Comté.

¹⁸ [Vincent PORTIGLIATTI. 2003].

¹⁹ [Bernard Roy, 1985] « Méthodologie multicritère d'aide à la décision », Economica, Paris.

PARTIE 01 : AIDE MULTICRITERE A LA DECISION

Tableau 1.1.1: Les différentes problématiques de décision²⁰

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

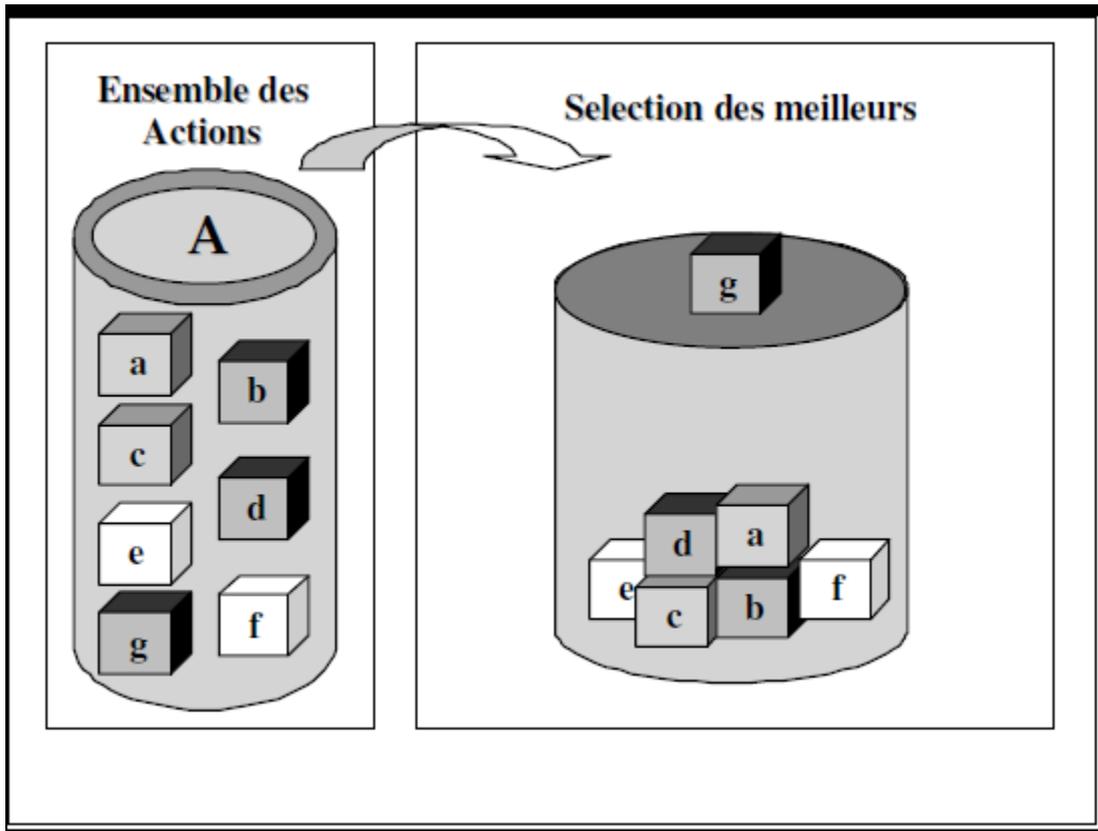
6.1. Problématique du choix α Alpha : choisir, sélectionner

La problématique de choix, désignée par Bernard Roy sous la lettre grecque alpha est celle qui consiste à chercher un sous-ensemble de A, bien sûr restreint que possible, contenant les *meilleures* actions ou à défaut les actions les plus *satisfaisantes*.²¹

²⁰ [Bernard Roy, 1985].

²¹ [Ginting. R, 2000] « intégration du système d'aide à la décision multicritères et du système d'intelligence économique dans l'ère concurrentielle », Thèse de Doctorat, l'Université de droit et des sciences d'Aix Marseille.

Figure 1.1.2 : La problématique du choix

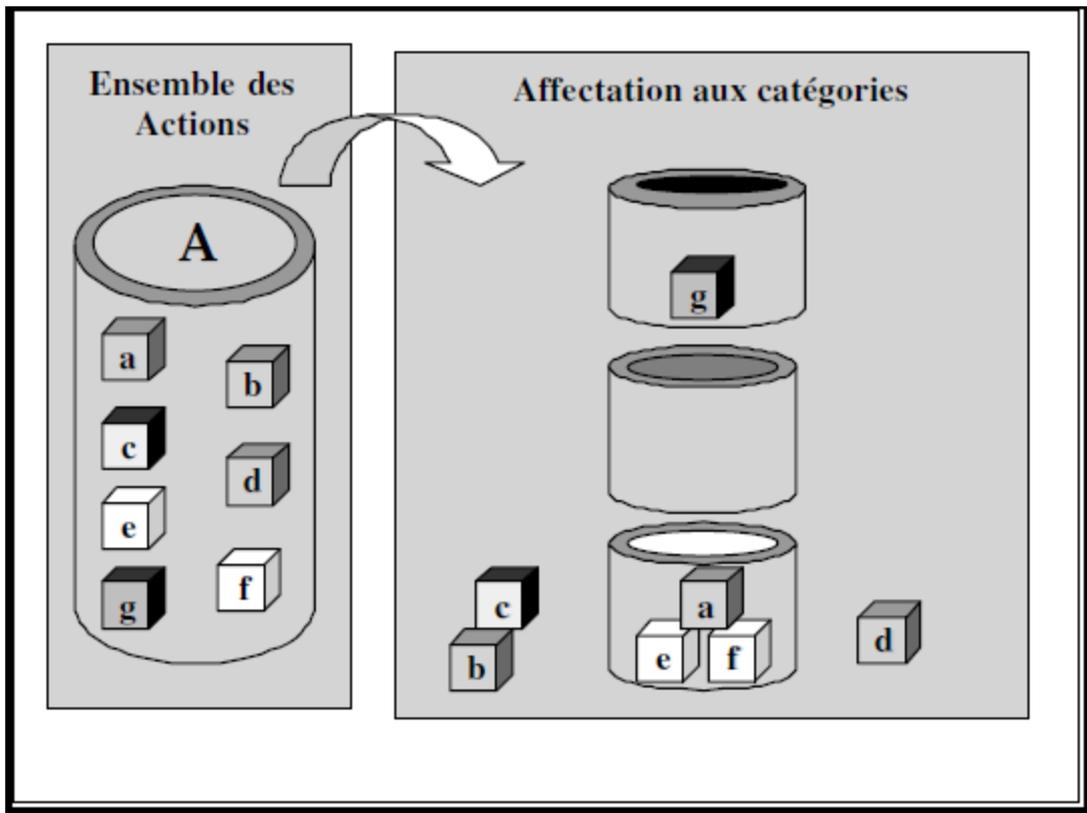


6.2. Problématique du tri β Bêta : trier, segmenter :

La problématique de tri, dite aussi problématique Bêta, est celle qui cherche à affecter chacune des actions potentielles à une catégorie, étant entendu que les catégories sont généralement définies à partir des valeurs observées des actions qu'elles sont destinées à recevoir.

La problématique du tri consiste alors à rechercher un protocole d'affectation, permettant de distribuer les actions de A sur l'ensemble des catégories prédéfinis, autrement dit, séparer les bonnes actions des moins bonnes.

Figure 1.1.3: La problématique du tri²²

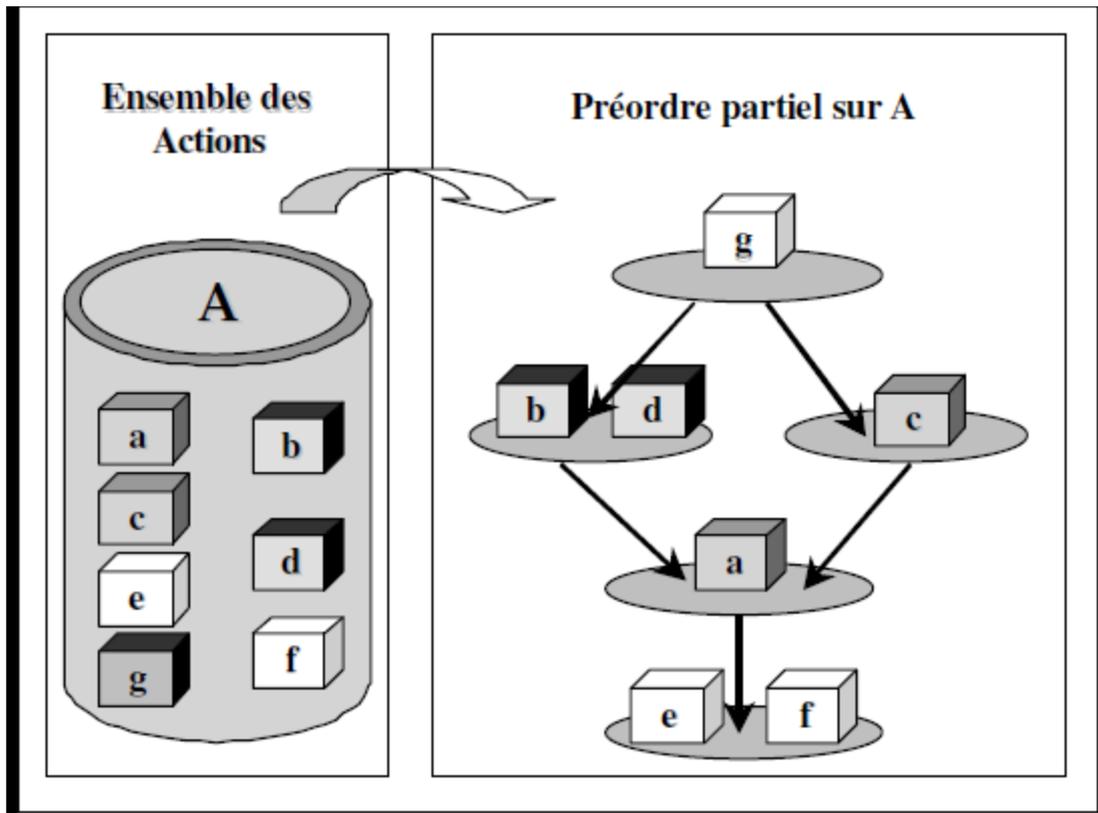


6.3. Problématique de rangement γ Gamma : ranger, classer :

La problématique de rangement, dite aussi gamma, consiste à regrouper les actions en classes d'équivalence, ces classes étant ordonnées conformément aux préférences de ceux qui participent à la décision, alors que dans l'attitude Bêta , on définit les classes à priori, on les laisse ici se définir d'elles-mêmes , par la simple présence des actions qu'elles contiennent. Lorsqu'on se situe dans cette problématique, l'idée générale est de classer les actions, de la meilleure à la moins bonne, pour choisir ensuite K actions parmi les meilleures.

²² [Ginting. R, 2000].

Figure 1.1.4 : La problématique du rangement



6.4. Problématique de la description λ Lambda :

La problématique lambda consiste à poser le problème en termes limité à une description des actions de l'ensemble A et/ou de leurs conséquences, c'est-à-dire orienter l'investigation vers la mise en évidence d'information relatives aux actions potentielles, conçues en vue d'aider directement le décideur à les découvrir, à les comprendre, à les jauger et ce compte tenu du caractère révisable et/ou transitoire de A.

Cette problématique prépare une forme de prescription ou de simple participation visant :

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

7. Conclusion :

L'activité d'aide à la décision est une activité faite par tous presque chaque jour. Nous prenons des décisions sans arrêt. Des plus simples, aux plus complexes, à tous les niveaux individuels. Assez souvent, dans ces processus de décision nous demandons l'avis, l'aide, le support d'ami(e)s, d'experts, de sociétés de conseil, etc. ²³

Ce qui caractérise l'aide à la décision à la fois comme activité scientifique et comme activité professionnelle est son approche qualifiée de « formelle : langages pour réduire l'ambiguïté de la communication humaine » et « abstraite : langages indépendants du domaine de discours ».

Dans le chapitre suivant nous présenterons les méthodes d'aide multicritère à la décision, son classement, une présentation de quelques méthodes et ses limites.

²³ [T. Soukia ,2003] « De la théorie de la décision à l'aide à la décision. » LAMSADE. Université Paris Dauphine.

CHAPITRE 02

Les méthodes d'aide multicritère à la décision

- 1. Introduction.**
- 2. Classement des méthodes multicritères**
- 3. Méthodes de l'approche du critère unique de synthèse.**
 - 3.1. Méthode SMART.**
 - 3.2. Méthodes MAVT.**
 - 3.3. Méthodes MAUT.**
 - 3.4. Méthode AHP (Analytic Hierarchy Process).**
 - 3.5. Méthode TOPSIS.**
 - 3.6. Méthode UTA.**
 - 3.7. Méthode EVAMIX.**
- 4. Les méthodes de surclassement.**
 - 4.1. Les Méthodes ELECTRE.**
 - 4.1.1. ELECTRE I.**
 - 4.1.2. ELECTRE II.**
 - 4.1.3. ELECTRE III.**
 - 4.1.4. ELECTRE IS**
 - 4.1.5. ELECTRE IV**
 - 4.1.6. ELECTRE TRI.**
 - 4.2. Les méthodes PROMETHEE.**
 - 4.3. Critique des méthodes de surclassement.**
- 5. Les méthodes interactives.**
- 7. Synthèse des trois familles de méthodes d'aide à la décision multicritère.**
- 13. Les limites des méthodes multicritères.**
- 14. Croissance des articles appliquant les MCDM dans la gestion de l'eau.**
- 15. Les Méthodes de MCDM appliquées dans la gestion de l'eau**
- 16. Domaines d'application des méthodes MCDM.**
- 17. Distribution par revues des articles MCDM appliqués dans la gestion de l'eau.**
- 18. Conclusion.**

1. Introduction :

L'intérêt des méthodes multicritères est de considérer un ensemble de critères de différentes nature (exprimés en unité différentes), sans nécessairement les transformer en critères économiques, ni en une fonction unique. Il ne s'agit pas de rechercher un optimum, mais une solution compromise qui peut prendre diverses formes : choix, affectation ou classement. Plusieurs méthodes existent dans la littérature, dans le cadre de ce chapitre nous allons définir le cadre théorique et les aspects méthodologies des méthodes multicritères.

2. Classement des méthodes multicritères :

Plusieurs méthodes d'analyse multicritère coexistent, et la différence entre ces méthodes se trouve soit dans la façon de réaliser cette dernière étape, soit dans la façon d'évaluer chacune des solutions en fonction des critères retenus. Les spécialistes de l'aide à la décision multicritère s'accordent sur trois grandes familles : ²⁴

- **Les méthodes basées sur la théorie de l'utilité multi-attributs : approche du critère unique de synthèse :** Elles consistent à agréger les différents points de vue en une fonction unique qu'il s'agit ensuite d'optimiser. Les travaux relatifs à cette famille étudient les conditions mathématiques d'agrégation, les formes particulières de la fonction agrégeante et les méthodes de construction de ces fonctions. Les principales méthodes appartenant à cette famille sont : MAUT, SMART, UTA, TOPSIS, AHP et G.P. Bien que rigoureuses, ces méthodes se révèlent souvent d'un degré de complexité élevé ou encore écarte certaines solutions pourtant optimales sur la base du principe de compensation.

- **Les méthodes de surclassement : approche de surclassement de synthèse :** Ces méthodes visent en première étape, à construire une relation appelée relation de surclassement, qui représente les préférences solidement établies du décideur, compte tenu de l'information dont il dispose. Les méthodes multicritères appartenant à cette famille introduisent des seuils d'indifférence et de préférence au niveau de chacun des critères avant de construire la relation de surclassement. Cette relation n'est donc en général ni complète ni transitive. La seconde étape consiste à exploiter la relation de surclassement en vue d'aider le décideur à résoudre son problème. Ces méthodes multicritères sont caractérisées par un bon degré de pragmatisme compte tenu des contextes décisionnels fréquemment rencontrés. Elles sont assez riches en concepts nouveaux, comme ceux des problématiques décisionnelles. Les méthodes les plus connues de cette famille sont : ELECTRE (Elimination ET Choix Traduisant la Réalité) et PROMETHÉE.

- **Les méthodes interactives : approche de jugement local interactif :** Bien qu'elles se confondent actuellement avec la deuxième famille, car toutes ces méthodes ont été programmées de nombreuses fois plus ou moins bien, et selon les besoins, dans différents laboratoires de recherche. Elles alternent les étapes de calcul et les étapes de dialogue. Elles sont le plus souvent développées dans un contexte de programmation mathématique à objectif multiple.

²⁴ [Mohamed Mammeri,2013] « Une approche d'aide multicritère à la décision pour l'évaluation du confort dans les trains : construction d'un modèle d'évaluation. ». Université Paris Dauphine.

3. Méthodes de l'approche du critère unique de synthèse :

Cette fonction agrège les différents points de vue en une fonction unique qu'il s'agit ensuite d'optimiser. Il s'agit d'une approche très exigeante sur le plan de l'information, ce qui rend parfois le décideur moins enthousiaste à l'utiliser. En outre, cette approche évacue toute incompatibilité entre les actions. Parmi cette catégorie de méthodes, nous trouvons : les méthodes SMART, MAVT, MAUT, TOPSIS, la méthode AHP (*Analytic Hierarchy Process*) de *Saaty 1980* et la méthode EVAMIX.

3.1. Méthode SMART : Simple Multi-Attribute Rating technique (Edwards 1971)

Edwards pense que si la modélisation des préférences est assez complexe, entre autres raisons à cause des erreurs de mesure, il serait intéressant de simplifier cette modélisation en mettant de l'avant une procédure simple pour obtenir les préférences réelles du décideur qui sont nécessairement subjectives. C'est ainsi qu'il a été conduit à développer la procédure SMART. Il constate que plusieurs expériences et simulations avec le décideur confirment qu'on obtient d'aussi bonnes approximations avec la fonction additive qu'avec d'autres formes non-linéaires qui sont beaucoup plus complexes. La procédure se présente comme suit :²⁵

Étape 1 : Mettre les attributs en ordre décroissant d'importance. C'est une étape qui devrait déclencher une discussion entre le décideur et tous ses partenaires dans le processus de décision.

Étape 2 : Déterminer le poids pour chaque attribut. Les intervenants du processus de décision peuvent avoir des opinions différentes sur les valeurs des poids des attributs. De façon interactive, ces évaluations sont faites par des experts sur l'échelle variant de 0 à 100.

Étape 3 : Faire la somme des coefficients d'importance et diviser chaque poids par cette somme. Cette étape permet de normaliser les coefficients d'importance relative entre 0 et 1.

Étape 4 : Mesurer la localisation de chaque action sur chaque attribut

Étape 5 : Les valeurs des actions sont obtenues selon la somme pondérée suivante :

$$U(a_i) = \sum_{j=1}^n \pi_j \cdot u_j(a_i)$$

Étape 6 : L'exploitation se fait sur la base de $U(a_i)$ pour ranger ou choisir la meilleure action.

Les données d'entrée de la procédure sont de nature cardinale, on utilise des vrai-critères. L'articulation des préférences se fait *a priori*. On distingue des préférences strictes et l'indifférence ; la structure de préférence est du type préordre total. Cette procédure d'agrégation est compensatoire. Cette procédure exige l'indépendance au sens des préférences.

3.2. MAVT: Multiple Attribute Value Theory (Keeney et Raifa 1976)

La méthode MAVT développée par KEENEY et RAIFA en 1976 repose sur l'idée fondamentale suivante : tout décideur essaie inconsciemment (ou implicitement) de maximiser une fonction qui agrège tous les attributs. La particularité de la méthode MAVT réside dans l'idée de construction d'une fonction de valeur partielle pour chaque attribut. La meilleure action sur un attribut aura une valeur partielle (par rapport à l'attribut étudié) égale à 1 et la pire des actions aura une valeur

²⁵ [A. Guitouni M et al, 2010] « Cadre méthodologique pour différencier les méthodes multicritères » Université Laval. Canada.

partielle égale 0. En posant des questions au décideur, nous construisons les fonctions de valeur partielle. Nous construisons ensuite, et ce en fonction des caractéristiques des préférences du décideur, la fonction de valeur. La méthode MAVT s'applique dans un contexte caractérisé par un ensemble d'actions explicite, une articulation a priori des préférences et un univers déterministe (les évaluations des actions par rapport à chaque attribut sont certaines) [FARQUHAR P. 1984].

Les étapes de la méthode MAVT sont comme suit :

- Etape 1** : Évaluer chacune des actions selon chaque critère (construire la matrice de décision : tableau multicritère).
- Etape 2** : Construire des fonctions de valeur partielle pour chaque critère (traduire le tableau multicritère en utilisant les valeurs).
- Etape 3** : Établir les poids des critères.
- Etape 4** : Calculer l'évaluation globale pour chaque action en utilisant une forme d'agrégation appropriée.
- Etape 5** : Déterminer la meilleure action (l'action qui maximise la valeur : celle qui a le plus grand score).
- Etape 6** : Faire des analyses de sensibilité.²⁶

3.3. Méthodes MAUT : Multiple Attribute Utility Theory (Keeney et Raifa 1976)

La méthode MAUT développée par KEENEY et RAIFA en 1976 peut être utilisée pour résoudre les problèmes de choix ou de rangement multicritère sur un ensemble d'actions. Elle construit une fonction d'utilité à partir d'un pré ordre défini par l'utilisateur sur un sous ensemble d'actions de référence. La procédure, basée sur un principe de régression ordinale, consiste à résoudre un programme linéaire. L'utilisateur peut modifier d'une façon interactive les fonctions d'utilité dans les limites fournies par une analyse de sensibilité du problème de régression ordinale. Pour effectuer ces modifications, l'utilisateur est aidé par une interface graphique très conviviale. La fonction d'utilité acceptée par l'utilisateur sert alors à définir un pré ordre sur l'ensemble des actions [JIMENEZ A. et al 2007]. MAUT est convenable pour incorporer des préférences des risques d'incertitudes dans les problèmes de décisions multicritères à partir d'une manière conséquente. [LØKEN E. et al 2008] La méthode MAUT repose sur la même idée que la méthode MAVT. En revanche, elle s'applique dans le cas où les évaluations des actions par rapport aux attributs sont imprégnées d'incertitude (aléatoire). L'idée est assez simple, le décideur doit associer une utilité à chacune des actions considérées. Pour ce faire, il va considérer séparément ces critères, et observer quelle utilité dégage chaque critère pour l'action considérée. En effet, l'utilité associée à l'action, évaluée sur les critères 1, 2, ..., , peut se décomposer sous la forme :

$$V_A(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n (x_i),$$

($V_i(x_i)$ Étant l'utilité générée au vu du critère i , si l'action considérée à la performance), à condition que les critères considérés soient indépendant.

²⁶[GUITOUNI A. 2010].

3.4. Methode AHP (Analytic Hierarchy Process): (Saaty 1980)

La méthode AHP inventée et développée par Saaty (1980) a pour objet d'aider des acteurs intervenant dans le processus de prise de décision à résoudre des problèmes complexes en organisant et en hiérarchisant les informations et les appréciations. Cette méthode est une des méthodes multicritères d'aide à la décision les plus utilisées dans plusieurs domaines, plus particulièrement, le choix de planification, d'allocation de ressources et de résolution d'un conflit.²⁷

Les fondements de cette méthode reposent sur deux approches simultanées que sont la pensée systémique et la pensée causale. La première intervient au moment de la simplification du problème qui structure des composantes hiérarchiquement. La seconde pensée, basée sur les opinions et les sentiments des acteurs, intervient dans l'évaluation par comparaison binaire de l'impact d'une variable sur une autre. D'une manière simple, on peut dire que cette méthode consiste à représenter un problème de décision par une structure hiérarchique reflétant les interactions entre les divers éléments du problème, à procéder ensuite à des comparaisons par paires des éléments de la hiérarchie, et enfin à déterminer les priorités des actions. La démarche pour l'utilisation de l'AHP est la suivante :²⁸

Étape 1 : Décomposer le problème en une hiérarchie d'éléments interreliés. Au sommet de la hiérarchie, on trouve l'objectif, et dans les niveaux inférieurs, les éléments contribuant à atteindre cet objectif. Le dernier niveau est celui des actions.

Étape 2 : Procéder à des comparaisons par paires des éléments de chaque niveau hiérarchique par rapport à un élément du niveau hiérarchique supérieur. Cette étape permet de construire des matrices de comparaisons. Les valeurs de ces matrices sont obtenues par la transformation des jugements en valeurs numériques selon l'échelle de Saaty (Échelle de comparaisons binaires), tout en respectant le principe de réciprocité :

²⁷ [Vaidya, O.S. and Kumar, S. 2006] « Analytic Hierarchy Process: An Overview of Applications. », European Journal of Operational Research, 169. 1-29.

²⁸ [Jeong-hwa AN. 2011] « Le choix d'un système de transport durable : analyse comparative des systèmes de transport guidé de surface. » Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est.

PARTIE 01 : AIDE MULTICRITERE A LA DECISION

Tableau 1.2.1 : Échelle de Saaty de la méthode AHP²⁹

Degré d'importance	Définition
1	Importance égale des deux éléments
3	Faible importance d'un élément par rapport à un autre.
5	Importance forte ou déterminante d'un élément par rapport à un autre.
7	Importance attestée d'un élément par rapport à un autre.
9	Importance absolue d'un élément par rapport à un autre.
2,4,6,8	Valeurs intermédiaires entre deux appréciations voisines
réciprocité	Si l'élément <i>i</i> se voit attribuer l'un des chiffres précédents lorsqu'elle est comparée à l'élément <i>j</i> , ce dernier aura donc la valeur inverse lorsqu'on le compare à <i>i</i> .

Étape 3 : Déterminer l'importance relative des éléments en calculant les vecteurs propres correspondants aux valeurs propres maximales des matrices de comparaisons.

Étape 4 : Vérifier la cohérence des jugements.
On calcule d'abord, l'indice de cohérence *IC*.

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

Où : λ_{\max} est la valeur propre maximale correspondant à la matrice des comparaisons par paires et *n* est le nombre d'éléments comparés.

On calcule le ratio de cohérence (RC) définit par :

$$RC = 100 \frac{IC}{ACI}$$

Où *ACI* est l'indice de cohérence moyen obtenu en générant aléatoirement des matrices de jugement de même taille.

Tableau 1.2.5 : Indice de cohérence moyen

Dimension de la matrice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cohérence aléatoire ACI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Une valeur de *RC* inférieure à 10% est généralement acceptable, sinon, les comparaisons par paires doivent être révisées pour réduire les incohérences.

²⁹ [RAKOTOARIVELO Jean Baptiste.2015] « ANALYSE COMPARATIVE DE METHODES MULTICRITERES D'AIDE A LA DECISION POUR LE SECTEUR FINANCIER. », Rapport de recherche, UNIVERSITE PAUL SABATIER DE TOULOUSE.

Étape 5 : Établir la performance relative de chacune des actions.

$$P_k(e_i^k) = \sum_{i=1}^{n_{k-1}} P_{k-1}(e_i^{k-1}) P_k\left(\frac{e_i^k}{e_i^{k-1}}\right), \text{ avec } \sum_{i=1}^{n_k} P_k(e_i^k) = 1$$

Où n_{k-1} est le nombre d'éléments du niveau hiérarchique $k-1$, et $P_k(e_{ik})$ est la priorité accordée à l'élément ei au niveau hiérarchique k .

Les points forts de la méthode AHP sont la modélisation du problème de décision par une structure hiérarchique et l'utilisation d'une échelle sémantique pour exprimer les préférences du décideur. Bien qu'elle soit très populaire, la méthode AHP a fait l'objet de plusieurs critiques :³⁰

- Un grand nombre d'éléments dans le problème de décision fait exploser le nombre de comparaisons par paires.
- Le problème de renversement de rang (deux actions peuvent voir leur ordre de priorité s'inverser suite à une modification (ajout ou suppression d'une ou de plusieurs actions) de l'ensemble des actions.
- L'association d'une échelle numérique à l'échelle sémantique est restrictive et introduit des biais.

3.5. Méthode TOPSIS : Technique for order preference by similiary to ideal solution (Hwang et Yoon 1981)

La méthode TOPSIS est une méthode de prise de décision multicritère développée par HWANG et YOON en 1981. Le concept de base de cette méthode est que, l'alternative choisie doit avoir la plus courte distance à l'alternative idéale (la meilleure sur tous les critères), et la plus grande distance à l'alternative négative idéale (qui dégrade tous les critères).³¹

3.6. Méthode UTA : Utility Theory Additive (Jacquet-Lagrezze 1982)

La méthode UTA développée par JACQUET-LAGREZE ET SISKOS en 1982 se base sur l'idée suivante :

Nous supposons que le décideur connaît bien un sous ensemble d'actions " ("). Nous cherchons à estimer la fonction d'utilité (ayant une forme additive) en s'approchant le plus possible des jugements portés par le décideur sur le sous-ensemble ". Pour ce faire, on sélectionne un sous-ensemble d'actions et on demande ensuite au décideur de : - Classer les actions de ", - Donner les critères significatifs $1, 2, \dots, j, \dots, n$; - Donner les évaluations des actions de " par rapport aux critères $1, 2, \dots, j, \dots, n$ (matrice des jugements), cette étape consiste à déterminer la fonction d'utilité totale qui colle le mieux avec les données (classement des actions et la matrice des jugements). La fonction d'utilité obtenue peut être considérée comme une estimation, à un terme d'erreur près, de la vraie fonction d'utilité : Où : désigne l'utilité de l'évaluation sur le critère, et désigne l'erreur associée à l'estimation de .

La méthode UTA s'applique en procédant comme suit :

³⁰ [Jeong-hwa AN. 2011].

³¹ [MÉNDEZ.M et al. 2006] « Multiple-Objective Genetic Algorithm Using The Multiple Criteria Decision Making Method TOPSIS », MOPGP'06: 7th Int. Conf. on Multi-Objective Programming and Goal Programming.

PARTIE 01 : AIDE MULTICRITERE A LA DECISION

-Etape 1 : Déterminer les évaluations extrêmes et écrire les valeurs des actions de " selon l'expression de .

-Etape 2 : Écrire la contrainte de normalisation des poids des critères

Etape 3 : Diviser, pour chaque critère, l'intervalle [,] en intervalles notés [,] ,avec = + () , =1, 2,

-Etape 4 : Appliquer la transformation ci-après [,] est un intervalle de valeurs de ce qui revient à dire que les fonctions d'utilité partielle sont monotones.

-Etape 5 : Déterminer les valeurs Dans la méthode UTA, on détermine les et on effectue des interpolations linéaires entre ces points. En d'autres termes, si , on aura [

-Etape 6 : Formuler le problème sous la forme d'un programme linéaire en se basant sur l'ensemble.

-Etape 7 : Résoudre le programme linéaire et appliquer la fonction d'utilité obtenue à l'ensemble des actions de [BEUTHE M. et al 2000].

3.7. La méthode EVAMIX : EVALuation of MIXed Criteria (VOOGD 1983)

La méthode EVAMIX développée par VOOGD en 1983 représente les évaluations ordinales et cardinales. Afin d'évaluer une action par rapport à une autre, on calcule deux indices de dominance, le premier pour les évaluations ordinales et le second pour les évaluations cardinales. Ces deux indices sont par la suite normalisés puis combinés pour donner une mesure globale de la dominance. Enfin, un score global par action est calculé, ce qui permettra de classer les actions.³²

-Etape 1 : Calculer les indices de dominance (de l'action i par rapport à l'action k) α_{ik} et

β_{ik} Respectivement pour les attributs ordinaux(O) et cardinaux(C).

$$\begin{cases} \alpha_{ik} = \sqrt[p]{\sum_{j \in O} [\pi_j \cdot v(e_{ij}, e_{kj})]^p} \\ \beta_{ik} = \sqrt[p]{\sum_{j \in C} [\pi_j \cdot v(e_{ij}, e_{kj})]^p} \end{cases}, \text{ avec } v(e_{ij}, e_{kj}) = \begin{cases} 1, \text{ si } e_{ij} > e_{kj} \\ 0, \text{ si } e_{ij} \approx e_{kj} \\ -1, \text{ si } e_{ij} < e_{kj} \end{cases}$$

-Etape 2 : Normaliser les indices de la manière suivante :

$$\begin{cases} \delta_{ik} = \frac{\alpha_{ik}}{\sum_i \sum_k |\alpha_{ik}|} \\ \mu_{ik} = \frac{\beta_{ik}}{\sum_i \sum_k |\beta_{ik}|} \end{cases}$$

³² [Ayadi. D (2012) « OPTIMISATION MULTICRITERE DE LA FIABILITE : APPLICATION DU MODELE DE GOAL PROGRAMMING AVEC LES FONCTIONS DE SATISFACCTIONS DANS L'INDUSTRIE DE TRAITEMENT DE GAZ. », THESE DE DOCTORAT, UNIVERSITE d'ANGERS et UNIVERSITE DE SFAX.

PARTIE 01 : AIDE MULTICRITERE A LA DECISION

-Etape 3 : Calculer la dominance D_{ik} globale de l'action i par rapport à l'action k . C'est simplement la somme pondérée des indices de dominance normalisés :

$$D_{ik} = \delta_{ik} \sum_{j \in C} \pi_j + \mu_{ik} \sum_{j \in C} \pi_j$$

-Etape 4 : Calculer le score global par action comme suit :

$$D_i = \sum_{k=1, k \neq i}^n D_{ik}$$

Où n est le nombre d'actions, et D_i permet de ranger les actions. ³³

Tableau 1.2.2: Récapitulatif des méthodes de critère unique de synthèse.³⁴

	Avantages	Inconvénients	Remarques
TOPSIS	Facile à appliquer	Volonté du décideur	Nature cardinale
SMART	Facile à appliquer	Une articulation des préférences <i>a priori</i>	Echelle cardinale Forme additive
MAVT	Une fonction de valeur partielle (0-1) pour chaque attribut	Construction des fonctions de valeurs n'est pas toujours évidente et difficile	Maximiser une fonction de valeur Forme additive est assez difficile
MAUT	MAVT aléatoire Fonction d'utilité	Vérification de l'interdépendance mutuelle	Echelle cardinale
UTA	Une forme additive Comme MAVT mais Désagrégation de la fonction d'utilité totale	Données cardinales	Méthode compensatoire
AHP	La pensée systémique (simplification du problème, hiérarchisation) et la pensée causale (sentiments des acteurs)	Nombre de comparaisons par paires est grand Renversement du rang Echelle numérique avec l'échelle sémantique introduit des biais	Très populaire

2. Les méthodes de sur-classement :

La définition d'une relation de sur-classement : « Une relation de sur-classement est une relation S entre décisions possibles représentant des préférences solidement établies du décideur, étant donné l'information dont il dispose.

On se prononcera pour : $a S b$ s'il existe suffisamment d'arguments pour admettre que : a est au moins aussi bonne que b Sans qu'il y ait de raison importante de refuser cette affirmation. »

³³ [VOOGD H ,1983] «Multicriteria Evaluation for Urban and Regional Planning», Pion Ltd, London.

³⁴ [Jeong-hwa AN. 2011].

L'école européenne se fixe comme ligne de conduite³⁵ :

- D'élaborer des concepts et des algorithmes dans une perspective d'aide à la décision et d'insertion dans un processus de décision, afin de fonder progressivement une conviction plutôt que de révéler un optimum ou une préférence pré-existante_
- De prendre en compte l'imprécis et l'incertain grâce au concept de seuils
- De remettre en question les notions habituelles de pondération
- De faire place à l'incomparabilité dans la modélisation des préférences, par la notion de surclassement.

Contrairement au modèle traditionnel (utilitarisme), on ne présuppose pas qu'une relation de préférence sur les décisions soit totale, ni transitive, ni même qu'elle pré-existe.

L'aide à la décision multicritère est plutôt considérée comme un processus d'élaboration d'une structure de préférences.

4.1. Les Méthodes ELECTRE :

Ces méthodes ont été développées par [ROY B. et al 1971]. Ils ont ainsi initialisé toute une série de méthodes, dites de surclassement basée sur des comparaisons d'actions deux à deux. Celles-ci demandent peu d'information pour pouvoir être implémentée, de plus cette information est facilement accessible au décideur, elle fournit donc des résultats solides.

4.1.1. ELECTRE I :

La méthode ELECTRE I relève de la problématique (procédure de sélection), le problème est posé en termes de choix de la "meilleure" action. Dans ce but et au moyen de la relation de surclassement S , il est nécessaire d'effectuer une partition de l'ensemble A des actions potentielles en deux sous-ensembles N et A/N complémentaires tels que : ³⁶

- Toute action appartenant à A/N est surclassée par au moins une action appartenant à N , les actions-éléments de A/N sont éliminées
- Les actions appartenant à N sont incomparables entre elles, ce sont les actions sélectionnées.

La relation de sur-classement S est construite en prenant appui sur une notion de concordance et une notion de discordance. L'hypothèse de sur-classement sera acceptée si un test de concordance et un test de discordances sont satisfaits.

Le graphe de surclassement visualise la relation de surclassement pour l'ensemble des couples des actions. La théorie des graphes est ici utilisée pour représenter les relations de surclassement. Le **noyau du graphe** est composé d'un ensemble de sommets tels que tous les sommets du graphe qui n'appartiennent pas au noyau (c'est-à-dire les actions du sous-ensemble A/N) sont surclassés par un sommet du noyau N au moins, et tels que les sommets du noyau N ne sont surclassés par aucun sommet de celui-ci.

L'appartenance d'une action au noyau ne signifie pas nécessairement que c'est une bonne solution ;

³⁵ [BOUBEKEUR.R. 2017] « Analyse multicritère d'aide à la décision. », Master en Informatique, UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS – MOSTAGANEM.

³⁶ [Gueddouj , Ouaret .2002] « Optimisation multicritère pour la gestion d'un réseau d'AEP » , Université de Bejaia.

le noyau représente simplement l'ensemble des actions parmi lesquelles se trouve "la meilleure" et il est constitué par des actions difficilement comparables.

ELECTRE I est une méthode assez simple puisqu'elle est basée sur des concepts naturels tels que d'accord / pas d'accord. Elle ne repose pas sur des a priori néanmoins le caractère très subjectif de certains paramètres importants de son algorithme est compensé par une analyse de robustesse très approfondie.

L'utilisateur d'une telle méthode doit rester conscient du fait que le noyau, vu auparavant, ne renferme pas les meilleures actions mais en fait les actions les plus difficiles à comparer entre elles et parmi lesquelles se trouve la "meilleure" action.³⁷

4.1.2. ELECTRE II :

La méthode ELECTRE II relève de la problématique β (procédure de classement). Elle vise, en utilisant les relations d'ordre sur chacun des critères, à munir l'ensemble A des actions potentielles d'une structure de préordre total afin de faciliter le choix.

En résumé, cette méthode a pour but de classer les actions potentielles, depuis les "meilleures" jusqu'aux "moins bonnes", en tolérant les ex æquo.

Il faut remarquer qu'en problématique β , il n'est pas tenu compte de la valeur intrinsèque de chaque action mais seulement de sa valeur relative par rapport aux autres actions. Cette méthode utilise, tout comme la méthode ELECTRE I, la relation de sur-classement S.

Cependant, la distinction est faite entre deux sortes de sur-classements : les sur-classements forts qui reposent sur des bases solides et sont donc avancés avec une grande certitude, les sur-classements faibles qui concernent ceux des sur-classements qui sont sujets à caution.

L'exploitation de ces deux graphes (l'un fort, l'autre faible) s'opère selon un algorithme qui permet de classer les actions. Cet algorithme permet d'obtenir deux classements différents (ou deux préordres totaux différents) : un classement direct et un classement inverse.

Les deux classements s'opèrent à partir du graphe de sur-classement fort, le graphe de sur-classement faible n'étant utilisé que pour départager si possible les ex æquo.

A partir de ces deux préordres totaux, un préordre partiel est établi, ainsi l'intérêt de ces deux classements provient de leur effet sur des actions incomparables.

Le point de départ d'ELECTRE II est tout à fait différent de celui d'ELECTRE I, il ne s'agit plus d'essayer de trouver la "meilleure" action, mais de classer toutes les actions de la "meilleure" jusqu'à la "moins bonne". Du même coup, les résultats sont plus tranchés que dans la précédente méthode.

L'approche utilisée reste toujours la même, elle est fondée sur la concordance et la discordance. Cependant, les moyens utilisés pour exprimer ces notions sont enrichis par rapport à ceux d'ELECTRE I et permettent de tenir compte de la volonté du décideur d'une manière plus fine.

Une autre grande nouveauté d'ELECTRE II est l'introduction de deux types de surclassement fort et faible, la méthode essaie ainsi de mieux respecter les nuances du réel.

³⁷ [Denis Bouyssou] « Science de décision ou aide à la décision ».

Enfin l'algorithme de classement est un important pas d'innovation. L'existence de deux préordres, établis d'une manière différente, offre la possibilité de se faire une idée de la solidité des résultats selon un angle de vue complémentaire à celui de l'analyse de robustesse : une action qui change énormément de rang entre les deux classements, direct et inverse, est une action qui peut difficilement se comparer aux autres.

4.1.3. La méthode ELECTRE III :

La méthode ELECTRE III relève de la *γ* *problématique* (procédure de classement) : son but est de classer les actions potentielles, depuis les "meilleures" jusqu'aux "moins bonnes". Cette méthode suit les grands principes déjà énoncés dans la présentation de la méthode ELECTRE II (construction de la relation de surclassement, élaboration de deux classements antagonistes, synthèse d'un classement final).³⁸

Il y a toujours, comme dans les deux précédentes méthodes, une hypothèse de surclassement, les notions de concordance et de discordance. Néanmoins, le changement apparaît dans la relation de surclassement qui comporte dorénavant une part de flou. Désormais, il n'est plus nécessaire de classer les couples d'actions potentielles en une des trois catégories (surclassement fort, surclassement faible, pas de surclassement du tout). En d'autres termes, la réflexion ne porte pas sur l'acceptation ou le rejet en bloc de l'hypothèse de surclassement, mais sur la crédibilité à accorder à cette hypothèse. Ceci est traduit par le degré de crédibilité de l'hypothèse de surclassement, qui varie de 0 à 1.

Une autre innovation importante d'ELECTRE III consiste à introduire, pour chacun des critères, deux seuils dits d'indifférence et de préférence stricte, ces seuils ont été définis de manière à tenir compte directement de l'incertitude qui entache plus ou moins les valeurs de la matrice des évaluations. L'introduction des seuils permet l'apparition d'une nouvelle notion, celle de préférence faible. Ainsi, le nombre de situations possibles au terme d'une comparaison de deux actions selon un critère donné passent de 3 à 5. Un troisième seuil, le seuil de veto, est utilisé dans la concrétisation de la notion de discordance.³⁹

L'algorithme de classement qui permet l'élaboration de deux préordres antagonistes est fondé sur le niveau de signification du degré de crédibilité. Ce niveau exprime à partir de quelle valeur la différence entre deux degrés de crédibilité devient significative. La procédure de classement rappelle celle de la distillation : il est question de distillation descendante et de distillation ascendante.

Le résultat final est un préordre partiel, c'est-à-dire que les ex æquo sont permis et que l'incomparabilité est tolérée.

ELECTRE III continue sur les traces d'ELECTRE II, néanmoins l'évolution se fait principalement vers deux directions, l'une favorable, l'autre défavorable :

³⁸ [Gueddouj et Ouaret.2002] « Optimisation multicritère pour la gestion d'un réseau d'AEP. », Ingéniorat, Université Béjaïa.

³⁹ [Roy.B et al. 1993] « Méthodes multicritères ELECTRE : description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale. », Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.

- +++ : l'exploitation de plus en plus nuancée de l'information.
- --- : une complexité croissante et donc une difficulté de compréhension grandissante de la part du décideur

Ainsi, il n'y a non seulement un indice de concordance qui caractérise le surclassement supposé d'une action par une autre, mais aussi des indices de concordance pour chaque critère relatif à ce couple d'actions. Il n'y a plus deux types de surclassement mais une multitude, ce qui permet de mieux saisir la réalité complexe. Le classement en deux préordres différents se fait d'une manière plus subtile que dans la méthode ELECTRE II. Le préordre final permet les incomparabilités entre actions. Mais l'avancée la plus importante est sûrement l'introduction des seuils de préférence stricte et d'indifférence, ainsi que du seuil de veto qui exprime mieux la discordance.

En conclusion, ELECTRE III est une méthode très complète et "élégante" (surtout le logiciel qui possède une interface agréable), qui a le mérite d'exploiter l'information en sauvant un maximum de nuances et d'avancer des conclusions bien fondées. En contrepartie, elle offre un maniement délicat et elle est pénalisée par sa propre complexité concernant la compréhension de la méthode par le décideur.

4.1.4. La méthode ELECTRE IS :

La méthode ELECTRE IS est une généralisation de la méthode ELECTRE I. Etant donné un ensemble fini d'actions évaluées sur une famille cohérente de critères quantitatifs ou qualitatifs, la méthode a pour objet d'aider à comparer les actions en vue du choix final d'une action ou d'un sous-ensemble d'actions.

La méthode agrège les préférences partielles en une relation de surclassement nette qu'elle analyse en termes de graphe. Le sous-ensemble recherché est constitué par le noyau du graphe.

La méthode Electre Is a les mêmes avantages et limites que la méthode Electre I.⁴⁰

4.1.5. La méthode ELECTRE IV :

La méthode Electre IV relève de la problématique de rangement ($P \gamma$).

Electre IV se caractérise par l'abandon des critères (on n'a pas besoin d'introduire des pondérations pour les critères). Elle se base sur une famille de pseudo-critères; ainsi, des seuils et des surclassements flous (Pour chaque critère j , on définit le seuil d'indifférence q_j , le seuil de préférence p_j et le seuil de veto v_j).

Dans certains problèmes de décision, il s'avère très difficile de déterminer des poids pour les critères. La méthode Electre IV a l'avantage d'éviter ce problème. La méthode Electre IV a aussi l'avantage de traiter des pseudo-critères ce qui traduit mieux la réalité.

La méthode Electre IV est facile à exploiter, toutefois, elle exige un grand nombre de paramètres techniques.⁴¹

⁴⁰[Hammami. A. 2003] « Modélisation technico-économique d'une chaîne logistique dans une entreprise réseau », Thèse de doctorat, l'école nationale supérieure des mines de Saint Etienne.

⁴¹[Hammami. A. 2003].

4.1.6. La méthode ELECTRE TRI :

La méthode ELECTRE TRI, qui relève aussi de la problématique b (procédure d'affectation), pose le problème en termes d'attribution de chaque action à une catégorie pré définie. Des actions de référence sont utilisées pour segmenter l'espace des critères en catégories. Chaque catégorie est bornée inférieurement et supérieurement par deux actions référence et chaque action de référence sert donc de borne à deux catégories, l'une supérieure et l'autre inférieure. ⁴²

Cette méthode présente trois intérêts principaux qui permettent de :

- Juger une action potentielle pour elle-même, indépendamment des autres actions potentielles. En ce sens, cette méthode juge chaque action potentielle sur sa valeur absolue (bien que relativement aux actions de référence pré définies)
- Fixer une ou plusieurs valeurs de référence, par exemple des normes légales ou des résultats minimaux pour l'acceptation de candidats
- Considérer un nombre d'actions potentielles plus important que les autres méthodes ELECTRE.

Avec la méthode ELECTRE TRI, le nombre d'actions à comparer et à diviser par 20 par rapport à une autre méthode ELECTRE.

Cette méthode suit la même démarche que la méthode ELECTRE III jusqu'aux degrés de crédibilité. L'affectation des actions à une catégorie est, bien entendu, spécifique.

Pour déceler l'incomparabilité, deux procédures d'affectation distinctes, appelées optimiste et pessimiste, sont nécessaires.

Elles consistent à comparer chaque action potentielle avec les actions de référence en commençant par la plus contraignante puis la moins contraignante. Si les deux procédures affectent l'action potentielle à la même catégorie, elle est alors parfaitement comparable avec les actions de référence, sinon, en fonction de la différence entre les deux catégories auxquelles elle est attribuée, elle est plus ou moins incomparable.

On adopte une segmentation multicritère simple, c'est-à-dire que les actions de référence sont parfaitement comparables entre elles.

ELECTRE TRI est une méthode intéressante dans la mesure où elle permet une comparaison différente des actions potentielles, non plus entre elles, mais par rapport à une référence stable. Elle est donc moins sensible que les méthodes relevant de la problématique g. Elle permet également d'utiliser des valeurs de référence, lorsqu'elles existent. Encore faut-il qu'elles soient cohérentes pour former une action de référence.

⁴² [LATRECH.A.2017] « Intégration de l'approche Multicritère dans la gestion de la coopération d'un groupe d'experts en télémaintenance. », Master en Informatique, UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS – MOSTAGANEM.

Tableau 1.2.3 : Propriétés des procédures ELECTRE⁴³

Propriétés	Procédures ELECTRE					
	I	IS	II	III	IV	Tri
Possibilité de tenir compte des seuils d'indifférence et/ou préférence	Non	Oui	Non	Oui	Oui	Oui
Nécessité de fixer des coefficients d'importance des critères	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Oui
Nombre et nature des relations de surclassement	1	1	2	1 floue	5	1 floue
Problématique décisionnelle	Choix (P. α)	Choix (P. α)	Rangement (P. γ)	Rangement (P. γ)	Rangement (P. γ)	Tri (P. β)
Résultat final	Noyau	Noyau avec indices de concordance et niveau de discordance	Préordre partiel	Préordre partiel	Préordre partiel	Affectation à des catégories ordonnées

4.2. Les méthodes PROMETHEE :

Les méthodes PROMETHEE sont utilisées dans de nombreux cas de recherche opérationnelle, et plus récemment dans la prise de décision en matière environnementale. L'objectif des méthodes d'analyse multicritère PROMETHEE est de construire via un système de préférences floues, un classement des alternatives des meilleures aux moins bonnes.

Ces méthodes feront le choix de la méthode d'application d'aide multicritère a la décision de notre travail.

4.3. Critique des méthodes de surclassement :

Les méthodes de surclassement ont été imaginées à partir d'une critique constructive de l'approche traditionnelle de l'utilité multiattribut. Une méthode de surclassement vise à construire une structure de préférence s'appuyant sur les préférences solidement établies du décideur.

Techniquement, les méthodes de surclassement sont basées non pas sur l'existence d'un critère global d'utilité, mais sur la comparaison entre alternatives admissibles et l'agrégation des résultats

⁴³[A. Guitouni et al ,2010].

de ces comparaisons. Elles s'apparentent dans leur essence à des procédures de vote pondéré, dans lesquelles les critères sont les votants.⁴⁴

5. Les méthodes interactives :

L'idée essentielle est d'éclairer le décideur sur son problème, en lui proposant une exploration raisonnée et méthodique de ses connaissances sur le problème. Une méthode interactive alterne successivement, de manière itérative :

- Les dialogues entre le décideur et l'homme de l'art (celui qui connaît la méthode)
- Les étapes de calcul.
Elle a pour buts :
 - De préciser et d'enrichir progressivement une structure de préférence globale (sorte d'apprentissage).
 - De sélectionner une ou plusieurs alternatives, sur la base d'une structure de préférence implicite connue plus ou moins exactement.

Les étapes de dialogue sont privilégiées dans ces méthodes. Elles permettent de mettre en évidence les préférences du décideur. Les informations demandées sont de nature qualitative (comparaison entre alternatives, critère à améliorer ...) ou quantitative (niveaux minimaux de critères, taux de substitution, concessions ...).

Voici quelques principes sous-jacents qui animent ce type de méthode :

- Réduire progressivement l'ensemble des alternatives admissibles par l'ajout de contraintes.
- Cerner ou apprendre progressivement les paramètres d'une fonction d'utilité implicite.
- Approcher au mieux une alternative idéale.
- Explorer des échantillons d'alternatives efficaces.
- Renforcer la confiance du décideur dans ses choix.
- Améliorer progressivement une alternative admissible.

Une question importante dans ces méthodes concerne la stabilité des préférences exprimées. Certaines méthodes admettent une remise en cause des préférences énoncées, acceptant même des contradictions, d'autres non. Enfin, l'arrêt du processus est toujours un point délicat et plus ou moins arbitraire.

6. Synthèse des trois familles de méthodes d'aide à la décision multicritère :

Le *Tableau 1.2.5* reprend de manière synthétique les différents avantages et périmètres d'utilisation des trois familles de méthodes d'aide à la décision multicritère présentées précédemment. Ce travail de synthèse peut aider un homme d'étude à s'orienter vers un type de méthodes en fonction des caractéristiques de sa problématique.⁴⁵

⁴⁴ [D. Bouyssou].

⁴⁵ [M. THOREL, 2014] « Aide à la décision multicritère pour la prescription de scénarios d'amélioration énergétique via une approche globale », Thèse de doctorat, Université de GRONBLE, France.

PARTIE 01 : AIDE MULTICRITERE A LA DECISION

Tableau 1.2.4 : Présentation synthétique des avantages et faiblesses des trois familles de méthodes d'aide à la décision multicritère

	Critère de synthèse	Surclassement	Jugements itératifs
Taille des ensembles d'actions à comparer	Petite à très grande	Petite à modérée	Très grande à ∞
Compensation entre critères	Totale	Partielle	-
Modulation des préférences	paramètres inter-critères (poids) et intra-critères (seuils)		-
Prise en compte des incertitudes sur les valeurs des critères	Possible	Oui	-
Détection des conflits (incomparabilités)	Non	Oui	-
Niveau des interactions avec le décideur	Faible	Moyenne	Élevé
Complexité des calculs	Faible	Moyenne à importante	Souvent importante
Automatisation du processus	Oui	Oui	Au cas par cas

Nous avons vu à travers ce bref état de l'art sur les méthodes d'aide à la décision multicritère que le choix d'une méthode dépend du type de problématique décisionnelle souhaité. Les obstacles principaux à l'utilisation de toutes les méthodes énoncées sont la nécessité d'évaluer systématiquement toutes les alternatives à comparer avec le même jeu de critères de décision, ainsi que d'interpréter et formaliser avec le plus grand soin les préférences du décideur. Ce travail préparatoire s'avère souvent long et fastidieux.⁴⁶

⁴⁶[THOREL, M. 2014].

7. Les limites des méthodes multicritères :

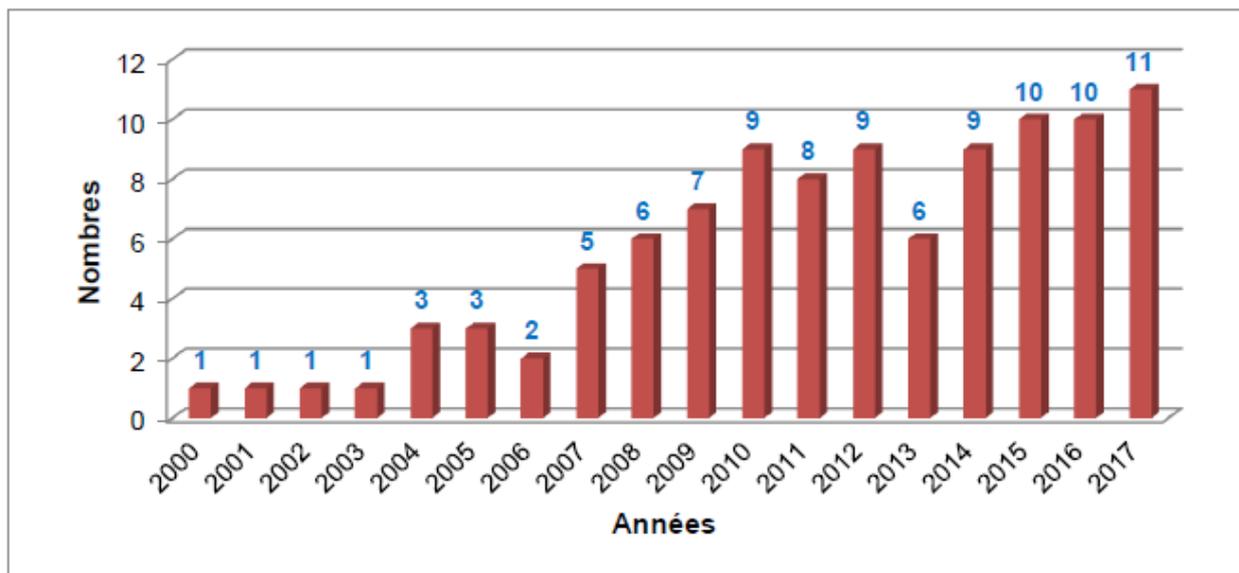
Ces méthodes souffrent également de quelques défauts :

- Difficultés opérationnelles pour choisir des actions ou des variantes à étudier, pour définir des critères de comparaison et pour produire des grilles de notation.
- Manque de données fiables, sur une durée suffisante pour mettre en place et valider les méthodes.
- Les analyses multicritères sont souvent basées sur des processus lents et itératifs, qui peuvent nécessiter une part de négociation importante et de longue durée.
- Les méthodes mathématiques d'agrégation des données nécessitent un savoir-faire de haut niveau.
- L'analyse multicritère peut être considérée comme une approche subjective.⁴⁷

8. Croissance des articles appliquant les MCDM dans la gestion de l'eau :

Le nombre total d'articles ayant utilisé l'une des méthodes du MCDM (Multi-Criteria Decision-Making) ou MCDA (multiple-criteria decision analysis) ne cessent de croître entre les années 2000 à 2017. La fréquence de la répartition par année de publication est présentée à la figure 2.7. Cette figure montre une augmentation relativement lente mais régulière au cours des dernières années. Le nombre d'articles publiés en appliquant l'une ou plusieurs méthodes MCDM a considérablement augmenté depuis 2007.

Figure 1.2.1. Croissance des articles appliquant les MCDM dans la gestion de l'eau (2000-2017).⁴⁸



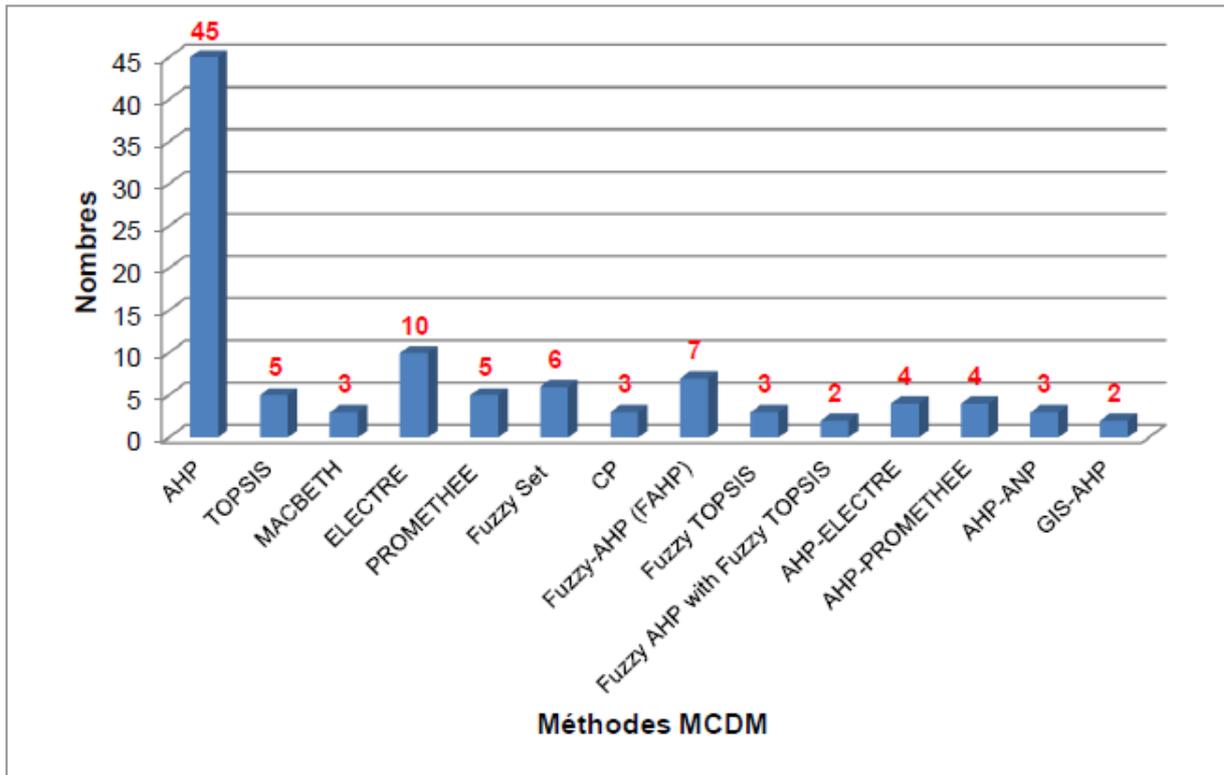
⁴⁷ ec.europa.eu/europeaid/evaluation/methodology/examples/too_cri_res_fr.pdf.

⁴⁸ [BOUKHARI S.2017] « La gestion durable des services d'eau potable et d'assainissement en Algérie. ». Thèse de Doctorat en sciences, Option Hydraulique. Université d'Annaba.

9. Les Méthodes de MCDM appliquées dans la gestion de l'eau :

Les 102 articles ont été classés ensuite par les différentes méthodes de MCDM appliquées dans la gestion de l'eau (figure 2.8). Les méthodes les plus couramment appliquées étaient les AHP (44,12%). Les méthodes combinées ont été utilisées plus largement que les autres méthodes MCDM (24,51%). L'approche AHP est également appliquée dans tous les domaines de la gestion de l'eau, et depuis cette méthode est jugée la méthode dominante parmi les méthodes MCDM.

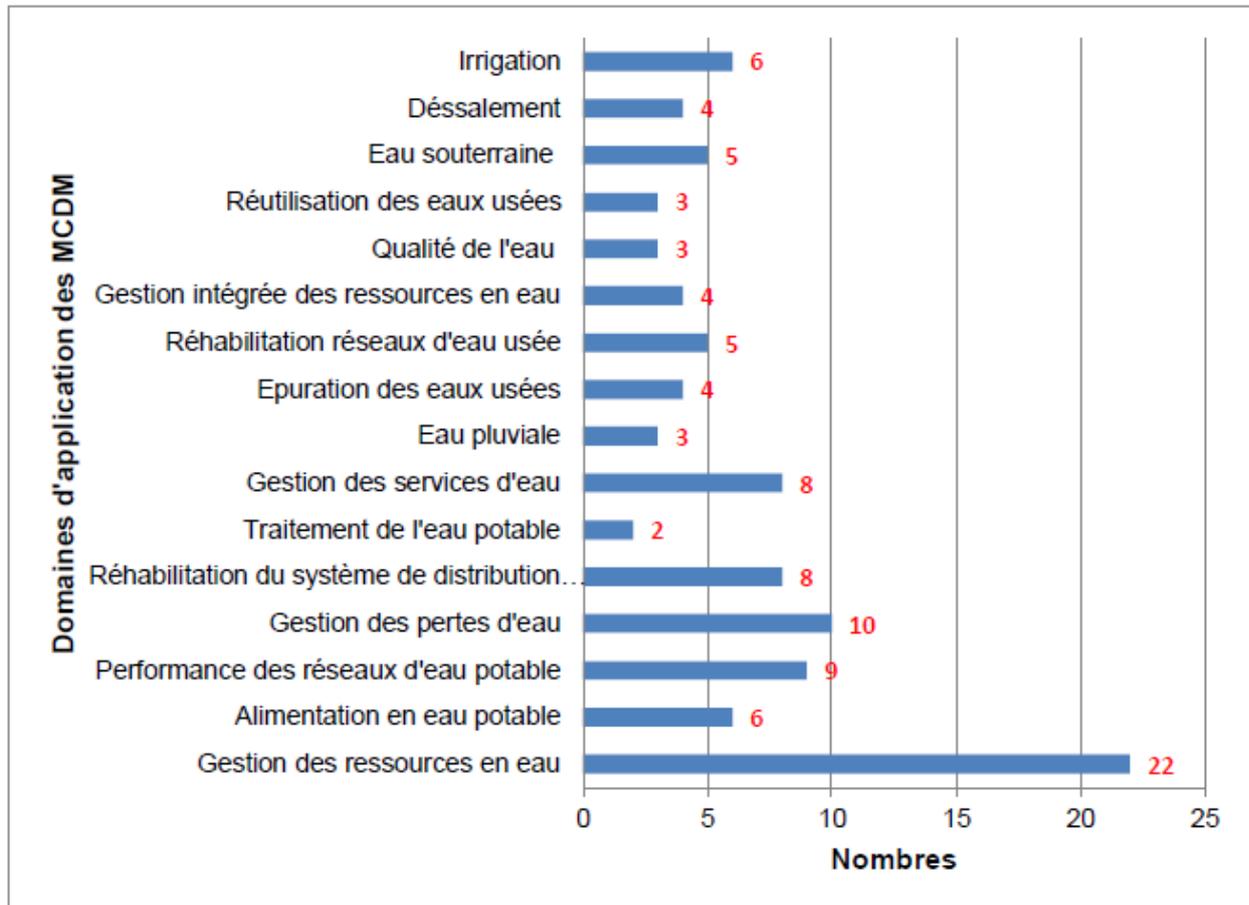
Figure 1.2.2 : Distribution des articles MCDM par méthodes appliquées dans la gestion de l'eau (2000 et 2017).



10. Domaines d'application des méthodes MCDM :

Ensuite, les 102 articles ont été classés par domaines d'application. Le nombre des documents dans les seize domaines d'application est présenté à la **figure 1.2.3**.

Figure 1.2.3 : Répartition des méthodes MCDM par domaine d'application (2000 et 2017).

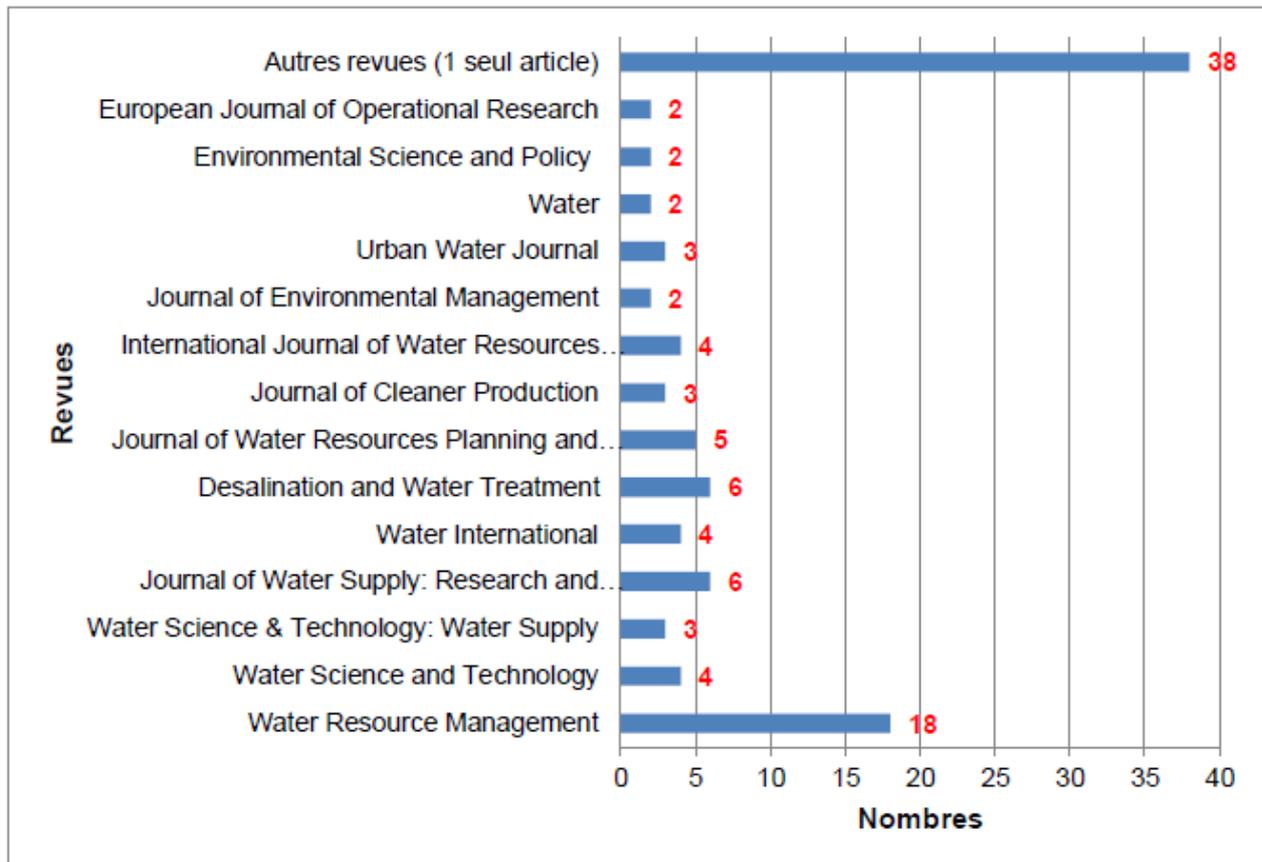


La majorité des applications des MCDM sont dans le domaine de la gestion des ressources en eau (21,57%) et la gestion des pertes en eau (9,80%).

11. Distribution par revues des articles MCDM appliqués dans la gestion de l'eau :

La diffusion de la recherche appliquant les méthodes MCDM est indiquée par le grand nombre et la diversité de revues à comité de lecture. Au fil des ans, les 102 articles ont été publiés dans 52 revues. La liste des revues connues pour avoir publié des articles sur la gestion de l'eau en appliquant les méthodes MCDM donne de la crédibilité à l'application des MCDM dans la gestion de l'eau (figure 2.11). Cette figure montre que la gestion de l'eau constitue une approche importante et pertinente pour une grande variété de domaines. Le Journal Water Resource Management a publié 18 publications (17,65%), suivi du Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA et le Journal Desalination and Water Treatment avec 6 publications (5,88%) pour chaque Journal. Cependant, 38 revues scientifiques ont publié seulement un seul article.

Figure 1.2.4 : Liste des revues ayant publiées sur les méthodes MCDM appliquées dans la gestion de l'eau (2000 et 2017).⁴⁹



12. Conclusion

Les méthodes d'analyse multicritère sont des outils (procédures d'agrégation) qui servent à aider pour décider et non pas pour décider. Le processus de décision basé sur l'AMC doit faire sortir la bonne décision de l'esprit du décideur dans un environnement multicritères ou certain critère sont conflictuels.

⁴⁹ [BOUKHARI S.2017].

CHAPITRE 03 :

Les méthodes PROMETHEE

- 1. Introduction.**
- 2. Aperçu historique des méthodes PROMETHEE.**
- 3. Principe des méthodes PROMETHEE.**
- 4. Les étapes des méthodes PROMETHEE.**
 - 4.1. Les fonctions de préférence.**
 - 4.1.1. Choix des fonctions de préférence.**
 - 4.1.2. Choix des paramètres relatifs aux fonctions de préférence.**
 - 4.2. Les poids des critères.**
 - 4.3. Evaluation des préférences.**
- 5. PROMETHEE I.**
- 6. PROMETHEE II.**
- 7. PROMETHEE III**
- 8. PROMETHEE IV.**
- 9. PROMETHEE V.**
- 10. Sélection de PROMETHEE Software.**
- 11. Avantages et inconvénients des méthodes Prométhée.**
 - 11.1. Les avantages.**
 - 11.2. Les inconvénients.**
- 12. Applications récentes de PROMETHEE en gestion des ressources en eau.**
- 13. Conclusion.**

1. Introduction

PROMETHEE ¹ est l'acronyme de *La méthode PROMETHEE Preference Ranking Organisation METHods for Enrichment Evaluation*. Les méthodes Prométhée sont des méthodes de surclassement basées sur les théories de ROY ² et elles ont été développées par Jean-Pierre Brans et Philippe Vincke à partir du milieu des années 80.

Ces procédures d'agrégation, qui ont été développées comme une alternative aux procédures de type ELECTRE tout en conservant certaines notions importantes au niveau des types de critères, seraient plus simples et plus facilement compréhensibles (qu'ELECTRE III notamment) pour les utilisateurs. Elles se basent sur une extension de la notion de critère par l'introduction d'une fonction donnant la préférence du décideur pour une action a_i par rapport à une autre action a_k . Une telle fonction est définie séparément pour chaque critère. Dans ces procédures, on construit des relations de sur-classement évaluées mais on délaisse le concept de discordance.³

Dans ce chapitre nous allons présenter les procédures PROMETHEE I et II qui sont les plus utilisées. Les procédures PROMETHEE III (conduisant à un ordre d'intervalle) et IV (lorsque l'ensemble des solutions admissibles est un continuum) ont été peu développées, alors que PROMETHEE V a été conçue pour des choix multicritères avec contraintes de segmentation.

2. Aperçu historique des méthodes PROMETHEE :

PROMETHEE a été créé par le professeur Jean-Pierre Brans en 1982. Il ne comprenait alors que les classements de base de PROMETHEE I et II. Peu de temps après, Bertrand Mareschal a commencé à travailler avec Jean-Pierre Brans sur le développement de la méthode. PROMETHEE III (ordre d'intervalle) et IV (continu) extensions ont été proposées en 1983. Un premier programme informatique (mainframe) a été mis en œuvre à ce moment-là.

Entre 1984 et 1989, deux étapes importantes ont été franchies : la méthode GAIA a été créée en tant qu'extension descriptive de PROMETHEE et le logiciel PROMCALC (MS-DOS) a été mis à la disposition des utilisateurs de PROMETHEE. GAIA est encore aujourd'hui l'une des rares méthodes MCDA descriptives efficaces. PROMCALC (plus tard PROMCALC-GAIA) a été l'un des premiers logiciels MCDA réellement interactifs à mettre l'accent sur l'interface utilisateur, les représentations graphiques et l'analyse de sensibilité. Dans les années 90, d'autres instruments basés sur PROMETHEE ont été créés : PROMETHEE V a fourni une solution pour la sélection multicritère contrainte d'un sous-ensemble d'actions tandis que PROMETHEE VI a introduit la notion de « cerveau décisionnaire » dans GAIA. Dans le même temps, des extensions de décision collective de PROMETHEE et GAIA ont également été introduites.

À la fin du siècle, Decision Lab 2000 a été lancé comme un projet conjoint entre l'équipe ULB et la

¹ [BRANS, VINCKE, & MARESCHAL, 1986] « How to select and how to rank projects: The method. » European Journal of Operational Research, 1986, vol. 24, issue 2, 228-238.

² Développeur des méthodes ELECTRE.

³ [Guitouni, A. et al, 2010] « Cadre méthodologique pour différencier les méthodes multicritères. » Rapport technique, Université Laval, Canada.

société canadienne Visual Decision. Il a remplacé PROMCALC et mis en place de nouvelles normes pour les logiciels MCDA.⁴

3. Principe des méthodes PROMETHEE :

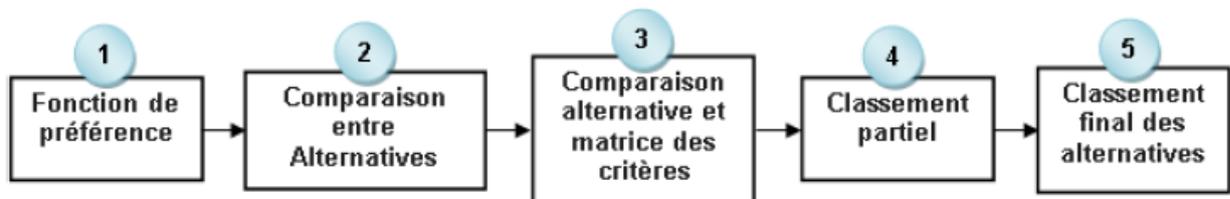
Le principe de la méthode PROMETHEE consiste à établir un processus de comparaison numérique de chaque action par rapport à toutes les autres actions. Ainsi il est possible de calculer le plus (mérite) ou le moins (démérite) de chaque action par rapport à toutes les autres. Le résultat de cette comparaison permet le classement ordonné des actions.⁵

4. Les étapes des méthodes PROMETHEE :

Ces méthodes appartiennent à la classe des méthodes de sur-classement et reposent sur cinq étapes⁶ comme le montre la **(figure 2.3.1)** :

- **Etape 1.** La préférence des décideurs entre deux actions est présentée par une fonction de préférence de manière indépendante.
- **Etape 2.** Les alternatives proposées sont comparées entre elles par rapport à la fonction de préférence,
- **Etape 3.** Les résultats des comparaisons et la valeur du critère de chaque alternative sont illustrés dans une matrice.
- **Etape 4.** L'approche de PROMETHEE I est utilisée afin de trier le classement partiel, et finalement,
- **Etape 5.** La cinquième action contient le processus PROMETHEE II afin de terminer les classements alternatifs.

Figure 1.3.1 : les étapes du PROMETHEE.



4.1 Les fonctions de préférence :

Pour simplifier la tâche au décideur, six fonctions de préférences ont été proposées par Brans et al (1986).⁷ Le choix du type de fonction devrait être fait selon un mode interactif entre le décideur et

⁴ <http://www.promethee-gaia.net/faq-pro>

⁵ [Brans J.P, 1982] « Elaboration d'instruments d'aide à la décision : méthode PROMETHEE » Université Laval, Québec.

⁶ [BOUKHARI S.2017] « La gestion durable des services d'eau potable et d'assainissement en Algérie. ». Thèse de Doctorat en sciences, Option Hydraulique .Université d'Annaba.

l'homme d'étude afin de modéliser au mieux les degrés de préférence du décideur. Dans chaque fonction, pas plus de deux paramètres sont à fixer et chacun de ces paramètres possède une signification économique précise.

4.1.1. Choix des fonctions de préférence :

Les types de fonction de préférence utilisés sont donnés ci-après (**Tableau 1.3.3**)

- **La fonction type I** : est généralement employée lorsque les données présentent un caractère discret tel un classement ou ordinal ou encore une valeur de type tout ou rien.
- **La fonction type II** est employée lorsque les seuils d'indifférence sont clairement apparents dans les données du problème posé.
- **La fonction type III** est généralement employée lorsque les données sont telles que les écarts entre elles présentent un caractère continu, ou encore lorsque toutes les valeurs intermédiaires entre les valeurs maximales et minimales de ces écarts sont possibles.
- **La fonction type IV** est parfois employée dans des cas d'espèce, en particulier lorsqu'on peut affirmer qu'un candidat n'est à la fois ni strictement préféré à un autre, ni indifférent. Ce candidat caractérisé par un écart donné par rapport à un autre se verra attribuer 1/2 point.
- **La fonction type V** est employée lorsque les seuils d'indifférence et de préférence stricte sont clairement apparents dans les données du problème multicritère posé.
- **La fonction type VI** (distribution gaussienne) est la fonction la plus employée dans les applications pratiques et est particulièrement indiquée en cas d'un nombre de candidats suffisamment élevé (en principe minimum 30). Dans ce cas il convient de calculer l'écart type * de cette distribution⁸.

⁷ [E.K. GABLA, 2016] « LA SÉLECTION DE PROJET DANS UN CONTEXTE DE DÉVELOPPEMENT DURABLE EN PRÉSENCE D'INCERTITUDE », Diplôme de maître en sciences en gestion de projet, Université du Québec à Rimouski.

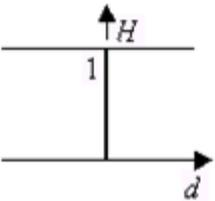
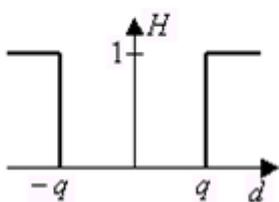
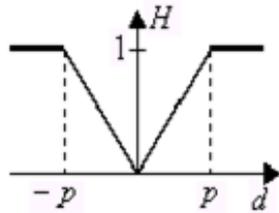
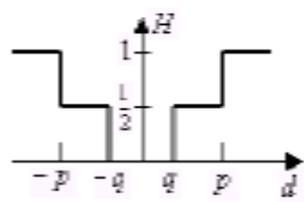
⁸ [Jean-Baptiste Rakotoarivelo. 2018] « Aide à la décision multi-critère pour la gestion des risques dans le domaine financier. » Université Paul Sabatier - Toulouse III.

Tableau 1.3.1 : Les six types de critères⁹

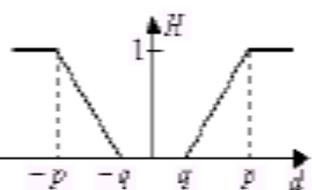
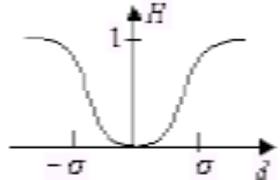
<i>Type I - Vrai critère</i>	Dans ce cas, dès qu'il y a un écart, il y a préférence stricte pour l'action ayant l'évaluation la plus élevée. Si le décideur choisit le type I pour un critère particulier, il ne doit fixer aucun paramètre.
<i>Type II- quasi-critère</i>	Les actions a et b sont dans ce cas indifférents aussi longtemps que l'écart d (a, b) ne dépasse pas un seuil q. Et au-delà de ce seuil, la préférence est stricte. Ici, il faut fixer le seuil d'indifférence q.
<i>Type III - critère à préférence linéaire</i>	Un tel critère permet au décideur de préférer progressivement a à b en fonction de l'écart observé entre g(a) et g(b). Le degré de préférence croit alors jusqu'à ce que le seuil p soit atteint, et au-dessus de ce seuil, la préférence est stricte. Dans ce cas, le seul paramètre à fixer est le seuil de préférence stricte p.
<i>Type IV : critère à paliers</i>	Deux actions a et b sont ici considérées comme indifférentes aussi longtemps que l'écart entre g(a) et g(b) ne dépasse pas q . Entre q et p, le degré de préférence est faible, et au-delà de p, la préférence devient stricte. Il y a donc ici deux paramètres à fixer.
<i>Type V : critère préférence linéaire avec zone d'indifférence</i>	Dans ce cas-ci comme dans le précédent, a et b sont considérées comme indifférentes aussi longtemps que l'écart entre g(a) et g(b) ne dépasse pas q. Au-delà de ce seuil, le degré de préférence croit linéairement avec d jusqu'à atteindre un seuil de préférence strict à partir de p. Ici encore, deux paramètres doivent être fixés.
<i>Type VI : critère (inverse) gaussien</i>	Dans ce cas, le degré de préférence croit de façon continue en fonction d'un seul paramètre qui doit être fixé.

⁹ [MOHAMED MOUINE,2011] « COMBINAISON DE DEUX MÉTHODES D'ANALYSE DE SENSIBILITÉ », FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE. UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC.

Figure 1.3.2 : Les six types de critères¹⁰

Type de fonction critère	Définition analytique	Forme	Paramètres à définir
(I) Vrai critère	$H(d) = \begin{cases} 0, & d = 0; \\ 1, & d > 0. \end{cases}$		—
(II) Quasi-critère	$H(d) = \begin{cases} 0, & d \leq q; \\ 1, & \text{autrement.} \end{cases}$		q
(III) Critère à préférence linéaire	$H(d) = \begin{cases} \frac{ d }{p}, & d \leq p; \\ 1, & \text{autrement.} \end{cases}$		p
(IV) Critère à paliers	$H(d) = \begin{cases} 0, & d \leq q; \\ \frac{1}{2}, & q < d \leq p; \\ 1, & \text{autrement.} \end{cases}$		q, p

¹⁰ [E.K. GABLA,2016] « LA SÉLECTION DE PROJET DANS UN CONTEXTE DE DÉVELOPPEMENT DURABLE EN PRÉSENCE D'INCERTITUDE », Diplôme de maître en sciences en gestion de projet, Université du Québec à Rimouski.

<p>(V) Critère à préférence linéaire avec zone d'indifférence</p>	$H(d) = \begin{cases} 0, & d \leq q; \\ \frac{ d - q}{p - q}, & q < d \leq p; \\ 1, & \text{autrement.} \end{cases}$		<p>q, p</p>
<p>(VI) Critère (inverse) gaussien</p>	$H(d) = 1 - \exp\left[-\frac{d^2}{2\sigma^2}\right]$		<p>σ</p>

4.1.2 Choix des paramètres relatifs aux fonctions de préférence :

Le choix des seuils p et q (éventuellement σ) est un des choix des plus délicats traduisant le choix du décideur. La méthode la moins sujette à critique consiste à obtenir des valeurs des seuils à partir des propositions d'un groupe de travail ad hoc. Cette proposition devra naturellement être formulée avant l'utilisation de la méthode afin d'éviter toute manipulation. Hélas très souvent le décideur ne sait ou ne veut pas exprimer ses seuils de préférence,¹¹ ce qui conduit le technicien à fixer lui-même les valeurs de ces seuils.

Si ce cas de figure se présente, il sera veillé à :

- NE PAS choisir une valeur de seuil supérieure à *l'écart maximum* relevé entre les candidats, car on compare des candidats réels entre eux et non pas par rapport à un candidat virtuel ou utopique,
- Choisir une valeur *logique* pour ces seuils, par exemple *l'écart type* pour le seuil de préférence "p" (si l'on dispose d'une série de données suffisamment grande).

4.2 Les poids des critères :

Les poids des critères sont des données essentielles qui reflètent les exigences ou priorités du décideur. Ils traduisent l'importance relative des critères et sont définis indépendamment des échelles de mesure. Le meilleur critère est celui qui a le poids le plus élevé et la normalisation des poids se fait de telle sorte que leur somme soit égale à 1 (100%).¹²

4.3 Evaluation des préférences :

L'action " a_1 " doit être comparée à l'action " a_2 " mais encore aux autres actions $a_3 \dots a_k$. Afin d'évaluer toutes les actions possibles (k), nous définissons les flux suivants :

¹¹ Voir théorème d'Arrow.

¹² [E. K. GABLA, 2016].

– Flux sortant :

$$\Phi^+(a_1) = \frac{1}{k-1} \sum_i \Pi(a_1, a_i)$$

– Flux entrant :

$$\Phi^-(a_1) = \frac{1}{k-1} \sum_i \Pi(a_i, a_1)$$

– Flux net :

$$\Phi(a_1) = \Phi^+(a_1) - \Phi^-(a_2)$$

Le flux sortant, somme des valeurs associées à tous les arcs issus de "a", est une mesure de la manière dont "a" a surclassé toutes les autres actions.

Le flux entrant, somme des valeurs associées à tous les arcs arrivant en "a", est une mesure de la manière dont "a" est dominée par les autres actions.

5. PROMETHEE I :

Cette méthode se base sur les considérations suivantes :

"une action sera d'autant meilleure que son flux sortant est grand et/ou son flux entrant faible". Ces flux permettent donc de déduire des pré-ordres suivants : (*flux sortant* + et *flux entrant* -) :

$$a_1 P^+ a_2 \quad \text{si} \quad \Phi^+(a_1) > \Phi^+(a_2)$$

$$a_1 I^+ a_2 \quad \text{si} \quad \Phi^+(a_1) = \Phi^+(a_2)$$

$$a_1 P^- a_2 \quad \text{si} \quad \Phi^-(a_1) > \Phi^-(a_2)$$

$$a_1 I^- a_2 \quad \text{si} \quad \Phi^-(a_1) = \Phi^-(a_2)$$

Sur base des deux préordres découlant des considérations ci-dessus, la méthode Prométhée I va déduire un nouveau préordre partiel (certaines actions peuvent ne pas être ordonnées suite au fait qu'elles sont incomparables) à l'aide des relations suivantes :

- $a_1 P a_2$ " a_1 " surclasse " a_2 " si :

$$a_1 P^+ a_2 \text{ et } a_1 P^- a_2$$

$$a_1 P^+ a_2 \text{ et } a_1 I^- a_2 \text{ OU}$$

$$a_1 I^+ a_2 \text{ et } a_1 P^- a_2$$

- $a_1 I a_2$ " a_1 " et " a_2 " sont indifférents si :

$$a_1 I^+ a_2 \text{ et } a_1 I^- a_2$$

- $a_1 R a_2$ " a_1 " et " a_2 " sont incomparables :

Dans tous les autres cas.

Par exemple : $a_1 P+ a_2$ et $a_2 P- a_1$ c'est-à-dire:

$$\Phi+(a1) > \Phi+(a2) \text{ et } \Phi-(a2) < \Phi-(a1)$$

6. PROMETHEE II :

La méthode Prométhée II permet la détermination d'un préordre total (toutes les actions sont ordonnées même si elles sont incomparables). Ce préordre total sera induit sur base de la notion du flux net $\Phi(\mathbf{a})$ que nous avons défini ci-dessus.¹³

Nous aurons :

$$a_1 P^{II} a_2 \text{ "a1" surclasse "a2" "a2" si } \Phi(a_1) > \Phi(a_2)$$

$$a_1 I^{II} a_2 \text{ "a1" et "a2" indifférents si } \Phi(a_1) = \Phi(a_2)$$

A priori, il pourrait sembler plus utile au décideur de disposer du préordre total découlant de Prométhée II. Cependant, il ne faut pas perdre de vue que le préordre partiel découlant de Prométhée I est plus réaliste car il prend en considération les surclassements découlant des flux entrant et sortant et que, de plus, il permet de mettre en évidence les incomparabilités.

Le cheminement commun aux deux méthodes est le suivant :

a) On commence par attribuer un poids et un type à chaque critère. Le type de ce critère est en quelque sorte une fonction de préférence.

b) PROMETHEE compare les actions deux à deux et mesure l'intensité de préférence $\mathbf{P(a,b)}$ de l'une par rapport à l'autre sur chaque critère au moyen d'une fonction $\mathbf{p(d)}$ où d représente la différence des évaluations $\mathbf{g(a)-g(b)}$ sur le critère. Les six types de critères sont disponibles et présentés dans le (**Tableau 1.3.1**)

c) PROMÉTHÉE calcule ensuite un indicateur de préférence (a,b) comme la moyenne des intensités $P_c(a,b)$ éventuellement pondérées par l'importance w_c accordée au critère c par le décideur :

Les indicateurs de préférence pour chaque couple sont calculés dans chaque sens (**(a,b) et (b,a)**) et peuvent être représentés dans un graphe valué de surclassement. Ce graphe n'est pas exploité en tant que tel, mais au travers des flux sortants $+(a)$ et entrants $-(a)$ de chaque action a :

Les flux représentent donc l'intensité des avantages et des désavantages qu'une action a possède vis-à-vis de l'ensemble des autres actions candidates.¹⁴

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

¹³ [Institut Supérieur de Commerce et de Comptabilité de BIZERTE.2009] « Chapitre III : Les Méthodes de Décision Multicritères. Multi-Criterias Decision Making "MCDM" » Université 7 Novembre à Tunis Carthage.

¹⁴ [M. MOUINE ,2011].

Les méthodes PROMETHEE sont faciles et compréhensibles par l'utilisateur. D'autres variantes des méthodes PROMETHEE ont déjà vu le jour : PROMETHEE III (conduit à un ordre d'intervalle), PROMETHEE IV (Lorsque l'ensemble des solutions admissibles est un continuum) et enfin PROMETHEE V (cette méthode a été conçue pour des choix multicritères avec contraintes de segmentation).

7. PROMETHEE III:

PROMETHEE III est une extension de PROMETHEE II dans laquelle la notion d'indifférence est amplifiée. En effet, le préordre complet PROMETHEE II laisse relativement peu de place aux indifférences, étant donné qu'elles résultent d'égalités entre les flux nets des actions. En pratique, vu le caractère continu des flux de surclassement, ces situations sont rares et, le plus souvent, PROMETHEE fournit un ordre complet sur l'ensemble des actions, sans aucune indifférence. Cette situation peut paraître paradoxale, en particulier lorsque deux actions ont des flux nets très proches l'un de l'autre.

PROMETHEE III apporte une solution à ce problème en remplaçant les flux nets ponctuels par des intervalles. Pour ce faire, remarquons tout d'abord que calculer le flux net $\Phi(a)$ associé à une action a correspond à comparer cette action aux $(n-1)$ autres et à prendre la moyenne des degrés de préférences résultants :

$$\pi(a,x) - \pi(x,a) \quad x \neq a$$

Cette grandeur résume donc l'information obtenue lors de ces $n-1$ comparaisons et peut être interprétée comme la position attendue de a lorsqu'elle est comparée à une autre action quelconque. Dans cette optique, la variance de ces quantités apporte une information supplémentaire sur la position de a .

$$\sigma^2(a) = \frac{1}{n-1} \in [\pi(a,x) - \pi(x,a) - \Phi(a)]^2$$

En effet, si $\sigma^2(a)$ est petit, la position de a vis-à-vis des autres actions apparaît comme solidement établie. Dans le cas contraire, les performances de a par rapport à une action quelconque peuvent varier beaucoup plus. Il paraît donc logique d'accorder plus de signification à la valeur exacte de $\Phi(a)$ lorsque $\sigma^2(a)$ est petit.

C'est pourquoi d'après les auteurs de la méthode PROMETHEE l'intervalle de flux net associé à l'action a dans PROMETHEE III est reproduit de la façon suivante :

$$\left[\Phi_{\min}(a) = \phi(a) - \alpha \cdot \sigma(a), \phi_{\max}(a) = \phi(a) + \alpha \cdot \sigma(a) \right]$$

Où α est un nombre réel positif à déterminer.

La structure de préférence construite sur A par PROMETHEE III est définie de la façon suivante ¹⁵:

¹⁵ [B.Taibi. 2010] « L'analyse Multicritère comme outil d'aide à la décision : Application de la méthode PROMETHEE Etude de cas : l'entreprise SEROR », Thèse de magister, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen.

$$aPb \Leftrightarrow \phi_{\min}(a) \succ \phi_{\max}(b)$$
$$aIb \Leftrightarrow \begin{cases} \phi_{\min}(a) \leq \phi_{\max}(b) \\ \phi_{\min}(b) \leq \phi_{\max}(a) \end{cases}$$

Si l'obtention d'un préordre est souhaitée, il est possible d'y arriver en réduisant suffisamment la valeur du paramètre α . Une procédure itérative peut être facilement conçue de façon à éviter de réduire trop la valeur de α et de retomber alors sur le préordre de PROMETHEE II (qui est équivalent à prendre $\alpha=0$). Pour ce faire, en partant d'une valeur raisonnable de α , il faut détecter la présence et réduire progressivement α de façon à éliminer ces situations. De cette façon, on arrive à un préordre complet dans lequel les proximités entre flux nets se traduisent par des indifférences.

8. PROMETHEE IV:

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 :

$$j=1,2,\dots,k \qquad w_j^- \leq w_j \leq w_j^+$$

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 :

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

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.¹⁶

9. PROMETHEE V :

Optimisation sous contraintes fait partie de la famille des méthodes PROMETHEE, elle permet d'ajouter des contraintes supplémentaires selon les exigences du décideur. Par exemple, le nombre d'actions qui doit être sélectionné ou le budget alloué à l'opération ou encore une incomparabilité entre deux actions (si les actions A et B ne peuvent pas être sélectionnées en même temps).

De nombreuses autres types de contraintes peuvent être ajoutés,¹⁷cette méthode a déjà utilisée par Vetschera and Dealmeida en 2012 pour ressourdre un problème d'optimisation de portefeuille. Abu Taleb et Mareschal en 1995 ont appliqué la méthode d'aide a la décision multicritère PROMETHEE V pour évaluer et choisir un ensemble d'options potentiellement réalisables pour le développement des ressources en eau dans le Jourdain.

¹⁶ [B.Taibi. 2010].

¹⁷ [Brans. 1992] « How to discriminate hard and soft multicriteria problems in the discrete case: the PROMETHEE VI procedure ».

PARTIE 01 : AIDE MULTICRITERE A LA DECISION

Fontana et Morais en 2013 ont utilisé PROMETHEE V pour aider les décideurs à choisir un ensemble d'alternatives possibles pour la réhabilitation du plus grand nombre de points de fuite dans un réseau d'eau.¹⁸

Tableau 1.3.2 : Tableau comparatif des méthodes PROMETHEE¹⁹

Méthodes	Caractéristiques
PROMETHEE I	pré-ordre partiel (préférence stricte, indifférence et incomparabilité).
PROMETHEE II	Pré- ordre complet (indifférence et préférence stricte).
PROMETHEE III	Un ordre d'intervalle.
PROMETHEE IV	L'ensemble des solutions admissibles est un continuum.
PROMETHEE V	Choix multicritères avec contraintes de segmentation.

10. Sélection de PROMETHEE Software :

Dans la méthodologie PROMETHEE on y trouve une diverse disponibilité de progiciels commerciaux avec diverses fonctions interactives et outils d'analyse de sensibilité. (Le tableau 1.3.3) décrit le développement chronologique de divers logiciels disponibles pour PROMETHEE.

¹⁸ [M. Seddiki. 2016] « Laide a la décision multicritère pour la rénovation thermique des bâtiments en maçonnerie : Cas de l'Algérie. », Thèse de doctorat, Université des sciences et de technologie, Oran.

¹⁹ [AYADI D. et al. 2010].

PARTIE 01 : AIDE MULTICRITERE A LA DECISION

Tableau 1.3.3 : PROMETHEE Software disponible²⁰

Year	Name	Developer	Operating System	Source
1990	PromCalc	Bertrand Mareschal and Jean-Pierre Brans	MS-DOS	Discontinued
2000	Decision Lab	ULB and Visual Decision	Windows	Discontinued
2010	D-Sight	Yves De Smet	Windows	http://www.d-sight.com/ Free Demo for 14 days (6 Alternatives, 8 Criteria)
2012	Smart Picker Pro	Philippe Némery	Windows	http://www.smart-picker.com/ Free trial for unlimited period with limitation in alternatives and criteria (5 Alternatives and 4 Criteria)
2012	Visual Promethee	Bertrand Mareschal	Windows	http://www.promethee-gaia.net/software.html

²⁰ [I. P. Mohanrao. 2014].

PARTIE 01 : AIDE MULTICRITERE A LA DECISION

Le tableau 1.3.4 décrit les différentes fonctionnalités du logiciel commercial PROMETHEE disponible.²¹

Tableau 1.3.4 : Différentes caractéristiques des logiciel PROMETHEE disponibles

Features	D-Sight	Smart Picker Pro	Visual PROMETHEE**
Group Decision Making	Y	Y	Y
Sensitivity Analysis	Y	Y	Y
Web Integration	Y	N*	N
Module Support	Y	N*	N
GIS Integration	Y	N*	Y
Weight Elicitation Support	Y	Y	N
Utility Method Support	Y	N	N
Price, (AUD)	249	190	Free

**On contact customization is available for these features*

***This software was at beta stage during software selection time of study*

11. Avantages et inconvénients des méthodes PROMETHEE :

11.1. Les avantages :

Les méthodes Prométhée 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.

- L'introduction de six fonctions de préférence différentes dans un seul et même processus ; il s'agit d'une extension de critère mais de façon bien formalisée.²²
- Cette méthode est parvenue à intégrer de façon simple les développements récents dans la modélisation des préférences.
- Prométhée, 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.
- La simplicité de Prométhée 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.

²¹ [I. P. Mohanrao. 2014].

²² [A. Schärli.1985] « Décider sur plusieurs critères : panorama de l'aide à la décision multicritère », Presse polytechniques et universitaires romandes, Suisse.

11.2. Les inconvénients :

Prométhée 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.

- Par rapport à Electre III, Prométhée perd des nuances dans l'évaluation des arcs de surclassement (qui expriment par exemple que « a_1 est préférée à a_2 »).²³
- En tant que méthode de surclassement de type rangement. Prométhée 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.²⁴
- Par comparaison à la méthode MAUT, par exemple, la méthode Prométhée manque de fondements théoriques qui permettraient de mieux apprécier les hypothèses implicites sur lesquelles elle repose.

12. Applications récentes de PROMETHEE en gestion des ressources en eau :

[Behzadian et al.2010] ont examiné 217 articles scientifiques utilisant les méthodes PROMETHEE dans de vastes domaines d'application tels que les ressources en eau, la gestion de l'environnement, la logistique et les transports, la foresterie, la chimie, la finance etc.²⁵

Selon [Behzadian et al.2010], la plupart des études hydrologiques fondées sur PROMETHEE sont axées sur la planification durable des ressources en eau, l'évaluation des stratégies de gestion de l'eau et la planification de l'irrigation. L'examen a également révélé que la gestion de l'environnement était le sujet le plus populaire dans les applications PROMETHEE, couvrant plusieurs domaines spécifiques tels que la gestion des déchets, l'analyse du cycle de vie, l'évaluation de l'impact environnemental et l'aménagement du territoire. [Mutikanga et al.2011] a récemment appliqué PROMETHEE II au classement des stratégies de réduction des pertes d'eau pour les services d'eau urbains locaux à Kampala, en Ouganda, en Afrique de l'Est. Sept stratégies de réduction des pertes en eau ont été évaluées pour sept MP représentant les impacts économiques, environnementaux, sanitaires, techniques et sociaux. Récemment, [Nasiri et al. 2012] ont combiné les approches SIG et PROMETHEE II pour localiser les zones les plus propices à la recharge artificielle des eaux souterraines dans le bassin de Garabaygan en Iran afin de minimiser les effets des inondations. L'étude a sélectionné des zones appropriées potentielles à partir de la cartographie basée sur le SIG en utilisant certaines règles d'exclusion. Ces zones appropriées ont été classées en utilisant PROMETHEE II selon huit critères physiques différents pour produire la carte finale d'aptitude des terres.

PROMETHEE a également été utilisé pour déterminer les stratégies réalisables de gestion de l'eau recyclée pour la lessive domestique à Sydney, en Australie [Chen et al., 2012]. Cinq stratégies alternatives envisagées étaient basées sur la combinaison de différentes techniques de traitement de

²³ [A. Schärliq.1985].

²⁴ [D. Diakoulaki. 1999] « ranking of alternative actions: extension of the PROMETHEE method. », European journal opérational research.

²⁵ [I. P. Mohanrao, 2014].

l'eau (telles que la microfiltration, l'osmose inverse et le charbon actif granulaire) avec des machines à laver existantes ou nouvelles.

[Silva et al. 2010] ont utilisé PROMETHEE dans un cadre de prise de décision collective dans le classement des stratégies d'atténuation pour éviter les effets de dégradation dans le bassin versant de la rivière Jaboatao au Brésil. Les stratégies considérées étaient le développement d'une station d'épuration des eaux usées, l'éducation, le plan d'agriculture durable, la récupération de la végétation indigène et l'amélioration de la collecte des déchets. Ces stratégies ont été évaluées par rapport aux aspects économiques, sociaux et environnementaux.

[Kodikara et al. 2010] ont également utilisé PROMETHEE pour évaluer les performances du système d'approvisionnement en eau de Melbourne selon différentes règles de fonctionnement alternatives et huit mesures de performance représentant des objectifs économiques, environnementaux et sociaux. L'étude a également fourni une méthodologie d'élicitation des préférences PROMETHEE pour la prise de décision par rapport aux différents groupes de parties prenantes, à savoir ; les gestionnaires des ressources, les utilisateurs de l'eau et les groupes d'intérêt environnementaux.²⁶

13. Conclusion :

Dans ce chapitre La famille des méthodes PROMETHEE a été explicité, l'accent est mis sur leurs avantages pour les consolider et sur leurs inconvénients pour les surmonter lors de sélection des procédés de dessalement.

L'aide à la décision est une activité scientifique et professionnelle. Par le biais de ce travail nous voulons jouer le rôle du scientifique pour une sélection fondée des procédés de dessalement. Le dialogue entre le scientifique et le professionnel doit continuer jusqu'à la fin du processus de décision.

²⁶ [I.P. Mohanrao, 2014].

PARTIE 02

***LA GESTION DES RESSOURCES EN EAU ET
LE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER.***

Chapitre 04 : LA GESTION DES RESSOURCES EN EAU.

Chapitre 05 : LE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER.

Chapitre 06 : LES PROCEDES DE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER.

CHAPITRE 04 :

LA GESTION DES RESSOURCES EN EAU

- 1. Introduction.**
- 2. Les ressources en eau.**
 - 2.2. Ressources renouvelables en eau douce.**
 - 2.2. Les eaux conventionnelles.**
 - 2.3. Les eaux non- conventionnelles.**
- 3. La gestion des ressources en eau dans le monde.**
 - 3.1. Répartition des ressources en eau dans le monde.**
 - 3.2. Usages et pollution des eaux douces dans le monde.**
 - 3.3. Problèmes et défis auxquels sont confrontés les gestionnaires de L'eau.**
 - 3.4. La gestion intégrée des ressources en eau.**
- 4. La gestion des ressources en eau en Algérie.**
 - 4.1. Stratégies pour remédier aux problèmes de gestion de l'eau.**
- 5. Conclusion.**

1. Introduction

« Plutôt que d'être nécessaire à la vie, l'eau est la vie elle-même »¹

Les ressources en eau douce dans le monde sont en diminution sous l'effet de la croissance démographique, de l'expansion de l'activité industrielle et du changement climatique. Le manque d'eau potable concerne principalement quelques pays ayant des réserves limitées ou bien se trouvant dans des zones arides tels que le Moyen Orient, ou l'Afrique du Nord. En effet, l'eau disponible sur notre planète se trouve à **97%** dans les mers et les océans. Elle doit alors être traitée pour être rendue potable. L'homme a commencé par produire des petites quantités à partir de simples bouilleurs pour arriver au cours des dernières années à une production de **815120 m³/jour**.²

2. Les ressources en eau :

a. Définition :

Elles sont définies comme "l'offre en eau" de la nature, à comparer aux demandes en eau du point de vue social et économique.

Il existe des ressources en eau naturelles renouvelables et des ressources en eau naturelles non renouvelables (MARGAT, 1996). Autrement, elles représentent la quantité d'eau de surface ou souterraine disponible à l'échelle mensuelle ou annuelle dans une région et susceptible de satisfaire les besoins domestiques, industriels, agricoles ou autres (de PARCEVAUX et al, 1990). Dans ce cas, les ressources en eau sont des eaux souterraines (ou superficielles) renouvelables et disponibles (offre/demande) quantitativement pour la satisfaction des besoins des ménages.

Le concept de ressources en eau n'est apparu en Occident qu'au début du XXe siècle suite à la prise de conscience de la rareté de l'eau, de son risque de pénurie et de la nécessité de l'évaluer précisément pour la gérer efficacement, ceci étant pour permettre la mise en place des infrastructures de prélèvement, de stockage et de transport.³

Même si le terme « ressource » renvoi à une conception utilitaire, il est essentiel de comprendre que l'eau diffère des autres matières premières minérales parce qu'elle est : renouvelable, elle a plusieurs usages (monde animal, activité humaines, industrie,) et on peut la produire par des techniques diverses (dessalement, épuration).⁴

b. Typologie :

L'eau que nous utilisons pour nos différents besoins, vient pour l'essentiel de l'évaporation de la masse d'eau des mers et océans. Transformée en nuages, l'eau est transportée vers les continents pour en retomber en forme de pluies, neiges, grêles ou brouillard. La pluie et l'eau de fonte des neiges ruissellent sur les pentes, s'accumule en lacs et alimente les réservoirs souterrains.⁵

¹ Ecrivait Saint-Exupéry dans « Terre des hommes ».

² [Khawajia et coll., 2008].

³ [BOUZIANI Mustapha.2006] « Lexique de l'eau en santé publique », Édition Dar El Gharb, Algérie, P 40.

⁴ [N. BOUBOU.2015] « Eau, environnement et énergies renouvelables : vers une gestion intégrée de l'eau en Algérie. » UNIVERSITÉ ABOU BEKR BELKAID –TLEMCCEN.

⁵ [Larousse Encyclopédique, 2003].

Dans le souci de mobiliser une ressource hydrique pour divers besoins et usages, et répondant à une forte croissance de la demande, l'homme développa à travers l'histoire des techniques nouvelles de production, de mobilisation et de transport de l'eau. Et en référence à ces techniques de production, on distingue deux catégories de ce bien :

2.1. Les ressources renouvelables en eau douce :

Les ressources en eau naturelle et renouvelable sont définies par les écoulements superficiels et souterrains formés ou entrant dans le territoire. Elles sont chiffrées sur la base des données hydrologiques, en se référant à une période assez longue pour que les valeurs moyennes utilisées puissent être considérées comme stables. Le bilan des ressources en eau est réalisable à partir des monographies hydrologiques existantes sur des bassins versants élémentaires.

2.2. Les eaux conventionnelles :

Il s'agit ici d'eau provenant de sources d'eau douce, de rivière, de puits, de retenues et barrages, de lacs et ruisseaux, de forages ..., de l'eau qu'on peut tout simplement utiliser à l'état naturel même si celle-ci a subi une légère déminéralisation. Les Ressources conventionnelles se subdivisent en deux catégories : Les ressources conventionnelles renouvelables et les ressources conventionnelles non renouvelables.

2.2.1. Les ressources conventionnelles renouvelables :

Sont nommées ressources conventionnelles renouvelables, la totalité des écoulements d'un pays additionnés aux éventuels apports provenant des pays voisins. Ces principales ressources sont les eaux de surfaces et les eaux souterraines peu profondes. Les eaux de surfaces comprennent les eaux des cours d'eau, lacs, étangs, etc. Ces eaux proviennent de pluie tombée sur le bassin versant du lieu récepteur. Fonction des régimes de pluies, les eaux de surfaces peuvent faire l'objet de création de barrages réservoirs pour corriger les variations de débit et pouvoir ainsi effectuer, durant toute l'année, des prélèvements d'un volume unitaire supérieur au débit d'étiage.

2.2.2. Les ressources conventionnelles non renouvelables :

Il est question ici de nappes phréatiques très profondes. Contenue dans les formations du crétacé inférieur du Sahara, la nappe profonde du continental intercalaire constitue l'un des plus grands aquifères captifs au monde. Les eaux souterraines représentent 60% des eaux continentales, leur écoulement est estimé à 12 000 Milliards de M³ /an et, soit 30% des débits des fleuves. Leur renouvellement total est en moyenne de 5 000 ans et de 300 ans pour les nappes superficielles les plus vives.

2.3 Les eaux non conventionnelles :

Lorsque les ressources d'eaux naturelles conventionnelles viennent à manquer, la forte croissance de la demande et le besoin en eau douce ont poussé le progrès technique bien loin. Il n'y a pas si longtemps de cela, on était bien loin d'imaginer boire un jour de l'eau de mer ou encore l'eau de nos propres rejets. Grâce à la science et à la forte envie d'aller de l'avant et d'innover, on parvient aujourd'hui à produire une eau douce dite « eau non conventionnelle » à partir d'un procédé de désalinisation de l'eau de mer ou par un recyclage des eaux usées.

Les ressources hydriques non conventionnelles sont apparues avec le développement des divers procédés permettant l'obtention d'une eau douce à partir d'une eau non utilisable à l'état naturel. Devant l'impossibilité de satisfaire la demande croissante en eau avec les ressources naturelles déjà existantes, la science a développé des techniques et procédés permettant d'obtenir de l'eau douce à partir de celles non utilisables à l'état naturel, c'est-à-dire : l'eau de mer, les eaux saumâtres, les eaux usées, le brouillard ou même la technique de semence de nuages.

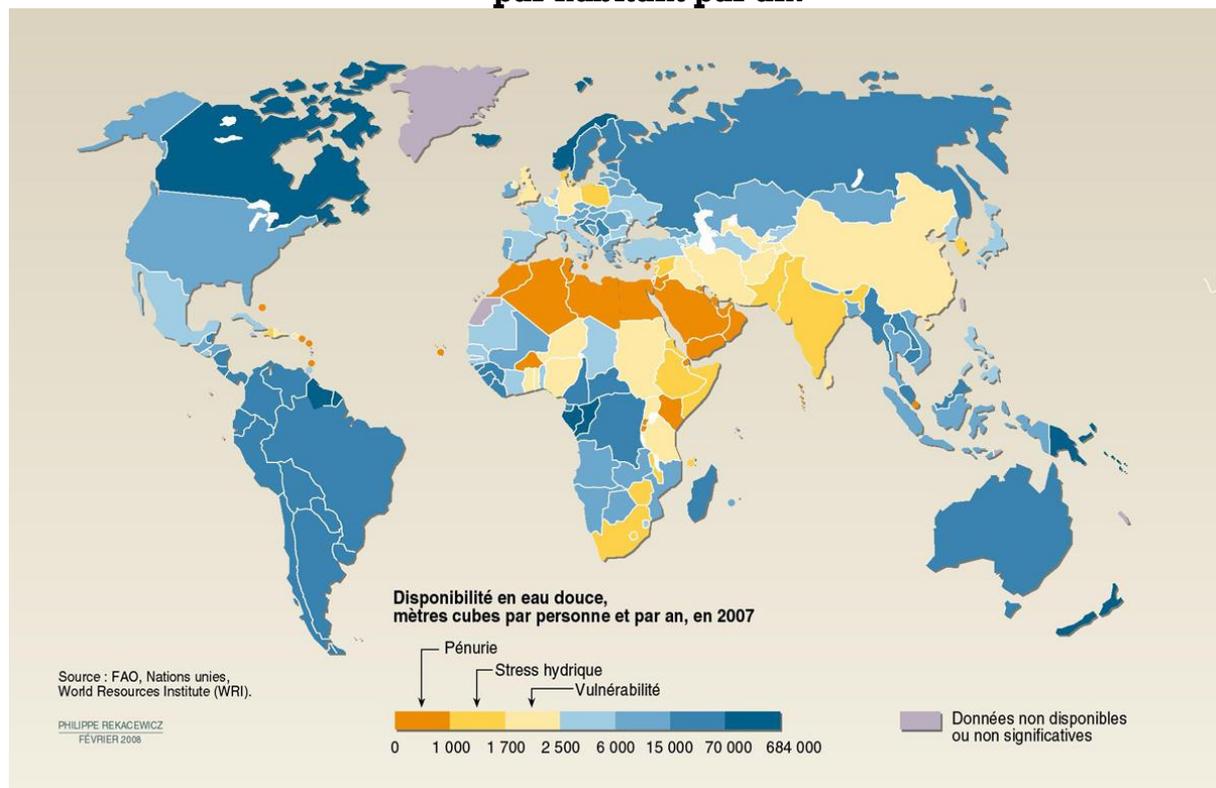
3. La gestion des ressources en eau dans le monde :

Rapportées aux populations, les ressources en eau par habitant sont révélatrices des niveaux de richesse ou de pauvreté d'un pays. L'Organisation Mondiale de Santé (OMS) a défini un minimum vital de 1000 m³ par habitant et par an soit 2,7 m³/jour, or ce seuil est loin d'être atteint. En effet, deux milliards d'individus vivent en situation de stress hydrique, estimé entre 1000 et 2000 m³ par habitant et par an, 450 millions d'entre eux ne disposent pas aujourd'hui du minimum vital d'eau ; et on estime que près du tiers de la population mondiale, soit environ 2,8 milliards de personnes, pourraient souffrir du manque d'eau en 2050 compte-tenu de l'évolution de la démographie et de l'augmentation des consommations d'eau.

Des seuils ont été fixés par convention pour qualifier les degrés d'adéquation ou d'inadéquation de la quantité d'eau et du nombre d'habitants. En deçà d'un seuil de 2500 m³ d'eau par habitant et par an, un pays est considéré en situation de vulnérabilité. Le seuil de pénurie en eau ou « stress » est fixé à 1700 m³ d'eau par habitant et par an. La pénurie est considérée comme chronique en dessous du seuil de 1000 m³ d'eau par habitant et par an et la situation est qualifiée de critique en dessous de 500 m³ [4]. Environ un tiers de la population mondiale vivrait en dessous du seuil de stress hydrique. Vingt pays dans le monde seraient en état de pénurie : douze sur le continent africain (Afrique du Sud, Algérie, Burundi, Égypte, Éthiopie, Kenya, Libye, Malawi, Maroc, Rwanda, Somalie et Tunisie) et sept au Moyen-Orient (Arabie Saoudite, Iran, Israël, Jordanie, Koweït, Yémen et Territoires palestiniens).

En réalité, des millions de personnes vivent avec moins de 500 m³ d'eau par an, situation obérant toute perspective de développement et de croissance. Le manque d'eau est structurel dans le vaste triangle qui s'étend de la Tunisie au Soudan et au Pakistan, c'est dire dans plus de vingt pays d'Afrique du Nord et du Proche-Orient, qui présentent une situation de pénurie chronique (moins de 1000 m³ d'eau douce par an), comme le révèle la **(Figure 2.4.1)**

Figure 2.4.1 : la disponibilité en eau douce par état en 2007 en m³ par habitant par an.⁶



3.1. Répartition des ressources en eau dans le monde :

Environ 70 % de la terre sont occupés par l'eau dont près de 3 % seulement sont de l'eau douce. Sur les 3 %, près d'1 % est accessible sous forme d'eaux de surface (eaux des lacs, rivières, sols et sous-sols). Ce stock est régulièrement renouvelé par les précipitations (pluie et neige ; POPULATION REPORTS, 1998). Les précipitations reçues annuellement par les espaces terrestres sont estimées à 101.000 km³ dont 37.300 km³ renouvellent les réserves d'eau et 63.700 km³ s'évaporent (MALDAGUE, 1974). CHANLETT (1979) estimait approximativement à 160.000 km³ les eaux contenues sur et sous la terre, dont moins de 0,5 % est utilisé par l'homme. Ces réserves d'eau accessibles annuellement pour la consommation humaine se situent entre 12.500 et 14.000 km³.⁷

Théoriquement, cette quantité d'eau peut être utilisée par 20 milliards d'habitants dans le monde, si la répartition n'est pas inégale. Annuellement, 20 % 49 environ du ruissellement mondial moyen se concentrent dans le bassin de l'Amazonie qui n'abrite que 10 millions de personnes. De même, le bassin du fleuve Congo recueille annuellement 30 % environ des précipitations du continent africain, mais abrite seulement 10% des habitants du continent (POPULATION REPORTS, op. cit.). En effet, en 1998, le continent Africain totalisait 10 % des ressources en eau renouvelables du monde soit 3.996 km³ des ressources en eau renouvelables de la planète (OUCHO, 1999). Selon PETRELLA (1998), 60 % des ressources en eau sont localisées dans 9 pays du monde parmi lesquels Brésil, Russie, Chine, Canada, Indonésie, Etats-Unis. 80 pays, soit 40% de la population mondiale, sont confrontés à une pénurie d'eau.⁸ Cette situation serait liée à l'hétérogénéité de

⁶ [FAO, 2008]

⁷ [POPULATION REPORTS. 1998].

⁸ [ONU, 1994].

l'hydro morphologie des régions du monde, à la variation des pluies dans le temps et dans l'espace et aux prélèvements intensifs des ressources en eau par une population mondiale croissante. En ce qui concerne la population du globe, elle était estimée à 3 milliards de personnes en 1960.⁹ Elle est passée à plus de 6 milliards de personnes en 1999 et selon les estimations de l'ONU, elle serait de 8 milliards en 2025.¹⁰ Sur la base théorique d'une distribution équitable des ressources en eau douce du monde, l'offre d'eau douce disponible par personne et par an dans le monde était d'environ 9.000 m³ en 1989. Elle est descendue à 7.800 m³ par personne en 2000. Cette offre d'eau douce diminuerait encore en 2025 pour atteindre à peine 5.100 m³. Malheureusement, la disparité dans la distribution des ressources en eau sur la terre et l'accroissement de la population dans le monde crée des pénuries d'eau douce. Actuellement, 1/3 de la population mondiale habite dans des pays à pénurie d'eau. Les ressources en eau renouvelables de l'Afrique, précédemment énumérées, permettent à chaque africain de disposer de 5.133 m³ par an. L'Afrique de l'ouest et centrale détient le volume le plus élevé d'eau douce par habitant. Suivant les estimations de 1995, l'Afrique de l'Ouest offre annuellement 5.730 m³ des ressources en eau renouvelables par personne avec une population qui dépassait 200 millions d'habitants. Ce volume 50 descendrait à 2.570 m³ en 2025 avec une population qui passerait à 450 millions d'habitants. A l'échelle régionale, en 2025, dix pays de l'Afrique de l'Ouest seraient touchés par le stress hydrique et six autres souffriraient de la pénurie d'eau (Bénin, Burkina Faso, Ghana, Mauritanie, Niger et Nigeria. En effet, le Bénin était exposé comme indiqué préalablement à la diminution de ses ressources en eau disponibles. Le volume d'eau douce disponible par personne qui était à près de 4.000 m³ par an en 2002 diminuerait certainement encore en 2025. A l'échelle mondiale, selon les projections du PAI (Population Action International), 31 pays de moins d'un demi-milliard d'habitants, seraient dans des situations de pénurie d'eau en 1995. Le nombre de ces pays augmenterait à 48 avec une population d'environ 3 milliards de personnes en 2025. La diminution des ressources en eau douce est liée à leur utilisation dans diverses activités humaines qui constituent encore des sources de pollution pour ces ressources avec des conséquences sur la santé mondiale.

3.2. Usages et pollution des eaux douces dans le monde :

Les eaux douces disponibles dans le monde sont utilisées dans l'agriculture, l'industrie et dans les ménages. Environ 69 % des retraits mondiaux d'eau douce par an sont utilisés dans l'agriculture ; 23 % des ressources en eau disponibles du monde sont consommées dans l'industrie et les usages domestiques consomment 8 % environ des ressources en eau douce par an dans le monde. L'augmentation de la consommation des ressources en eau est liée à l'accroissement démographique dans le monde et surtout à l'urbanisation. Les villes modernes ont des réseaux de distribution d'eau potable, et des installations sanitaires pour les différents besoins. Cependant, tout le monde n'a pas un accès facile à ces infrastructures. Selon Peter GLEICK (Président de l'Institut des Etudes de Développement, d'Environnement et de la Sécurité du Pacifique), une personne a besoin de 20 à 40 litres d'eau douce par jour au minimum pour la boisson et l'hygiène. Il ajoute qu'avec l'hygiène corporelle et la cuisson pour une personne, les besoins en eau varie entre 27 et 200 litres d'eau par jour. Il propose par la suite le minimum de 50 litres aux organismes et aux fournisseurs d'eau. Malin FALKENMARK a proposé au minimum 100 litres d'eau douce par personne et par jour pour les usages domestiques. Elle exclut les besoins quotidiens de l'homme en agriculture et en industrie qui augmenteraient l'utilisation de l'eau à 5 ou 20 fois. Dans la réalité, en

⁹ [MALDAGUE,]

¹⁰ [POPULATION REPORTS, 2000]

général, la satisfaction de ces besoins individuels en eau est compromise par la pollution. En effet, la plupart des ressources en eau douce disponibles dans le monde sont exposées à la pollution. Elle constitue un risque permanent pour les ressources en eau douce de la planète et contribue à la pénurie d'eau. Elle provient de l'agriculture, de l'industrie, des municipalités et aussi des déjections d'animaux. Les engrais et les pesticides libèrent dans l'environnement des produits chimiques provenant des dérivés minéraux de l'azote et du phosphore. Près de 450 km³ d'eaux usées sont déchargés chaque année dans les eaux superficielles du monde. Plus de 95 % des effluents urbains sont déversés dans l'environnement. Les eaux usées et les effluents contribuent à la pollution des ressources en eau. L'utilisation des ressources en eau polluées a des conséquences néfastes sur la santé humaine.

3.3. Problèmes et défis auxquels sont confrontés les gestionnaires de L'eau :

Il est important de voir l'eau sous ses aspects à la fois positifs et négatifs.¹¹

L'eau est, d'une part, essentielle à la vie humaine, animale et végétale : Elle soutient les activités productives, l'agriculture, l'hydro-électricité, l'industrie, la pêche, le tourisme, le transport par exemple.

L'eau peut, d'autre part, provoquer des ravages extrêmes, elle peut être porteuse de maladies et inonder de vastes zones. Un manque d'eau ou une sécheresse prolongée peut faire de nombreuses victimes et entraîner une récession. L'eau peut également causer ou aggraver des conflits entre les communautés riveraines d'un bassin local, national ou transfrontalier.

Aussi les différents types d'utilisation de l'eau par la société humaine génèrent des modifications de la qualité de l'eau dans les écosystèmes favorisant une dégradation des ressources en eau et une augmentation des risques et dangers liés à l'eau.

La croissance économique, les initiatives de réduction de la pauvreté et les changements démographiques et sociaux accroissent les demandes en infrastructures hydrauliques pour satisfaire les besoins en alimentation ou en énergie, la production de biens et de services. De tels développements ont un impact important sur les ressources en eau.

Pendant des années, on a cru que les ressources en eau étaient suffisamment abondantes pour accompagner ces évolutions et que les processus naturels allaient réduire la pollution. Cependant, bien que la construction de systèmes d'irrigation, de barrages hydroélectriques, de voies navigables et de systèmes d'adduction en eau pour les habitants, le tourisme et les industries ait considérablement amélioré la vie de millions de personnes, ces développements ont également profondément modifié les régimes hydrologiques, les écosystèmes aquatiques et l'hydromorphologie de la plupart des fleuves, lacs et aquifères du monde.

Compte tenu de l'aggravation de la pénurie d'eau et de l'accroissement de la variabilité hydrologique, les changements suscités par le développement présentent un défi de taille. La recherche d'un point d'équilibre entre développement économique et préservation des ressources en eau soumet le gestionnaire de bassin à d'énormes pressions, risques et conflits. Cependant, afin de se développer, les régions pauvres du monde doivent investir dans les infrastructures de l'eau. Le défi pour les gouvernements et les gestionnaires de bassin consiste à trouver un équilibre entre

¹¹ [Le Partenariat mondial de l'eau (GWP), 2009] « MANUEL DE GESTION INTÉGRÉE DES RESSOURCES EN EAU PAR BASSIN ».

développement et viabilité. Ceci implique de trouver des moyens plus intelligents d'aménagement et de gestion des ressources en eau et de trouver des réponses adaptées au contexte de chaque bassin.

Les gestionnaires de bassin doivent également lutter contre la pollution. L'expansion des villes sur les rives des fleuves et des lacs augmente la pollution de l'eau causée par les rejets des ménages et des industries. Compte tenu de l'intensification des pressions exercées sur les ressources en eau, il est essentiel de gérer convenablement l'eau douce renouvelable. Cette gestion devient, cependant, de plus en plus complexe et conflictuelle.

Cependant, les régions du monde où les ressources en eau ont déjà fait l'objet de nombreux aménagements sont également confrontées à des défis majeurs. Les ressources en eau y sont souvent surexploitées. Les gestionnaires de bassin doivent gérer des interactions très complexes entre ce qui se passe en amont et ce qui se passe en aval, et les répercussions sur les processus hydrologiques, biochimiques et biologiques. Ils doivent gérer les eaux de surface et les eaux souterraines et trouver un équilibre entre gestion de l'eau pour les activités économiques et santé écologique des fleuves, marais et lacs.

En raison des liens inhérents et multiples entre les différents usages et usagers de l'eau, la gestion de l'eau au niveau d'un bassin a un impact direct sur les communautés, les régions administratives et territoires politiques (provinces, nations) de ce bassin. Les communautés qui partagent un bassin sont particulièrement interdépendantes. Les gestionnaires de bassin doivent identifier les moyens de relever les défis liés à l'eau afin d'éviter des problèmes tels que les troubles sociaux, les conflits entre états, le ralentissement économique et la dégradation des ressources vitales.¹²

4. La gestion intégrée des ressources en eau :

La gestion intégrée des ressources en eau est devenue une nécessité pour les problèmes de notre temps, en matière de lutte pour le développement économique et social, les défis auxquels sont confrontés un nombre croissant de pays sont de plus en plus liés à l'eau. Ainsi, il est nécessaire de s'intéresser plus en profondeur à des problèmes tels que les pénuries, la baisse de la qualité et l'impact des inondations, domaines dans lesquels nous nous devons agir.¹³

La gestion intégrée des ressources en eau permet d'aider les pays à faire face aux problèmes liés à l'eau de manière économiquement efficace et durable. L'intérêt du concept de gestion intégrée des ressources en eau s'est développé au lendemain des conférences internationales sur l'eau et l'environnement qui se sont tenues à Dublin et Rio de Janeiro en 1992. Cependant, ni le concept, ni sa mise en application, n'ont été clairement définis.¹⁴

5. La gestion des ressources en eau en Algérie :

L'Algérie est classée parmi les pays les plus déficitaires en eau. De par son appartenance à la zone géographique d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient, et la quasi-totalité son territoire classé en zone désertique, sa pluviométrie moyenne annuelle est estimée à 89 mm. De ce fait, l'Algérie est

¹² [Le Partenariat mondial de l'eau (GWP), 2009].

¹³ [Olivier TSHIBAMBA. 2005] « La problématique de la gestion intégrée des ressources en eau en République Démocratique du Congo : Analyse et stratégies ». Université de Kinshasa.

¹⁴ [Partenariat mondial pour l'eau Comité technique consultatif (TAC).2000] « La gestion intégrée des ressources en eau. » TAC BACKGROUND PAPERS NO. 4

classée parmi les treize pays africains qui souffrent le plus du manque d'eau. En effet, avec moins de 500 m³/habitant/an, le pays dispose de moins de 50% du seuil théorique de pénurie.¹⁵

Par ailleurs, la demande en eau douce, croit chaque année de 4 à 5%, tandis que les ressources naturelles restent invariables pour ne pas dire qu'elles diminuent (problème de pollution de plus en plus grand). Cette équation montre que bientôt la demande sera supérieure aux ressources.

Le **tableau 2.4.1** donne une prévision de diminution des potentialités en eau potable par habitant dans l'Algérie¹⁶

Tableau 2.4.1 : Chute des ressources en eau potable par habitant en Algérie

Année	1962	1990	1995	1998	2000	2020
m ³ /habitant	1500	720	680	630	500	430

Pour faire face à cette pénurie annoncée d'eau, de nouvelles techniques de production d'eau potable devront être mises en place pour satisfaire les besoins de la population croissante.

5.1. Stratégies pour remédier aux problèmes de gestion de l'eau en Algérie :

La solution des problèmes soulevés devrait passer par une coopération politique, scientifique, technologique, économique et technique. Sans être exhaustif voici quelques propositions pour remédier au problème du manque d'eau en Algérie :¹⁷

a. Renforcement des capacités, Doit se faire par :

- Une exploitation raisonnée et durable, pour ne pas compromettre les générations futures,
- Une gestion intégrée, qui doit être au cœur de l'application de la politique de l'eau,
- Un développement durable, dans un cadre économique et écologique.
- La gestion de l'eau doit être intégrée et doit considérer tous les facteurs influençant le circuit de distribution, depuis la source jusqu'au consommateur ; de nouvelles orientations qui requièrent de nouvelles méthodes d'exploitation, de surveillance et de distribution qui doivent prendre en compte les interdépendances de tous les éléments (toutes les étapes) dans leur intégrité ;
- Les données concernant les paramètres physico-chimiques des eaux distribuées, climatiques des zones des sources d'alimentation, cartographiques, géologiques...qui seront rassemblées, intégrées et considérées. Pour ces données, qui sont fournies par les différentes sources d'informations, il s'agit d'une partie importante du travail scientifique qui consiste à leur collecte, à leur intégration et à leur mise à jour continue. De plus, les résultats et les données doivent être accessibles aux gestionnaires, décideurs, scientifiques et au public, afin d'être utilisés à long terme.

¹⁵[B. Mouhouche,2011] « Maîtrise de la pratique de l'agriculture comme palliatif au manque d'eau en Algérie », 9ème Conférence Internationale « EURO-RIOB 2011 » sur l'application actuelle et future de la Directive - Cadre Européenne sur l'Eau, Porto, Portugal, 27-30 Septembre 2011.

¹⁶[A. Kettab,2001] « Les ressources en eau en Algérie : stratégies, enjeux et vision », In Elsevier Science Desalination, (2001) 25-33, Alger, Algérie.

¹⁷ [A. Kettab,2001].

b. Perspectives de développement, Elles passent par :

- La réhabilitation des ouvrages de stockage existants (barrages...), Devant l'ampleur des phénomènes de sécheresse et d'inondations qui affectent chaque année notre pays, on ne peut pas se passer de stocker de l'eau dans les quelques barrages qui existent en Algérie ;
- L'utilisation des systèmes d'irrigation Économiseurs d'eau tels que ¹⁸:
 - L'aspersion Sous toutes les ses formes ;
 - L'irrigation localisée ou « goutte â goutte » sous toutes ses formes ;
 - Le gravitaire amélioré, car contrairement à certaines idées, certains systèmes gravitaires dits "classiques" peuvent être aussi performant que les systèmes sous pression dits "modernes" (aspersion el localisée) ;
 - Des techniques reposant sur le principe du ralentissement des écoulements dans les bassins urbains et l'Algérie doit penser à leur usage pour réduire les conséquences des phénomènes pluvieux exceptionnels ;
 - La réalisation de nouveaux ouvrages, à un horizon proche ;
 - La multiplication des forages, aux emplacements bien étudiés ;
 - Traitement des eaux usées.¹⁹

6. Conclusion :

En Algérie, l'eau est une ressource fondamentalement préoccupante du fait de sa rareté et du développement économique et social désordonné. Cela entraîne une suite de problèmes de gestion au sens large, qui s'ajoutent aux conditions naturelles défavorables. En effet, la complexité de la problématique de l'eau en Algérie et particulièrement celle du Nord du pays s'explique par la politique algérienne de gestion de l'eau qui a été, depuis une dizaine d'années, davantage axée sur la mobilisation de nouvelles ressources que sur la recherche d'une meilleure utilisation des ressources déjà disponibles. Priorité a été donnée au développement de « l'offre » et non à la gestion de la demande.²⁰

¹⁸ [Brahim MOUHOUCHE] « Les problèmes du manque d'eau et l'agriculture algérienne », Laboratoire de Maitrise de l'Eau en Agriculture ENSA ex [NA, El-Harrach], 16200 Alger.

¹⁹ [A. Kettab,2001].

²⁰ [SAKAA B.2013] « Développement Durable, Vers un Modèle de Gestion Intégrée des Ressources en Eau dans le Bassin Versant de Saf-Saf, Nord-Est Algérien. ». Thèse de Doctorat. Université d'Annaba.

CHAPITRE 05 :

LE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER.

- 1. Introduction.**
- 2. Histoire de dessalement.**
- 3. Définition du dessalement de l'eau de mer.**
- 4. Caractéristiques des eaux marines et saumâtres.**
 - 4.1. Les eaux marines.**
 - 4.2. Les eaux saumâtres.**
- 5. Etapes de dessalement de l'eau de mer.**
 - 5.1. Captation d'eau de mer.**
 - 5.2. Le prétraitement.**
 - 5.3. Procédé de dessalement.**
 - 5.4. Le post traitement ou minéralisation.**
- 6. Impacts environnementaux du dessalement.**
- 7. Situation du dessalement dans le monde.**
 - 7.1. La répartition géographique et les principales régions concernées.**
- 8. Situation du dessalement en Algérie.**
 - 8.1. Une technologie a cout élevé.**
 - 8.2. Importance du dessalement de l'eau de mer pour l'Algérie.**
- 9. Conclusion.**

1. Introduction :

La technique du dessalement d'eau de mer représente une ressource alternative qui apporte des réponses aux besoins en eau à court et à long terme. 72% de la surface totale de la terre est recouverte d'eau, dont 97% est salée. Les 3% d'eau douce qui restent sont inégalement répartis : 10 pays se partagent 60% des réserves, alors que 29 autres essentiellement en Afrique et au Moyen Orient font régulièrement face à des pénuries.

Bien qu'un peu moins de 1% de l'eau potable consommée dans le monde soit produite à partir du dessalement, les perspectives offertes par cette technologie sont inexorablement grandissantes. En effet, 40 % de la population mondiale vit à moins de 70 kilomètres d'une côte, soit la zone d'utilisation raisonnable du dessalement. Avec plus de 17 000 unités de production d'eau potable, soit 51 millions de m³/jour d'eau produite, la production d'eau dessalée a atteint 109 millions de m³/jour en 2016. La technologie de l'osmose inverse, qui constituait 20% des unités de production au début des années 1980, s'impose aujourd'hui. Depuis 10 ans, les coûts de production du dessalement ont été divisés par deux. Selon les zones d'implantation, la nature de l'eau brute et le coût de l'énergie, le mètre cube produit coûte de 0,30 à 0,91 euros pour l'osmose inverse en sortie d'usine.¹

2. Histoire de dessalement :

L'idée d'extraire de l'eau potable à partir de la mer n'est d'ailleurs pas nouvelle. La nature le fait depuis toujours à travers le cycle naturel de l'eau. Sous l'effet du soleil, les océans s'évaporent, la vapeur d'eau forme des nuages qui provoquent des précipitations de pluie ou de neige dès que les masses d'air humide atteignent des régions plus froides. L'eau des précipitations est pure car le sel contenu dans la mer n'étant pas volatil, seule l'eau s'évapore.²

Les marins de l'antiquité confrontés à l'approvisionnement en eau à bord des bateaux avaient déjà imité la nature en faisant bouillir de l'eau de mer pour en extraire de l'eau non salée par condensation de la vapeur produite (**Figure 2.5.1**). Dans *Meteorologica*, Aristote (384-322 av. J.C.) écrit : « *J'ai prouvé expérimentalement que l'eau salée qui s'évapore s'adoucit et que la vapeur condensée ne réforme pas de l'eau de mer.* ». Pline l'Ancien (23-79, *Histoire Naturelle*), Alexandre d'Aphrodise (150-215) et St Basile (329-379, *Homélie*) semblent avoir été les premiers à décrire des procédés pour rendre l'eau de mer potable.³

¹ [Ahmed Kerfouf.2012] « Les techniques de dessalement d'eau de mer : quel impact sur l'environnement ? » Journées internationales ' Dragages, produits de dragages et développement durable ', Hammamet, Tunisie.

² [P. BANDELIER .2017] « Le dessalement d'eau de mer et des eaux saumâtres » Article : 121. Encyclopedie de l'Energie.

³ [D. Birkett 2012] « The History of Desalination Before Large-Scale Use in Desalination and Water Resources » History, Development and Management of Water Resources, Vol.I. Paris. I (Encyclopedia of life support systems).

Figure 2.5.1 : Production d'eau douce par condensation sur une éponge⁴



Mais il a fallu attendre le 18^{ème} siècle pour qu'on évoque des procédés permettant d'augmenter la production, améliorer la pureté de l'eau ou économiser l'énergie. Et ce n'est qu'au début du 20^{ème} siècle que sont apparus les premiers procédés vraiment industriels de distillation, c'est-à-dire de concentration des solutions et de production d'eau douce par vaporisation puis condensation.

Puis, autour de 1959, un procédé appelé osmose inverse a été mis au point à l'Université de Californie dans le prolongement de la méthode plus ancienne de séparation des sels contenus dans les mélasses (Dubrunfaut, 1853) et des colloïdes (Graham 1854, à l'origine du terme osmose). Il s'agit d'un procédé membranaire : l'eau douce est extraite de l'eau salée à travers une membrane semi-poreuse, en appliquant une pression. Les premières membranes commerciales datent de 1970.⁵

3. Définition du dessalement de l'eau de mer :

Le dessalement s'appelle dessalage. Il consiste à séparer l'eau et les sels à partir d'une eau brute, qui peut être de l'eau de mer ou une eau saumâtre d'origine continentale.⁶

On peut définir aussi comme suit : « c'est une technique de suppression du chlorure de Sodium (NaCl) de l'eau de mer. Pour contrer les pénuries d'eau, des systèmes sont mis en place pour produire de l'eau douce à partir d'eau de mer. »⁷

Le dessalement est une ressource alternative, complémentaire. S'assurer que le recours au dessalement est plus compétitif que d'autres alternatives ; Le dessalement d'eau répond à des besoins spécifiques et identifiés.

⁴ Howarth, 1984. [D. Birkett. 2012]

⁵ [P. BANDELIER 2017]

⁶ [DUNGLAS J. 2014] « Le dessalement de l'eau de mer, une nouvelle méthode pour accroître la ressource en eau. » Groupe eau. Académie d'agriculture de France.

⁷ https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/dessalement.php.

Le dessalement d'eau est un des leviers de la stratégie nationale du secteur de l'eau, basée sur le principe de la gestion intégrée et durable des ressources en eau.

Le choix de la solution « dessalement » doit faire l'objet d'une comparaison technicoéconomique avec le transfert de l'eau douce ; Le dessalement permet :

- Le renforcement des ressources en eau
- L'amélioration de la qualité de l'eau distribuée.

4. Caractéristiques des eaux marines et saumâtres :

4.1. Les eaux marines :

La caractéristique la plus importante des eaux marines est leur salinité, C'est-à-dire leur teneur globale en sels. (Chlorures de sodium et de magnésium, sulfates et carbonates.) Le sel de mer est un composé dont le nom complet en chimie est chlorure de Sodium. Il tend à se dissoudre dans l'eau jusqu'à une concentration de saturation variant de 33 à 37g/l.

Tableau 2.5.1 : La salinité moyenne des mers⁸

Mer	La salinité moyenne (g.L ⁻¹)
mer Méditerranée	36 à 39
mer rouge	40
mer Caspienne	13
mer morte	270
Golfe Arabo-Persique	36 à 39

Le PH moyen des eaux de mer varie entre 7,5 et 8,4, l'eau de mer est un milieu légèrement basique.

4.2. Les eaux saumâtres :

On appelle eau saumâtre, une eau salée non potable de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. La plupart des eaux saumâtres contiennent entre **01** et **10 g** de sels par litre. Ce sont parfois des eaux de surface mais le plus souvent des eaux souterraines qui se sont chargées en sels en dissolvant certains sels présents dans les sols qu'elles ont traversés. Leur composition dépend donc de la nature des sols traversés et de la vitesse de circulation dans ces sols. Les principaux sels dissouts sont ; CaCO₃, CaSO₄, MgCO₃ et Na Cl ⁹

⁸[Viviane Renaudin.2003] « Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres. »

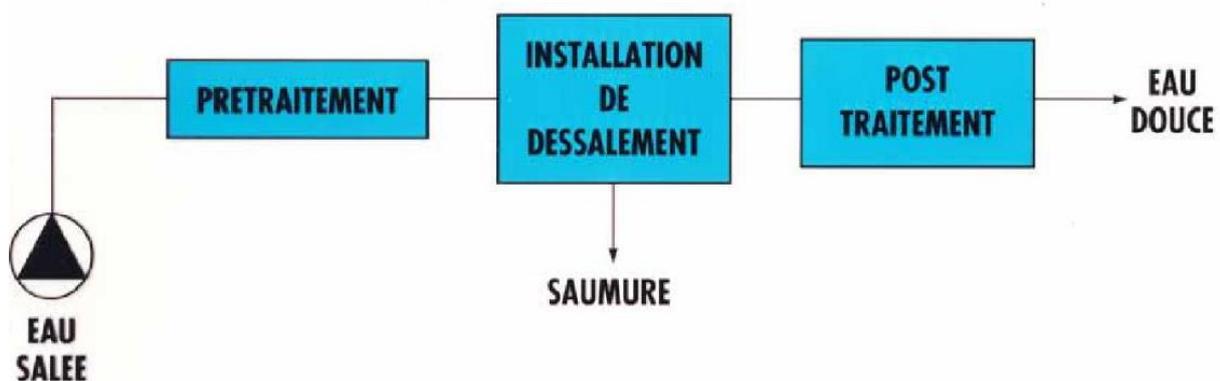
⁹[Viviane Renaudin.2003].

5. Etapes de dessalement de l'eau de mer :

Quel que soit le procédé de séparation du sel et de l'eau envisagé, toutes les installations de dessalement comportent 4 étapes :

1. Une prise d'eau de mer avec une pompe et une filtration grossière,
2. Un prétraitement avec une filtration plus fine, l'addition de composés biocides et de produits anti-tarte,
3. Le procédé de dessalement lui-même,
4. Le post-traitement avec une éventuelle reminéralisation de l'eau produite.

Figure 2.5.2 : Schéma d'une station de dessalement¹⁰



A l'issue de ces 4 étapes, l'eau de mer est rendue potable ou utilisable industriellement, elle doit alors contenir moins de 0,5 g de sels par litre.

5.1. Captation d'eau de mer :

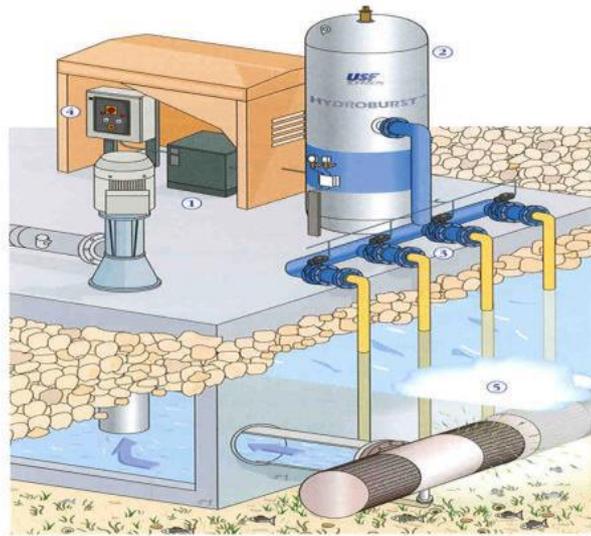
Consiste à pomper l'eau de mer vers la station de dessalement, cette eau doit être bonne du point de vue matières en suspension.

Les grilles de prise d'eau se trouvent à l'extrémité de la tuyauterie, à environ 1-2 m en dessous du niveau de la mer. La grille est rétrolavée à l'air afin d'empêcher l'encrassement de sa surface avec des particules.¹¹

¹⁰ [MAUREL A.2006] « Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres. 2nd ed. Lavoisier.

¹¹ [AHMOUDA Iman et al.2016] « Traitement des rejets de dessalement de l'eau de mer "Les Dunes" Oran ». Master en Génie minier. UNIVERSITE LARBI TEBSSI-TEBESSA.

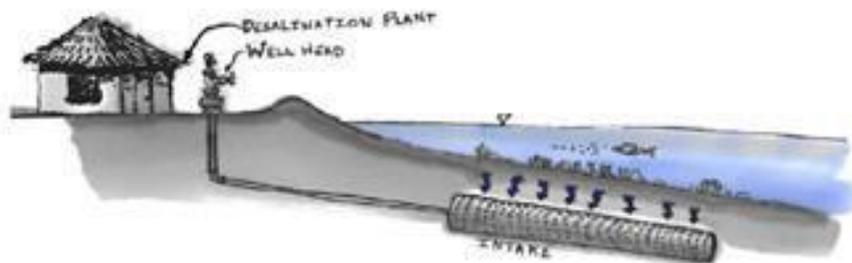
Figure 2.5.3 : Grilles de prise d'eau ¹²



Sont utilisés dans cette étape deux types de technologies :

- **Les forages côtiers** : soit verticaux soit sous forme de galeries horizontales permettant d'obtenir une eau de très bonne qualité et relativement stables, Un puits côtier vertical peut tirer jusqu'à 200 m³/h. Un puits radial peut prendre jusqu'à 1000 m³/h, en fonction des couches du sol.

Figure 2.5.4 : Puit côtier¹³



- **La prise d'eau de surface** : peut être faite en pleine mer. Dans le cas idéal, le captage doit être effectué en zone profonde, éloigné de la côte, protégé des pollutions et des forts courants.¹⁴

¹² <http://www.lenntech.fr>

¹³ <http://www.lenntech.fr>

¹⁴ [MAUREL A. 2006].

Figure 2.5.5: Prise d'eau mobile¹⁵



5.2. Le prétraitement :

Le prétraitement est l'un des principales filières dans les stations de dessalement de l'eau de mer, il évite la formation de dépôts sur les surfaces membranaires et afin de produire une eau conforme à l'alimentation des systèmes de dessalement. Il a pour but d'éliminer les matières décantables et de réduire les matières en suspension, ainsi que la turbidité.¹⁶

Les procédés de prétraitement peuvent être divisés en deux catégories : les prétraitements physiques et les prétraitements chimiques :

- **Les prétraitements physiques :** incluent les préfiltres mécaniques, les filtres à cartouche, la filtration à sable et la filtration membranaire.
- **Le prétraitement chimique :** consiste en l'addition d'inhibiteurs d'entartrage, de coagulants, de désinfectants et de poly-électrolytes.

5.3. Procédé de dessalement :

Il existe aujourd'hui de nombreux systèmes de dessalement de l'eau de mer, dont beaucoup ont atteint le stade industriel. Les techniques les plus performantes, disponibles sur le marché, sont l'osmose inverse et les procédés de distillation, à détente étagée ou à multiples effets.

Le second chapitre présentera ces procédés avec plus de détail.

5.4. Le post traitement ou minéralisation :

En général, l'étape de post traitement comporte deux phases principales : l'ajustement de pH et la chloration.

¹⁵ <http://www.lenntech.fr>

¹⁶ [HAMOUNI, 2008] « Etude des prétraitements en osmose inverse pour une eau de mer [ressource textuelle, sauf manuscrits] : cas de la station de dessalement de Corso (Alger, Est). » Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene. Alger.

- **L'ajustement de Ph :**

L'eau produite par un des procédés de dessalement est agressive. Son pH est inférieur au pH de saturation. La correction du pH se fait par une solution alcaline, automatiquement par une fonction du pH¹⁷

- **La chloration :**

Il est nécessaire d'assurer une étape de désinfection pour éviter toute contamination et développement biologique. Dans ce contexte, il existe de nombreuses méthodes de désinfection de l'eau, mais la plus utilisée est la chloration de l'eau par l'utilisation d'une solution d'hypochlorite de sodium (eau de Javel). La chloration permet de détruire les organismes pathogènes présents dans l'eau et protéger l'eau contre de nouvelle contamination ultérieure au cours de son transport ou de son stockage¹⁸

6. Impacts environnementaux du dessalement :

Ils sont liés aux rejets de saumures concentrées et aux effets de différents additifs nécessaires au traitement.¹⁹

- **Evacuation de la saumure :**

Il faut d'abord rappeler que les rejets sont soumis à la réglementation du protocole dit "Tellurique" de la Convention de Barcelone qui donne des limites des valeurs de nombreux types de rejet.²⁰ Bien entendu, l'effet du rejet dépend très largement des conditions physiques, chimiques et biologiques de la zone où les saumures sont évacuées. Par exemple, plusieurs études ont montré que *Posidonia*²¹ était très sensible à la salinité.

- **Rejet des produits de traitement :**

Il s'agit des résidus de corrosion, des produits d'ajustement du pH de l'eau, des produits anti tartres et des agents anti-salissures, des agents antimousses et des dérivés du chlore. Leurs taux doivent être inférieurs à la norme. Un aspect à ne pas négliger est l'impact que pourrait avoir des installations pompant des grands débits dans des mers fermées (Mer Rouge, Golfe Persique). Les capacités des grosses usines devront probablement être ajustées en fonction du taux de renouvellement des eaux dans ces espaces marins restreints.²²

¹⁷ [B. CHENAOU.2010] « Dessalement de l'eau de mer à la station de MAINIS et son impact sur l'environnement. » Séminaire Ouargla. Université de Chlef.

¹⁸ [TAHRAOUL.D.2010] « Qualité des eaux de mer après dessalement au niveau de la station de dessalement de la ville de Ténès (Chlef) et l'impact de dessalement sur l'environnement (milieu aquatique). » WATMED5, Lille-France.

¹⁹ [A. BENABADJI. I. SAIDI.2016] « Etude sur le Dessalement de l'Eau Saumâtre préparée à partir des Eaux de Mer issues du prétraitement de la station de Souk-Tlata. » Master en : Technologies de Traitement des eaux Université de Tlemcen.

²⁰ [Jean Dunglas.2014] « Le dessalement de l'eau de mer Une nouvelle méthode pour accroître la ressource en eau. » l'Académie d'agriculture de France. Groupe Eau. Notes de travail n° 4.

²¹ La Posidonie de Méditerranée (*Posidonia oceanica*) est une espèce de plantes à fleurs aquatique de la famille des Posidoniaceae et endémique de la Mer Méditerranée.

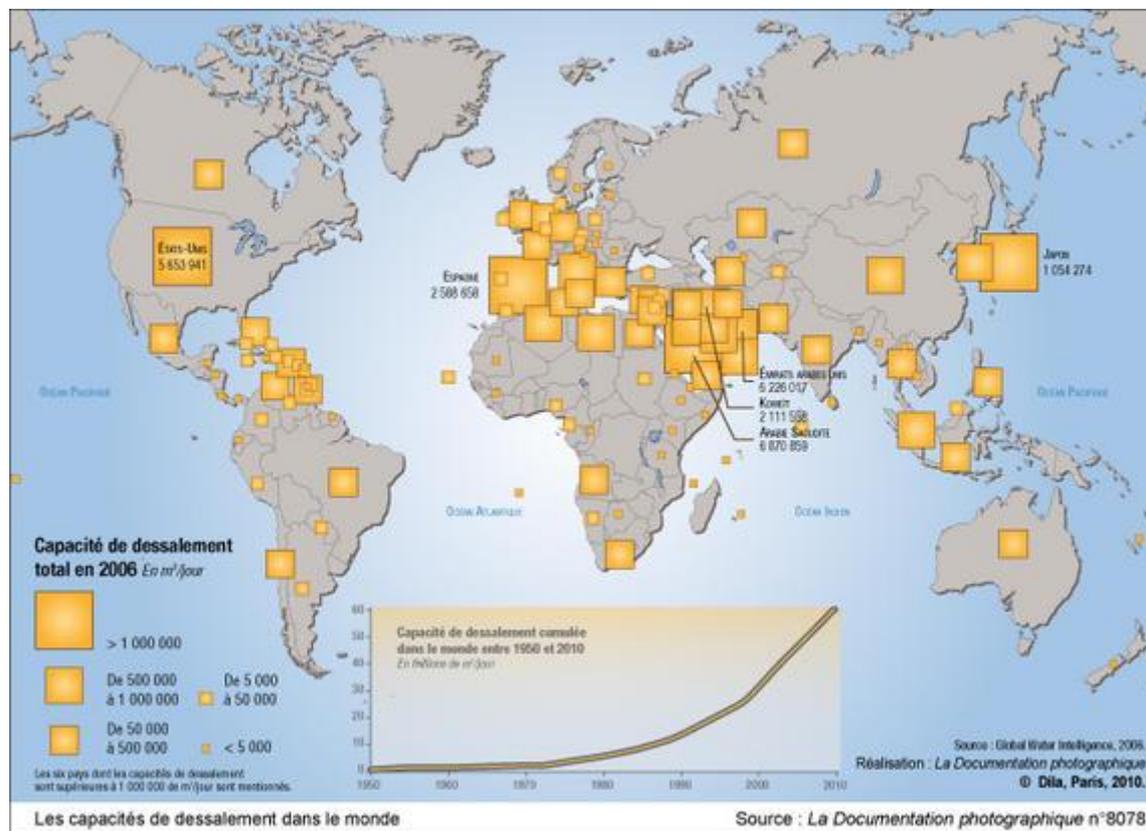
²² [Jean Dunglas.2014].

7. Situation du dessalement dans le monde :

Le dessalement de l'eau est en très forte croissance dans le monde. L'approvisionnement en eau potable sur le plan quantitatif et qualitatif s'impose de plus en plus, parallèlement aux risques de pollutions (vecteurs de maladies, toxines ou matières en suspension ou agents pathogènes) qui perdurent à chaque étape du parcours de l'eau. La disponibilité géographique en eau douce est inégalement répartie dans le monde.

Face à cette réalité, le dessalement de l'eau de mer est venu s'imposer pour pallier ce déséquilibre. La capacité installée de dessalement augmente chaque année en moyenne de plus de 10%. Aujourd'hui, plus de 15 000 unités de dessalement dans 120 pays produisent environ 40 millions de m³/j, dont les trois quarts issus de l'eau de mer et un quart des eaux saumâtres. Sur ces 40 millions, 75% sont destinés à la consommation humaine, 25% à un usage industriel ou agricole. Rappelons que la capacité mondiale de production en eau potable est de l'ordre de 500 millions de m³/j.

Figure 2.5.6 : Capacités de dessalement dans le monde ²³



La Chine a annoncé 1 million de m³/j d'eau de mer traitée en 2010 et jusqu'à 3 millions de m³/j en 2020. 60% des besoins en eau douce des pays du Golfe Persique sont satisfaits par le dessalement d'eau de mer. En Méditerranée, la production artificielle d'eau douce par dessalement d'eau de mer ou d'eau saumâtre souterraine a débuté d'abord dans des situations d'isolement insulaire (Malte, Baléares, Dalmatie, Chypre, Cyclades...), littorales (Libye) et désertiques (Algérie), et ensuite

²³ [PATIER & BLANCHON, 2010] « Documentation photographiques. 8078. L'Eau, une ressource menacée ? » La documentation Française. Paris.

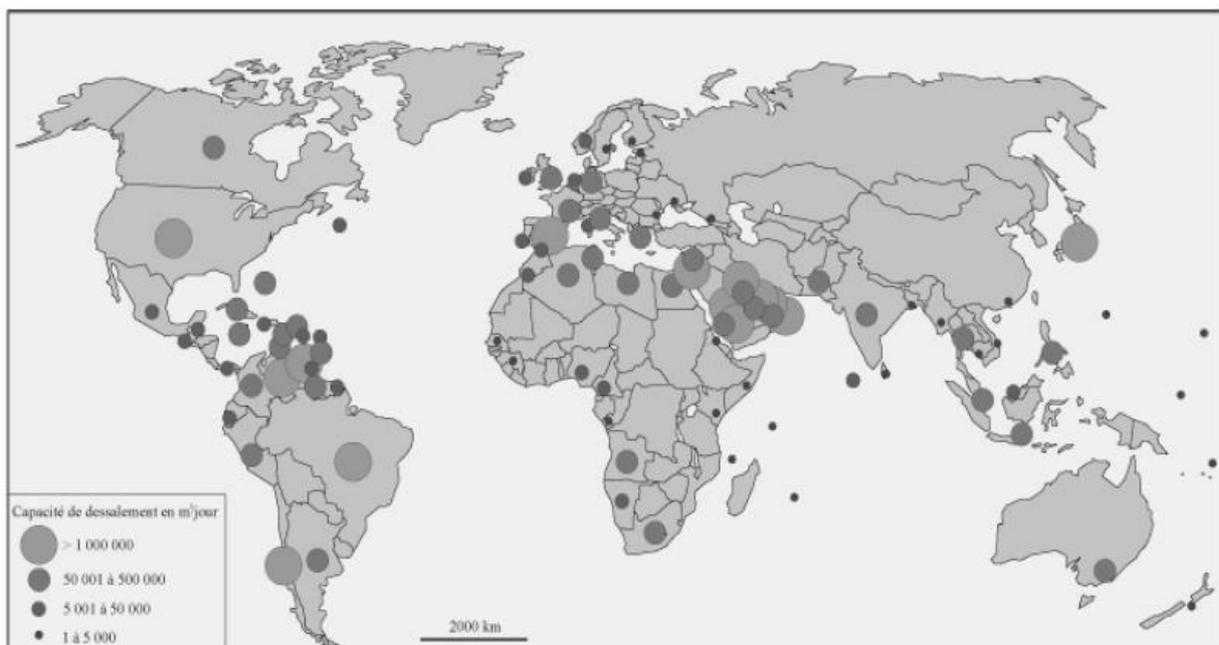
aujourd'hui très rapidement tout autour de la Méditerranée. L'Algérie et l'Espagne ont clairement opté pour cette option pour résoudre leur problème de pénurie. A ce jour, la Méditerranée représente environ un quart du dessalement mondial. Vers 2030, la région pourrait approcher le chiffre du dessalement mondial actuel (soit environ de 30 à 40 millions de m³/j).²⁴

7.1. La répartition géographique et les principales régions concernées

La répartition des usines de dessalement dépend de trois facteurs :

- Une forte pénurie d'eau liée à l'aridité climatique,
- La proximité de la mer et une altitude pas trop élevée.
- Enfin la possibilité d'assumer financièrement un fort coût énergétique ce qui exclut pratiquement les régions pauvres (**Figure 2.5.7**).

Figure 2.5.7: Le dessalement par pays.²⁵



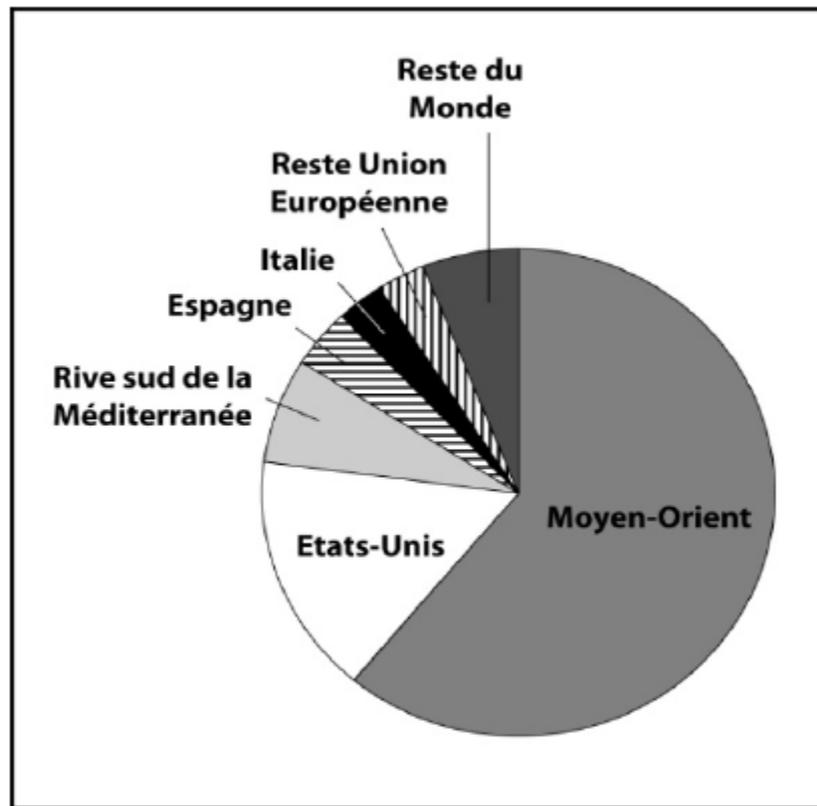
Les principaux pays producteurs sont l'Arabie Saoudite (25 %), les États-Unis (15 %), les Émirats Arabes Unis (10 %) et le Koweït (5 %). L'Europe représente 12,9 % dont 3,4 millions en Espagne et 0,8 en Italie et l'Asie 15,1% dont 1,5 million au Japon, 1 en Corée du Sud, 1,1 en Chine, 0,8 en Inde, 0,6 à Taiwan et 0,5 à Singapour.²⁶

²⁴ [BOYE H. 2008] « Eau, énergie dessalement et changement climatique en méditerranée » Plan bleu centre d'activité régional, conseil général de l'environnement et du développement durable.

²⁵ [Salomon, J. 2012] « Le dessalement de l'eau de mer est-il une voie d'avenir ? » Revue de Geografia e Ordenamento de Território, n. ° 1 (Junho). Centre de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território.

²⁶ [PLAN D'ACTION POUR LA MÉDITERRANÉE, 2001] « DESSALEMENT DE L'EAU DE MER DANS LES PAYS MÉDITERRANÉENS : ÉVALUATION DES IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT ET LIGNES DIRECTRICES PROPOSÉES POUR LA GESTION DE LA SAUMURE ».

**Figure 2.5.8 : Répartition mondiale de la production d'eau de dessalement
(En millions de m³/jour ; 2008)**



8. Situation du dessalement en Algérie

L'expérience algérienne en matière de dessalement des eaux est étroitement liée au développement de l'industrie et tout particulièrement de l'industrie pétrolière et sidérurgique.

En 1964, trois petits blocs de 8 m³ /h chacun, ont été installés au complexe gaz liquéfié d'Arzew (ville côtière à l'Ouest du pays), et en 1969, une autre station a vu le jour à Arzew avec une capacité de production de 4560 m³ /J.²⁷

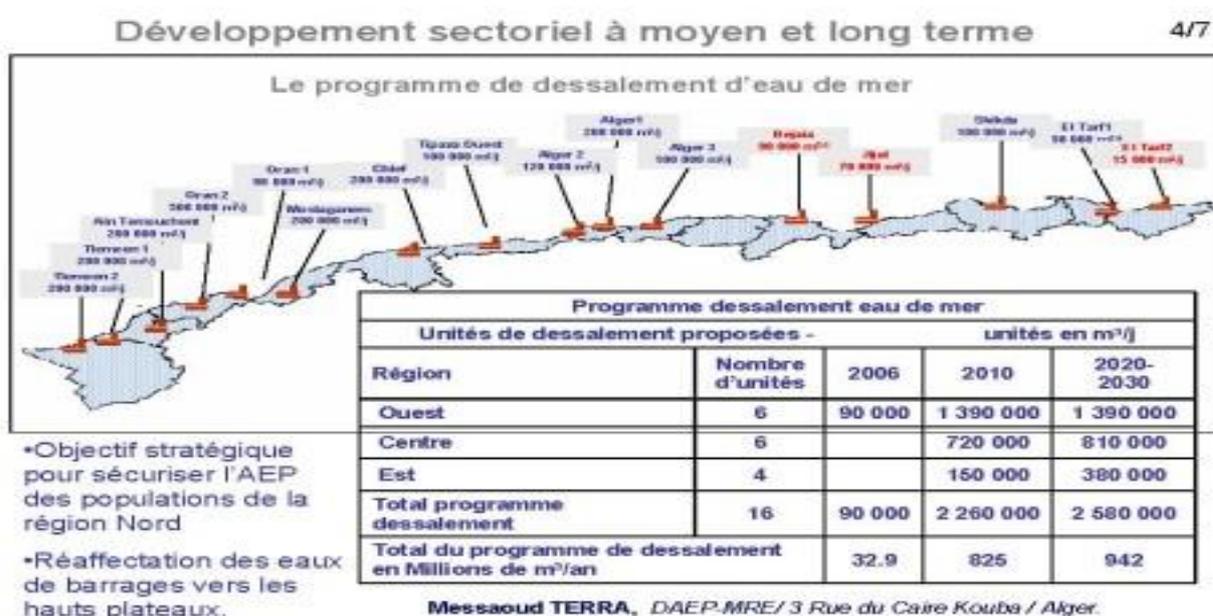
Dés lors de nombreuses installations de dessalement et de déminéralisation ont été mises en place en parallèle avec les nouveaux complexes. D'autres installations ont été mises en exploitation pour les besoins en eau de haute pureté nécessaires au processus des complexes de production d'électricité et l'industrie de liquéfaction. Il y a également quelques installations même dans le sud dans les bases pétrolières qui sont destinées principalement à fournir de l'eau de qualité pour la consommation humaine.

²⁷ [BESSENASSE M., 2006] « Dessalement d'eau de mer de trois stations du littoral Algérois. » 14th International Soil Conservation Organization Conference. Water Management and Soil conservation in Semi-Arid Environment. Marrakech, Morocco, May 14-19, 2006 (ISCO), p 80.

L'une des stations à grande capacité est celle d'El-Hamma (fonctionnelle en 2007) à Alger produit 200 000 m³ par jour (plus grande usine de dessalement d'Afrique). Elle permettra de couvrir le tiers des besoins en eau de la capitale Alger. L'autre grand projet de dessalement en réalisation celui d'Oran (ouest du pays), le projet de Mactaa près de Mers El Hadjadj, d'une capacité estimée à 500 000 m³ par jour est considéré comme l'un des plus grands projets dans le monde.²⁸

A Tlemcen, deux projets d'une capacité respective de 200.000 m³ par jour qui sont prévus à la commune de Souk Tlata et à Honein, alors que Beni Saf abritera une station de 200.000 m³ et Mostaganem deux projets de dessalement de l'eau de mer de 200 000 m³ chacun.²⁹

Figure 2.5.9 : le dessalement de l'eau de mer en Algérie³⁰



Selon les prévisions du Centre de recherche de dessalement au Moyen-Orient, l'Algérie devrait se classer derrière l'Arabie saoudite, les Emirats arabes unis et les USA en termes de capacité de production d'eau potable à partir d'eau de mer.³¹

8.1. Les stations de dessalement en Algérie :

Le tableau 1 et 2 ci-dessous reflète une idée sur le nombre et l'échéancier des stations de dessalement :³²

²⁸ <http://udes.cder.dz/dessalement.php>.

²⁹ [ZOUINI, 2009] « Le dessalement de l'eau de mer par osmose inverse : une solution pour l'alimentation en eau des villes côtières. » Revue HTE. N°142 :78-86.

³⁰ [TERRA MESSAOUD, 2006] « Le secteur de l'eau en Algérie » Directeur de l'Alimentation en Eau Potable – MRE.

³¹ 13 milliards de m³, dont 85 % d'eaux de surface.

Tableau 2.5.2 : Grandes unités de dessalement en Algérie.

N°	Localisation	Capacité m3/j	Population à servir	Echéancier prévisionnel
01	Kahrama (Arzew)	90 000	540 000	En Exploitation
02	Hamma (Alger)	200 000	L'Algérois	En Exploitation
03	Skikda	100 000	666 660	En Exploitation
04	BeniSaf) A.Temouchent	200 000	1 333 320	En Exploitation
05	Mostaganem	200 000	1 333 320	En Exploitation
06	Douaouda (Alger Ouest)	120 000	666 660	En Exploitation
07	Cap Djenet (Alger Est)	100 000	666 660	En Exploitation
08	Souk Tleta (Tlemcen)	200 000	1 333 320	En Exploitation
09	Honaine (Tlemcen)	200 000	1 333 320	En Exploitation
10	Mactaa (Oran)	500 000	1 333 320	En exploitation
11	El Tarf	50 000	-	-
12	Ténès	200 000	999 990	-
13	Oued Sebt (Tipaza)	100 000	-	-

³² [FERHAT Nadjat.2018] « ETUDE LA STATION DE DESSALEMENT DE LA VILLE DE MOSTAGANEM. », Rapport de licence professionnelle, Université de Bouira.

Tableau 2.5.3 : Petites stations (monoblocs) en Algérie.

Wilaya	Site	Commune	Capacité m ³ /j	Population à servir
Alger	Champ de tir	Zéralda	5 000	33 330
Alger	Palm Beach	Staoueli	2 500	16 660
Alger	La Fontaine	Ain Benian	5 000	33 330
Tlemcen	Ghazaouet	Ghazaouet	5 000	33 330
Tipasa	Bou Ismail	Bou Ismail	5 000	33 330
Skikda	L.BenMhidi	L.BenMhidi	7 000	47 000
Tizi –Ouzou	Tigzirt	Tigzirt	2 500	16 660
Oran	Bou Sfer	Bou Sfer	5 000	33 330
Oran	Les Dunes	Ain Turk	2X2 500	33 330
Ain-Temouchent	Bou Zdjer	Bou Zdjer	5 000	33 330
Ain-Temouchent	Chatt el Ward	Bou Zdjer	5 000	33 330
Boumerdes	Corso	Corso	5 000	33 330

8.2. Importance du dessalement de l'eau de mer pour l'Algérie :

D'après les données statistiques, la population algérienne doublera dans les 25 ans à venir alors que les ressources conventionnelles en eau n'auront pas beaucoup changé, dépendantes des aléas climatiques jusque-là défavorables. D'où la solution du dessalement de l'eau de mer, une ressource

abondante et inépuisable. L'option pour le dessalement a longtemps été bloquée par des hésitations découlant de la référence à l'expérience des pays du Golf où le coût de production était élevé. Les spécialistes, études comparatives à l'appui, ont réussi à plaider la cause du dessalement et de la méthode d'osmose inverse particulièrement intéressante, avec son dimensionnement adaptable en fonction de la demande.³³

Devant une crise d'eau certaine qui commence à se faire sentir à travers le monde, en plus des contraintes économiques pour un développement durable, des solutions appropriées nécessitent d'être élaborées afin de se préparer à faire face à ce défi qui menace l'existence même de l'homme. Cette solution constitue un moyen assez fiable pour produire de l'eau potable.

9. Conclusion :

Devant une crise d'eau certaine qui commence à se faire sentir à travers le monde, en plus des contraintes économiques pour un développement durable, des solutions appropriées nécessitent d'être élaborées afin de se préparer à faire face à ce défi qui menace même l'existence de l'homme. Notre pays qui dispose de ressources hydriques salines considérables et d'un gisement solaire tout aussi important, doit utiliser les techniques de dessalement, dont la fiabilité n'est plus à démontrer, en les associant à des sources d'énergies renouvelables.

Cette solution constitue un moyen assez fiable pour produire de l'eau potable. Il faut cependant signaler que ce moyen reste économiquement fiable seulement pour des unités de petites capacités allant de quelques m³ à des dizaines (voire centaines) de m³ d'eau potable par jour. Pour de grandes capacités, l'association des procédés de dessalement avec les énergies renouvelables nécessitent des coûts d'investissement élevés.

³³ [BESSENASSE, 2006].

CHAPITRE 06 :

LES PROCÉDES DE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER.

- 1. Introduction.**
- 2. Les différents procédés de dessalement.**
- 3. Le classement des différents procédés**
- 4. Procédés de distillation.**
 - 4.5. La distillation.**
 - 4.6. Principe de la distillation**
 - 4.7. Distillation à simple effet.**
 - 4.7.1. Principe.**
 - 4.8. Distillation à multiples effets (MED)**
 - 4.4.1. Principe.**
 - 4.4.2. Avantages du Multiple effets.**
 - 4.4.3. Inconvénients du Multiple effet.**
 - 4.5. Distillation par détente successive ou procédé 'Flash' MSF**
 - 4.5.1. Principe.**
 - 4.5.2. Avantages du MSF.**
 - 4.5.3. Inconvénients du MSF.**
 - 4.6. Distillation avec compresseur de vapeur (VC).**
 - 4.6.1. Principe.**
 - 4.6.2. Avantages et inconvénients de la compression de vapeur.**
 - 4.7. Distillation solaire.**
 - 4.7.1. Principe.**
 - 4.7.2. Avantages.**
 - 4.7.3. Inconvénients.**
 - 4.8. Avantages et Inconvénients des procédés de distillation.**
- 5. Procédés à membranes**
 - 5.1. L'électrodialyse (ED).**
 - 5.1.1. Principe.**
 - 5.1.2. Avantages.**
 - 5.1.3. Inconvénients.**
 - 5.2. L'osmose inverse (RO).**
 - 5.2.1. Principe du (RO)**
 - 5.2.2. Avantages de l'osmose inverse.**
 - 5.2.3. Inconvénients de l'osmose inverse.**
- 6. Autres procédés de dessalement.**
 - 6.1. Echange ionique.**
 - 6.2. Dessalement par congélation.**
 - 6.2.1. Principe.**
 - 6.2.2. Inconvénients.**
- 7. Comparaison des différents procédés de dessalement.**
- 8. Conclusion.**

1. Introduction :

Un procédé est une méthode, une technique utilisée pour la réalisation d'une tâche. En qualité totale, un procédé est une activité humaine ayant des éléments d'entrées (matières premières ou personnes) et des éléments de sorties (produits finis ou personnes). Il y a donc bien transformation d'objets.¹

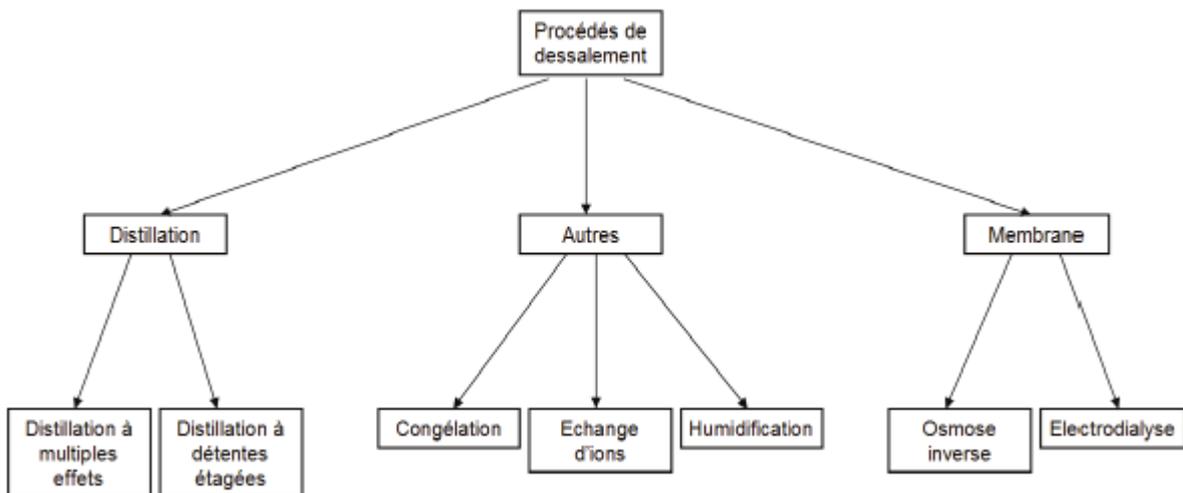
Quel que soit le procédé utilisé dans le dessalement de l'eau de mer, le fonctionnement général est identique : il faut introduire de l'eau de mer dans l'unité de dessalement et lui fournir de l'énergie pour ensuite en extraire de l'eau douce et de la saumure (eau de mer plus concentrée) ayant certaines caractéristiques en objets en possédant d'autres.

Les deux grandes familles de procédés utilisés pour le dessalement d'eau de mer, sont les procédés membranaires et les procédés thermiques, ont surtout été développées de manière industrielle à partir de la moitié du 20^{ème} siècle. Depuis, les intérêts académiques et industriels ont été décuplés permettant ainsi de rendre ce moyen de production d'eau douce fiable, performant et à des coûts minimalisés.

2. Les différents procédés de dessalement d'eau de mer :

Plusieurs méthodes permettent la séparation de l'eau de mer en une eau douce contenant une faible concentration des sels dissouts, et une solution concentrée en sels. On citera notamment la distillation, l'osmose inverse, la congélation et l'électrodialyse. Cependant, les deux technologies utilisées actuellement, à l'échelle industrielle, sont celles basées sur la distillation et l'osmose inverse.²

Figure 2.6.1 : Les différents procédés de dessalement



¹ [M. METAICHE.2014] « TECHNOLOGIE MEMBRANAIRE. » Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées, Université de Bouira.

² [Mandri.Y.2011] « Etude paramétrique du procédé de dessalement de l'eau de mer par congélation sur paroi froide. Alimentation et Nutrition ». Université Claude Bernard - Lyon I.

Tableau 2.6.1 : Classification des procédés de dessalement³

Séparation	Energie	Processus	Méthode
Eau des sels	Thermique	Evaporation	Distillation subite (flash)
			Distillation multi-effet
			Thermo-compression à vapeur
		Distillation solaire	
	Cristallisation	Congélation	
		Formation d'hydrates	
	Filtration et évaporation	Distillation par membranes	
Mécanique	Evaporation	Compression mécanique vapeur	
	Filtration	Osmose inverse	
Sels de l'eau	Electrique	Filtration sélective	Electrodialyse
	Chimique	Echange	Echange ionique

3. Le classement des différents procédés :

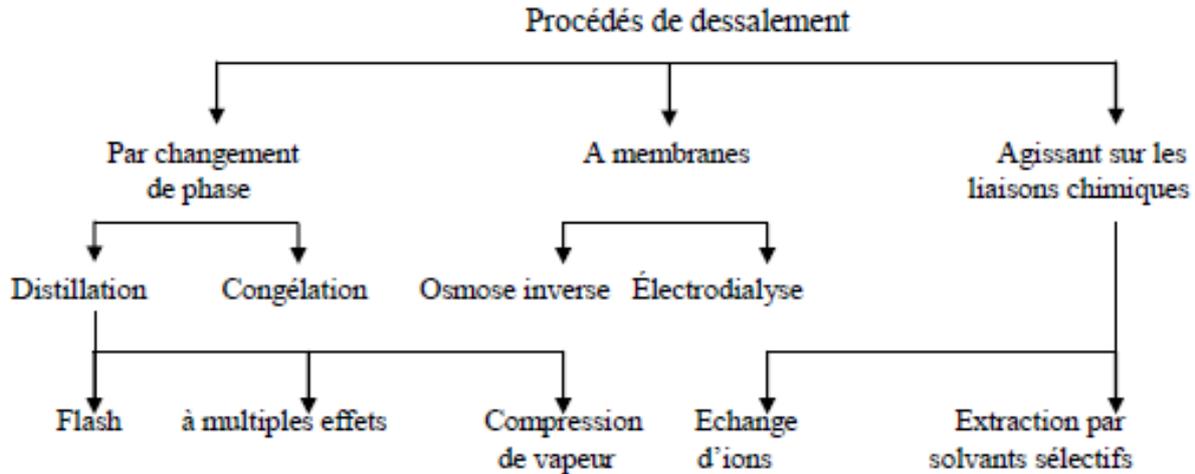
Le classement des différents procédés de dessalement peut se faire en tenant compte de la forme ou phase (vapeur, liquide, solide) sous laquelle l'eau douce est séparée des saumures. Ces procédés peuvent être classés plus précisément soit⁴ :

³ [Salomon, J. 2012] « Le dessalement de l'eau de mer est-il une voie d'avenir ? » Revue de Geografia e Ordenamento de Território, n.º 1 (Junho). Centre de Estudos de Geografia et Ordenamento do Território.

⁴ [Houadji A.2017] « Etude d'un système de dessalement MSF couplé avec concentrateur solaire », Master en Technologie. Université de Blida.

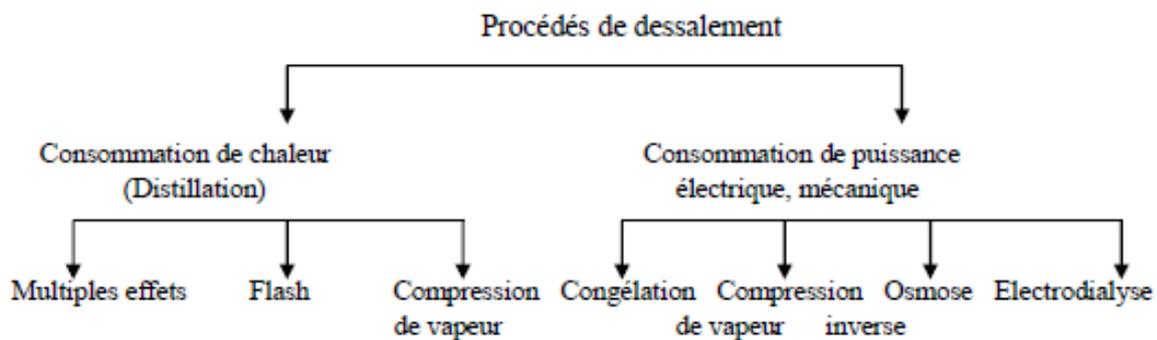
- Selon le principe sur lequel ils se basent : (Figure 2.6.2)

Figure 2.6.2 : procédés de dessalement selon le principe sur lequel ils se basent



- Selon le type d'énergie consommée :

Figure 2.6.3 : procédés de dessalement selon le type d'énergie consommée



4. Procédés de distillation :

Dans ces procédés, il s'agit de chauffer l'eau de mer pour en vaporiser une partie. La vapeur ainsi produite ne contient pas de sels, il suffit alors de la condenser pour obtenir de l'eau douce liquide, on retrouve le cycle naturel de l'eau. En effet l'eau s'évapore naturellement des océans, la vapeur s'accumule dans les nuages puis l'eau douce retombe sur terre par les précipitations. Ce principe de dessalement très simple a été utilisé dès l'Antiquité pour produire de très faibles quantités d'eau douce sur les bateaux.⁵

4.1. La distillation :

La distillation consiste à évaporer l'eau de mer, soit en utilisant la chaleur émise par les rayons solaires, soit en la chauffant dans une chaudière. Seules les molécules d'eau s'échappent, laissant en

⁵[Viviane Renaudin.2003] « Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres. »

dépôt les sels dissous et toutes les autres substances contenues dans l'eau de mer. Il suffit alors de condenser la vapeur d'eau, ainsi obtenue une eau douce consommable. Actuellement, c'est un procédé coûteux, surtout en énergie puisqu'elle nécessite, non seulement l'utilisation d'énergie thermique pour chauffer l'eau, mais aussi d'énergie électrique pour faire circuler l'eau.⁶

Dans les distillateurs modernes, la température de travail oscille entre **5 à 125 °C**. La salinité de l'eau douce obtenue par ce travail est toujours nettement inférieure à **100 mg/L**, on doit donc reminéraliser cette eau lorsqu'elle est destinée à la consommation. Tous les procédés de distillation suivent ce principe qui comporte 3 phases :

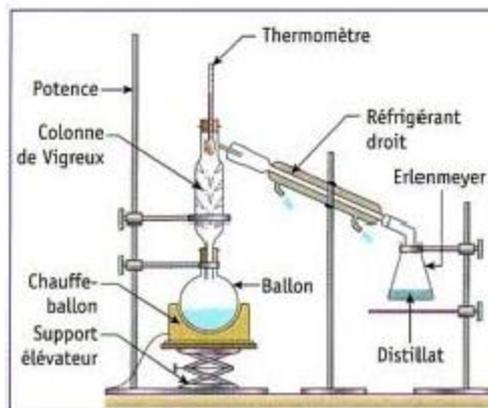
- Production de vapeur,
- Transfert à un condensateur
- Et condensation.

Cependant les techniques utilisées ainsi que les mécanismes de récupération d'énergie sont variés.⁷

4.2. Principe de la distillation :

La distillation consiste à séparer des liquides dont la température d'ébullition est différente. L'appareillage vraiment spécifique de la distillation est une colonne verticale appelée colonne à distiller. Celle-ci est garnie (plateaux ou garnitures diverses), qui permettent un contact entre vapeur et liquide qui y circule dans cette colonne, il y a équilibre thermodynamique entre les deux phases, en fonction de la température et des compositions respectives. Quand on chauffe le mélange en bas de la colonne (bouilleur), le produit à température d'ébullition la plus faible est évacué en haut de la colonne, alors l'autre produit reste dans la partie basse du système.

Figure 2.6.4 : Principe de la distillation simple⁸



Durant la seconde moitié du XX^{ème} siècle, les techniques de distillation se perfectionnent avec une amélioration et un rendement énergétique, en construisant des stations de grande capacité qui emploient le plus souvent les méthodes dites : distillation flash, distillation à effets multiples, distillation par compression de la vapeur et distillation solaire.⁹

⁶ [TAIB A.2014] « Etude des performances de fonctionnement d'un distillateur d'eau modèle GFL 2004. » master en hydraulique. Université Abou-Bekr Belkaid Tlemcen.

⁷ [RAHMANI R, 2007] « Rendement d'un distillateur solaire à film capillaire à plusieurs étages, effet de certains paramètres thermo physiques sur le rendement ». Mémoire de Magister Université Mentouri de Constantine.

⁸ www. clemspreims.free.fr.

⁹ [TAIB A.2014].

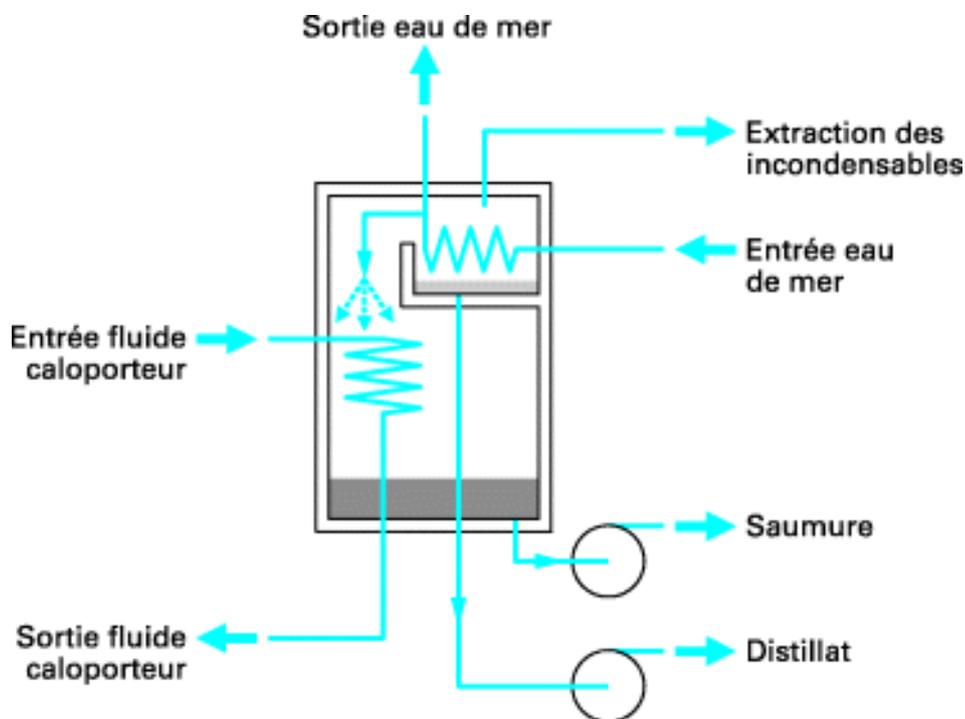
4.3 Distillation à simple effet :

Ce procédé a été mis en œuvre depuis longtemps sur les navires, où les moteurs Diesel émettent une quantité significative de chaleur récupérable¹⁰

4.3.1. Principe :

Son principe est simple, il reproduit le cycle naturel de l'eau. Dans une enceinte fermée, un serpentin de réchauffage porte à ébullition l'eau de mer. La vapeur produite se condense au contact d'un deuxième serpentin alimenté par l'eau de mer froide. Un éjecteur (ou une pompe) évacue les gaz incondensables. Un groupe électropompe soutire l'eau condensée, un deuxième l'eau de mer concentrée ou saumure.¹¹

Figure 2.6.5 : Principe de la distillation à simple effet¹²



4.4. Distillation à multiples effets (MED) :

Le processus de la distillation à multiples effets est une technologie classique en ingénierie chimique. Il est apparu absolument nécessaire d'améliorer la consommation spécifique de la distillation à simple effet.

Le procédé MED est économique en énergie avec une souplesse de fonctionnement et un débit de saumure plus faible qui donne un rendement correct. Sa capacité unitaire de fonctionnement est plus faible que MSF qui varie de 20 m³/j à 20000 m³/j.¹³

¹⁰ [DUCRU F.2009] « Dessalement de l'eau de mer : bilan des dernières avancées technologiques ; bilan économique ; analyse critique en fonction des contextes. » ENGREF Centre de Montpellier.

¹¹ [Patrick D, 2003] « Dessalement de l'eau de mer » Techniques de l'ingénieur traité Génie des procédés.

¹² [Patrick D, 2003].

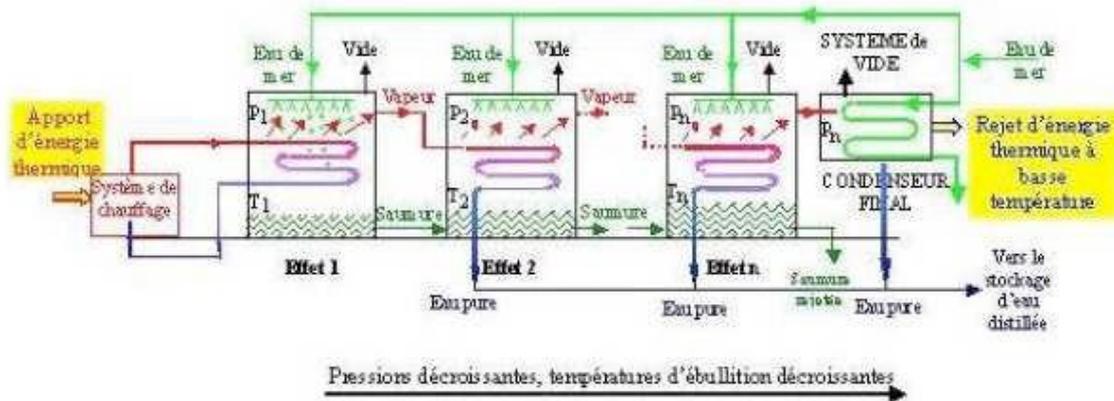
¹³ [TAIB A.2014].

Son objectif est d'améliorer la consommation spécifique de l'évaporateur, simple effet. On sait que la température d'ébullition de l'eau varie avec la pression. On peut donc utiliser la chaleur de condensation de la vapeur produite dans une première chambre d'évaporation pour faire fonctionner le faisceau de chauffe d'une seconde chambre à pression et température plus faible et ainsi de suite.
14

4.4.1. Principe :

Ce procédé est basé sur le principe d'évaporation sous pression réduite, d'une partie de l'eau de mer préchauffée à une température variante entre 70 et 80°C. Avec ce procédé, en effectuant des transferts de chaleur successifs appelés « effets » à des températures de moins en moins élevées, c'est-à-dire : au contact de l'échangeur dans lequel la vapeur d'eau produite par l'effet précédent se condense, ainsi seule l'énergie nécessaire à l'évaporation dans le premier effet est d'origine externe. Cependant, plus l'écart de température n'est faible, plus la surface d'échange assurant le transfert d'énergie doit être grande. Alors on peut comprimer la vapeur pour faciliter le transfert en énergie (principe de la compression mécanique) en utilisant cette fois-ci un thermo compresseur (ou éjecteur à vapeur). Comme le procédé MSF, le MED n'utilise quasiment que de l'énergie thermique, s'y ajoute seulement 1 à 3 kWh/m³ d'énergie électrique (pas de recirculation de la saumure)¹⁵

Figure 2.6.6 : Principe de la distillation à multiples effets¹⁶



¹⁴[MAUREL, 2006].

¹⁵[Tahri T.2010] « Dessalement de l'eau de mer par l'énergie solaire en vue de l'irrigation d'une serre agricole. » département de mécanique, Université de Chlef.

¹⁶[TRAD Abderachid.2014] « Etude et modélisation de deux distillateurs solaires symétrique et asymétrique à effet de serre. ». Thèse de Doctorat en sciences. Université de Constantine 1.

4.4.2. Avantages du Multiple effet :

Parmi les avantages du multiple effet, il y'a la souplesse de fonctionnement avec une production qui varie généralement de 15 à 100 % du régime nominal. La pureté de l'eau potable obtenue est inférieure à 30 ppm (parties par millions). Il faut également noter que la consommation énergétique d'un tel procédé est indépendante de la salinité et requiert généralement un service minimum lors de son fonctionnement. Un court temps de démarrage pour le chauffage et les faibles températures de fonctionnement (60 à 70 °C) rendent ce système très intéressant sur le plan énergétique. En outre il peut être construit à partir de matériaux économiques et durables tels que l'alliage d'aluminium pour les tubes de transfert de chaleur et une tuyauterie en plastique.¹⁷

4.4.3. Inconvénients du Multiple effet :

Parmi les inconvénients, le système a une durée de construction assez longue. Son implantation dépend de l'énergie thermique disponible et son rapport de production ou quantité d'eau obtenue par unité d'énergie consommée est faible. Il est généralement compris entre 30 et 40 %. Le système est encombrant et également exposé aux problèmes d'encrassement.¹⁸

4.5. Distillation par détente successive ou procédé 'Flash' MSF :

Consiste à mettre une enceinte sous vide, isolée et ne contenant que de l'eau de mer. On la maintient en équilibre avec sa vapeur à une température « t » et une pression « p ».

Lorsque de l'eau chaude est introduit dans l'enceinte, et que p est inférieure à la pression de saturation, on observe une vaporisation instantanée par détente. La chaleur de la vapeur est transférée à l'eau froide circulant dans les tubes de condenseur. Elle est alors condensée sur un faisceau tubulaire situé dans la partie supérieure de l'enceinte. On peut alors récupérer l'eau distillée pure.¹⁹

4.5.1. Principe

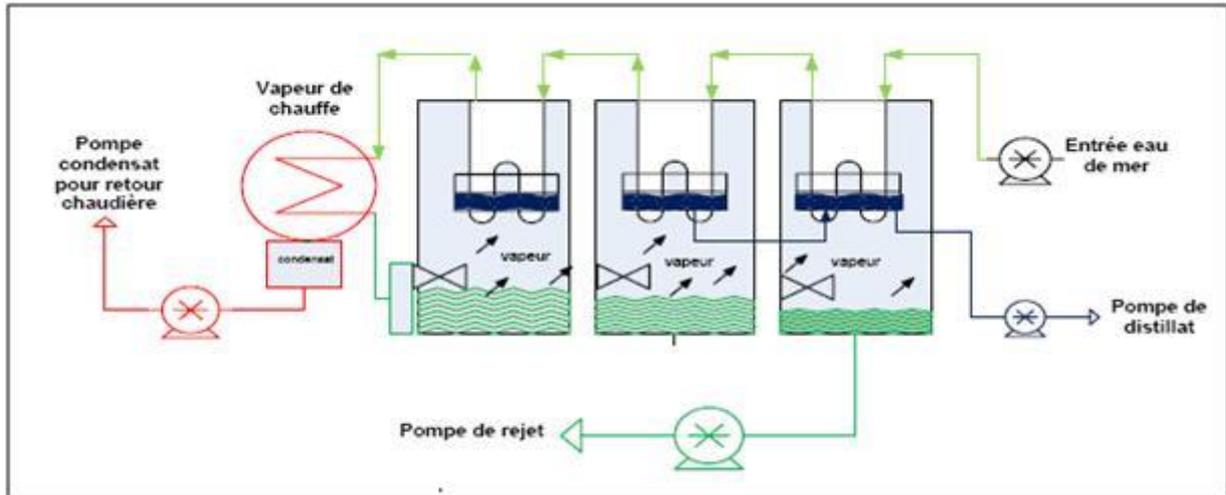
La Distillation Multi-Flash s'appuie sur une évaporation instantanée (flash) d'une partie de l'eau salée chauffée à haute température (80°C à 120°C), sous une pression, $P_0 \approx 2$ bars, lors d'une détente à l'entrée de la chambre de distillation qui est à la pression p_1 . La vapeur est condensée au niveau d'un échangeur, où elle rétrocède sa chaleur latente de vaporisation à l'eau salée « source liquide » qui se réchauffe, la saumure déjà peu concentrée, s'écoule sous l'effet de la pression vers la chambre de distillation de la cellule suivante, où une nouvelle vaporisation s'effectue à la pression $p_2 < p_1$, et ainsi de suite jusqu'à la pression « P_n » de 0.05 bar, vers 30°C. C'est le principe des détentes successives ; il peut avoir ainsi jusqu'à 50 cellules.

¹⁷[O SAMAKÉ.2016] « ANALYSE THERMO-ÉCONOMIQUE D'UN SYSTÈME DE DESSALEMENT PAR THERMOCOMPRESSION DE VAPEUR ET CONCEPTION DE L'ÉJECTEUR. » Thèse de doctorat (Ph.D). UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE (Québec) Canada.

¹⁸[O SAMAKÉ.2016].

¹⁹[DAUSSY et al., 2012] « Le dessalement de l'eau de mer à Malte et en Israël. » Université de technologie Compiègne.

Figure 2.6.7 : Procédé de dessalement par distillation multi flash MSF²⁰



4.5.2. Avantages du MSF :

Le multiple flash se présente comme étant flexible à la salinité de l'eau d'alimentation. Il partage certains avantages avec les multiples effets : un degré de pureté d'eau élevé moins de 30 ppm, une grande capacité d'eau de production. Il bénéficie d'expertises avérées dans le domaine, car étant le plus utilisé parmi les systèmes de dessalement thermique et fait l'objet de plusieurs travaux scientifiques.

4.5.3. Inconvénients du MSF :

Les inconvénients liés à ce système portent essentiellement sur le rapport de production jugé faible, des coûts d'exploitation et d'investissement élevés, des exigences élevées de construction. Une très faible souplesse dans le fonctionnement notamment avec un grand débit d'eau d'alimentation alors que le rapport de production est faible.

4.6. Distillation avec compresseur de vapeur (VC) :

Consiste à une revalorisation de la vapeur d'eau du dernier effet par compression grâce à un compresseur mécanique ou via un éjecteur, on parle alors de thermocompression. La compression par éjecteur nécessite par ailleurs une vapeur motrice.²¹

4.6.1. Principe :

Le principe de dessalement d'eau salée par compression de vapeur est celui d'une pompe à chaleur ; où l'eau salée est évaporée après avoir été préchauffée des gouttelettes entraînées par un séparateur. Sa pression ayant été élevée, grâce à la chaleur latente de condensation qui est transférée. Le cycle d'évaporation et de condensation peut ainsi fonctionner. La vapeur condensée de l'eau douce est extraite, ainsi que la saumure concentrée contenant du sel. A cause des problèmes de corrosion et d'entartrage des composants, un tel dispositif fonctionne généralement à une température limitée à environ 60°C avec un facteur de concentration égal à deux : 1m³ d'eau salée (35 g/l de sel) donnera

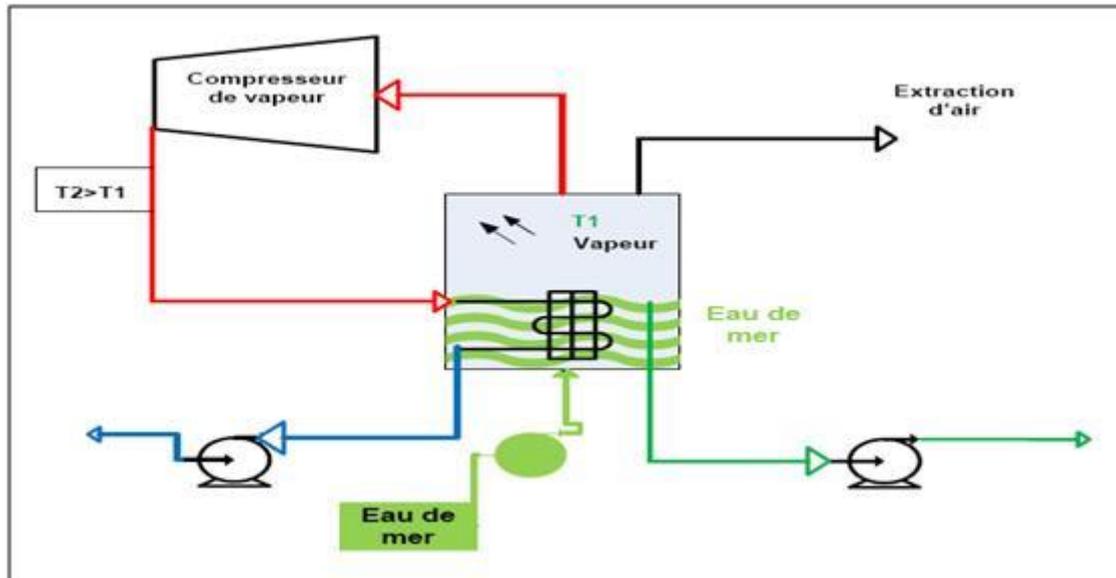
²⁰ [ALAOUI, 2008].

²¹ [SAMAKÉ. 2016]

500 litres d'eau douce et 500 litres de saumure à 70 g/l de sel seront rejetés à la mer. Ce dispositif permet de ne consommer qu'une dizaine de kilowattheures électriques. ²²

Dans ce procédé la vapeur produite par la cellule la plus froide est comprimée par un éjecteur à vapeur dont plus la pression de la vapeur motrice est élevée, plus l'enthalpie du mélange sortant est importante ²³

Figure 2.6.8 : Procédé de dessalement par compression de vapeur²⁴



4.6.2. Avantages et inconvénients de la compression de vapeur :

Le système par compression de vapeur est généralement connecté aux multiples effets et de ce fait il présente les mêmes avantages que les multiples effets sans compression de vapeur. Cette connexion permet de diminuer de manière considérable la consommation énergétique et la surface de transfert. La salinité du distillat est généralement de 20 ppm (parties par millions). En résumé l'intégration d'un système de compression de vapeur aux MEE ne fait qu'améliorer davantage les performances énergétiques et une diminution considérable de la surface d'échange. C'est une technique généralement utilisée pour de faibles productions d'eau potable avec un coût d'exploitation élevé et une absence de contrôle de la qualité de l'eau. Dans le cas de compression par éjecteur on note généralement un faible rendement de compression ; alors que la compression mécanique est limitée par le coût d'investissement et par la consommation énergétique du compresseur même s'il présente généralement un meilleur rendement que l'éjecteur.

²² [MERAD L et al.2003] « Etude d'un procédé thermique de dessalement d'eau de mer par aérogénérateur à rendement élevé » 11èmes Journées Internationales de Thermique.

²³ [P. DANIS. 2003].

²⁴ [ALAOUI. 2008].

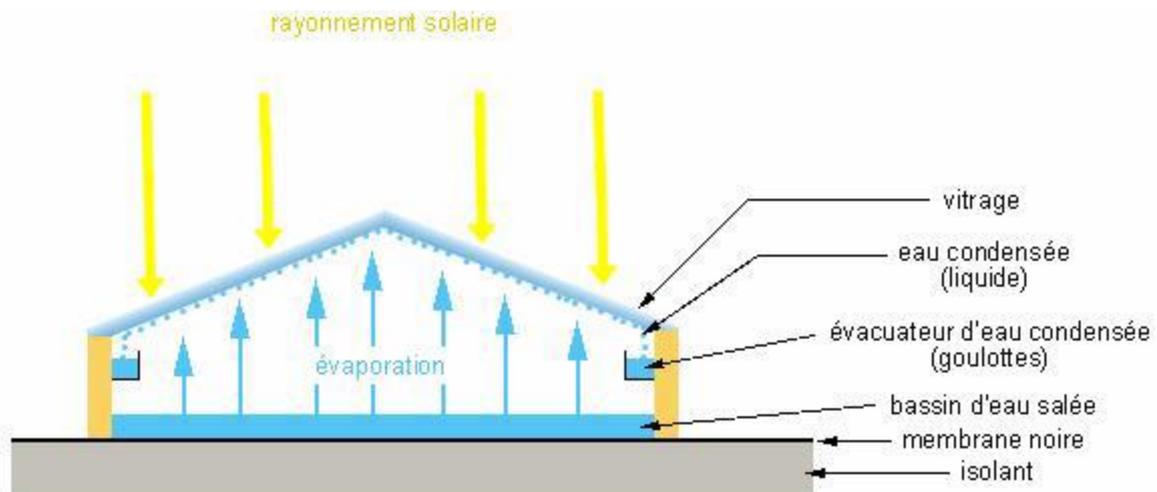
4.7. Distillation solaire :

Parmi les techniques de dessalement par changement de phase, il existe une technique ancienne et très intéressante, qui est d'un emploi commode dans les régions arides ensoleillée utilisant des distillateurs solaires, malgré qu'elle présente l'inconvénient de nécessiter des surfaces très importantes disponibles au sol et des investissements importants, elle présente un meilleur avantage car elle utilise une énergie gratuite. Cette technique est appelée : « Distillation Solaire »²⁵

4.7.1. Principe :

La distillation solaire est un procédé simple et pouvant être appliqué de façon rustique mais elle ne convient évidemment qu'aux régions où l'ensoleillement est suffisant. L'eau salée dans le bac va se chauffer (d'autant plus vite que le bassin est noir) et avec l'augmentation de température une partie de l'eau s'évapore et la vapeur d'eau se liquéfie sur la surface intérieure de la vitre transparente. Éventuellement des gouttes d'eau vont se former, couler sur la surface de la vitre et tomber dans le récupérateur situé au coin. Il faut régulièrement nettoyer le bassin pour éliminer le sel.²⁶

Figure 2.6.9 : Principe de distillation solaire²⁷



4.7.2. Avantages :

En 1925, une autre technologie forte, simple qui apparue c'est la distillation solaire a les possibilités très limitées. En effet, la productivité ne peut dépasser 4 à 5 litres d'eau douce par jour, selon une estimation, le prix du distillateur suivant le coût de l'entretien. Si l'on admet une durée de vie de 15 ans une production spécifique de 4 l/j/m², soit environ 1.2m³/m²/an .L'énergie solaire est inépuisable , non polluante , propre et ne dégage pas de gaz à effet de serre, elle est intermittente, il faut donc un système de chauffage d'appoint permettant d'assurer une partie des besoins en eau chaude sanitaire n'est possible que lorsqu'il y a du soleil, les installations des panneaux solaires

²⁵ [Sadi A., 2000] « Le Dessalement Solaire - Considérations Techniques » Revue. Energie Renouvelable : Chemss.

²⁶ [FIDALI. S. 2008] « modélisation et conception d'un distillateur solaire des eaux saumâtres à bas coût pour les communautés rurales. » Mémoire de Magister, Université de Batna.

²⁷ www. fondation-lamap.org.

thermiques permet de réaliser des économies conséquentes, donc il faut pouvoir stocker la chaleur dans des ballons ou des dalles chauffantes, mais les frais de maintenance et de fonctionnement de ces installations sont relativement faibles.

4.7.3. Inconvénients :

L'inconvénient majeur de ce type de procédés de distillation est leur consommation énergétique importante liée à la chaleur latente de vaporisation de l'eau. En effet pour transformer un kg d'eau liquide en vapeur à la même température, il faut environ 2250 kilojoules (si le changement d'état se fait à 100°C). Afin de réduire la consommation d'énergie des procédés industriels, des procédés multiples effets qui permettent de réutiliser l'énergie libérée lors de la condensation ont été mis au point.

4.8. Avantages et Inconvénients des procédés de distillation :

Le procédé de dessalement par distillation présente certains avantages en particulier pour les eaux très salines puisque sa performance et ses coûts sont indépendants de la salinité. De plus la distillation produit une eau contenant peu de solides dissous totaux ce qui est intéressant pour les industries ayant recours à l'eau dans leur procédé.

Elle produit une eau distillée présente une salinité comprise entre 20 et 80 mg/l. Cependant puisqu'il ne requiert pas de prétraitement complexé ou de membrane, le procédé est moins compliqué et produit moins de rejets tangibles. Au point de vue des coûts, aucune des technologies retenues pour l'étude, ne démontre un avantage particulier l'investissement initial est faible, les coûts d'entretien et de fonctionnement sont plus élevés par la suite et vice versa.

Par contre l'énergie nécessaire au procédé de distillation a un coût élevé doit être considéré dans le calcul du coût de production de l'eau [38]. La conversion de l'eau de mer en eau douce implique une consommation d'énergie thermique dans les procédés de distillation qui ont fait des progrès considérables, ces procédés résultent de l'effort de recherche des organismes publics et des industriels, du retour d'expérience des nombreuses réalisations effectuées en particulier au Moyen-Orient et enfin de la concurrence de l'osmose inverse. Jusqu'aux années 60 la seule technologie industrielle disponible était la distillation simple effet ou multiples effets qui sont caractérisées par des coefficients d'échange de chaleur élevés qui permettent l'utilisation de très faibles différences de température par effet, c'est-à-dire l'obtention d'un taux de performance élevé tout en maintenant une température maximum de saumure relativement basse environ 60-70°C a permis de supprimer les problèmes d'entartrage avec un traitement antitartre limité au dosage d'un inhibiteur de corrosion à base de polyphosphate donc la vitesse de corrosion assez limitée.

5. Procédés à membranes :

Au lieu d'extraire par évaporation l'eau douce de l'eau de mer, on peut envisager une séparation de l'eau et des sels dissous au moyen de membranes sélectives. Deux procédés utilisant de telles membranes sont actuellement commercialisés. Ce sont l'électrodialyse et l'osmose inverse.²⁸

5.1. L'électrodialyse (ED) :

5.1.1. Principe :

L'électrodialyse fonctionne sur le principe du rejet d'ions grâce à leur charge. Les techniques de l'électrodialyse sont : la dialyse et l'électro-désionisation. On distingue trois types d'électrodialyse :

1. L'électrodialyse dite conventionnelle (ED)
2. L'électrodialyse à membrane bipolaire (EDMB)
3. L'électrolyse à membranes (EM)

Le point commun de ces techniques est la mise en œuvre de membranes échangeuses d'ions permettant de transférer des ions de façon sélective sous l'effet d'un champ électrique.

a. L'électrodialyse dite conventionnelle : Le terme dialyse désigne la diffusion d'une solution à travers une membrane qui lui est perméable. L'électrodialyse désigne le transfert d'ions à travers une membrane qui leur est perméable sous l'effet d'un champ électrique.

b. L'électrodialyse à membrane bipolaire : Les membranes bipolaires sont constituées d'une face perméable aux anions et d'une face perméable aux cations. Sous l'effet d'un champ électrique, l'eau présente au cœur de la membrane est dissociée en ions H⁺ et OH⁻ générés respectivement par les faces cationiques et anioniques.

c. L'électrolyse à membranes : L'électrolyse à membranes est la technique électro-membranaire dans laquelle on couple les effets d'une électrodialyse (migration d'ions au travers d'une membrane semi-perméable) à ceux d'une électrolyse (réaction aux électrodes).²⁹

5.1.2. Avantages :

- L'électrolyse est une technique qui permet d'obtenir une eau de très bonne qualité avec une faible concentration de saumure ;
- Dans le cas des eaux à faible concentration saline, l'électrodialyse est très compétitive par rapport à l'osmose inverse ;
- La quantité de courant électrique nécessaire est proportionnelle à la teneur en sel de l'eau, donc elle consomme peu d'énergie quand on dessale une solution à faible teneur en sel telles les eaux saumâtres par exemple, avec une consommation d'énergie de 3-8 kWh/m³.³⁰

²⁸ [AGGAB.C.2014] « CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX DE LA - STATION DE DESSALEMENT DE SOUK TLETA (NW, ALGERIE). » Ingéniorat d'Etat en Hydrogéologie, UNI VERSITE ABOUBEKR BELKAID- TLEMEN.

²⁹ [BERLAND&JUERY, 2002] « Les procédés membranaires pour le traitement de l'eau. » DOCUMENT TECHNIQUE FNDAE N°14.

5.1.3. Inconvénients :

- L'électrodialyse ne marche pas pour les solutions ayant une forte concentration en sel et si elle est utilisée pour dessaler des solutions à plus forte teneur en sel que des eaux saumâtres, la consommation grimpe à 15-25 kWh/m³ ;
- L'électrodialyse n'est pas pratiquée pour traiter les eaux à moins de 0.04% de sels ;
- Elle s'effectue accompagnée de rejets de saumures faisant ainsi augmenter la salinité des eaux dans laquelle elle est rejetée. Ces rejets entraînent une dégradation du sol et des plantes ainsi qu'une contamination des nappes phréatiques et une perte de la biodiversité.³¹

5.2. L'osmose inverse (RO) :

5.2.1. Principe du RO :

L'osmose un phénomène qui tend à équilibrer la concentration en soluté de part et d'autre d'une membrane semi-perméable. C'est est un phénomène naturel, notamment à travers les membranes cellulaires.³² Le phénomène d'osmose va se traduire par un flux d'eau dirigé de la solution diluée vers la solution concentrée. Si l'on essaie d'empêcher ce flux d'eau en appliquant une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer. Il arrivera un moment où la pression appliquée sera tel que le flux d'eau va s'annuler. Si pour simplifier, on suppose que la solution diluée est de l'eau pure, cette pression d'équilibre est appelée pression osmotique. Une augmentation de la pression au-delà de la pression osmotique va se traduire par un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique (**Figure 2.6.10.**), c'est-à-dire de la solution concentrée vers la solution diluée ; c'est le phénomène d'osmose inverse.³³

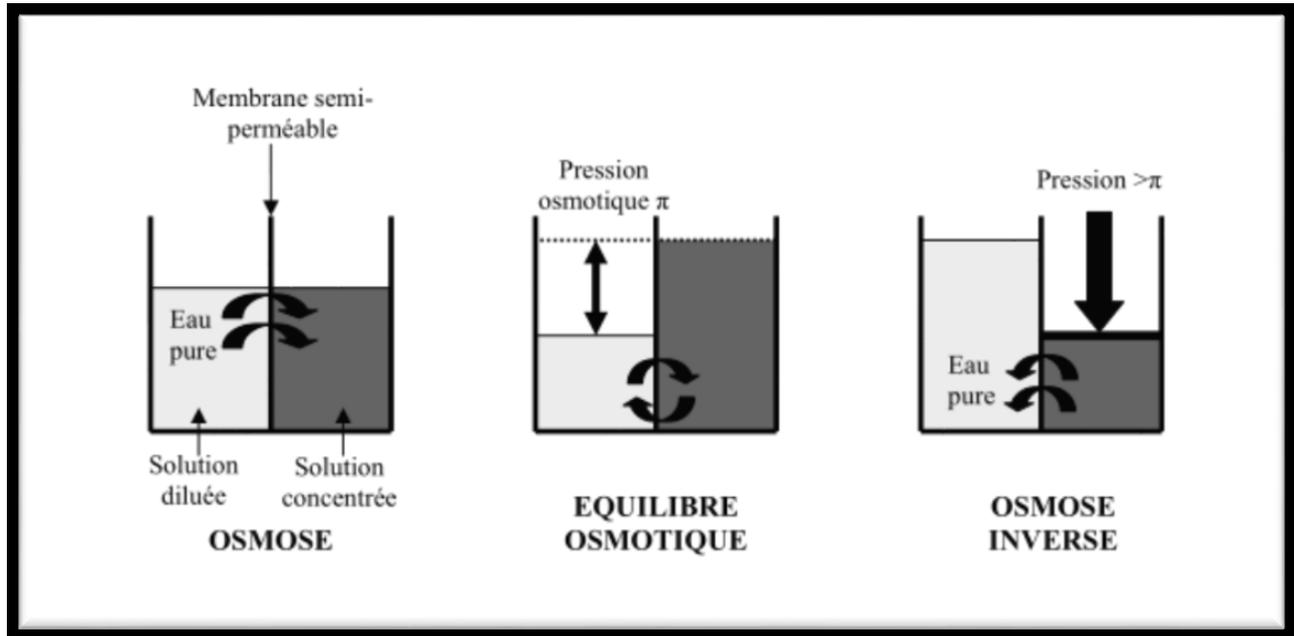
³⁰ [F. Dardel] « Les résines échangeuses d'ions en traitement d'eau potable ».

³¹ [F. Dardel]

³² [BERLAND&JUERY, 2002]

³³ [MAUREL,2006]

Figure 2.6.10 : Principe des phénomènes d'osmose et d'osmose inverse³⁴



6.1.1. Avantages de l'osmose inverse :

Avoir un osmoseur apporte de nombreux avantages, notamment celui de la faible demande d'énergie (car au lieu de chauffer le liquide il suffit de le mettre sous pression) et donc d'un coût plus faible que celui de tout le système de distillation. De plus, il est possible d'avoir un osmoseur chez soi pour filtrer l'eau provenant de nos canalisations afin de la consommer et donc faciliter l'approvisionnement, en effet on a plus besoin d'acheter de bouteilles d'eau, ce qui réduit considérablement les dépenses financières en eau. D'autant plus qu'elle est libérée de tous produits qui peuvent être nocifs, en particulier le chlore et le fluorure, comme nous l'avons déjà vu les membranes philtres jusqu'au 0,0001 μm , elle est idéale pour la santé et pour notre peau car elle ne sera pas irritée, puis les problèmes de dépôt de calcaire seront terminés. Par ailleurs, c'est un système écologique qui n'utilise aucun produit chimique. De surcroit, on protège, en n'achetant plus de bouteilles, les sources d'eau douces qui se détériorent, s'assèchent et sont polluées de plus en plus.³⁵

5.2.3. Inconvénients de l'Osmose inverse

Il se place de nos jours comme la technologie incontournable dans le processus de dessalement de l'eau de mer. Une chose qui s'explique principalement par une faible consommation énergétique, un faible coût d'investissement de base et une large gamme de capacité de production. Quoiqu'intéressant sur les aspects financier et énergétique cette technologie présente par ailleurs quelques inconvénients :

³⁴ [TANSAKUL, 2009] « Procédés hybrides à membranes pour le prétraitement d'eau de mer avant dessalement par osmose inverse. » Thèse de doctorat en Génie des procédés et de l'environnement. Toulouse, INSA.

³⁵ [AHMOUDA.I. 2016] « Traitement des rejets de dessalement de l'eau de mer "Les Dunes" Oran. » Master en Génie minier. UNIVERSITE LARBI TEBSSI-TEBESSA.

- La sensibilité des membranes au colmatage ce qui réduit le taux de conversion et entraîne à long terme une consommation énergétique supérieure à la normale.
- La salinité obtenue est assez élevée pour une utilisation industrielle, car elle est de l'ordre de 300 à 500 ppm, par contre adaptée à l'usage domestique Enfin lorsque la salinité de l'eau de mer est importante le cout d'investissement devient non négligeable³⁶

6. Autres procédés de dessalement

6.1. Echange ionique :

Le phénomène d'échange d'ions se produit quand on met en contact une eau saumâtre avec certaines substances insolubles ayant la propriété d'échanger certains de leurs ions avec les sels de l'eau, les produits employés actuellement sont des produits insolubles dénommés échangeurs d'ions (résines synthétiques sous la forme de graines d'environ 0,3 à 1,5 mm). Cette méthode est applicable seulement pour les eaux contenant jusqu'à 8 et même 10 g/L.³⁷

6.2. Dessalement par congélation :

Lors du processus de congélation, les sels dissous sont naturellement éliminés lors de la formation initiale de cristaux de glace. Le refroidissement de l'eau salée pour former des cristaux de glace sous des conditions bien définies est un moyen de dessaler l'eau de mer.³⁸ Le procédé par congélation exige la mise en œuvre des moyens mécaniques complexes pour trier les glaçons de l'eau de mer, est, de ce fait, presque complètement abandonné. On distingue les procédés par congélation sous vide et les procédés par congélation basés sur un réfrigérant.³⁹

6.2.1. Principe :

Le principe du procédé de congélation sous vide est assez simple. Lorsqu'on fait geler de l'eau salée, les cristaux qui se forment consistent en de la glace pratiquement pure, le sel étant chassé de l'eau lors de la cristallisation et forme une saumure à la surface du cristal. Ce procédé de congélation sous vide pour le dessalement de l'eau entraîne un phénomène trop onéreux du point de vue commercial, d'abord, la congélation de l'eau salée, puis le lavage des cristaux et enfin la fusion pour obtenir de l'eau douce. Dans la pratique, les choses sont un peu plus compliquées.⁴⁰

Une autre méthode fondée sur la congélation est celle du réfrigérant secondaire, dans laquelle le transfert de chaleur est obtenu par l'emploi de butane ou d'un autre hydrocarbure liquide non miscible dans l'eau. Le mélange de butane et de l'eau de mer passe par un échangeur de chaleur où l'échauffement fait bouillir le butane, ce qui entraîne la congélation de l'eau dans la saumure. Les

³⁶ [SAMAKÉ O.2016].

³⁷ [BECHKI. 2011] « Etude comparative et optimisation des procédés de distillation solaire en vue de la production d'eau potable dans les zones arides sahariennes. » Doctorat en sciences en génie mécanique. Université Hadj Lakhdar Batna.

³⁸ [NOUREDDINNE. N .2008] « Etude d'impact des rejets des eaux de la station de déminéralisation de Brédéah sur l'environnement. »

³⁹ [HAMEL. H .2006] « CONDENSATION ET PRECIPITATION DES VAPEURS HUMIDES DANS LE PROCEDE DE DISTILLATION MED. DU DESSALEMENT A AL ZINC, UNIVERSITE Abou Bakr Belkaid – Tlemcen Faculté des sciences.

⁴⁰ [KHAWAJI. A .2008] « Advances in sea waters desalination technologies, desalination. »

cristaux de glace sont lavés, séparés et finalement fondus, moyennant l'échange de chaleur avec la vapeur de butane préalablement comprimée.⁴¹

6.2.2. Inconvénients :

L'inconvénient de ces procédés est leur impact sur l'environnement. En effet pour produire 1 litre d'eau douce, ce sont deux litres d'eau fortement concentrés en sel qui sont rejetés dans la mer ou injectés dans les sols, pour ces derniers, le risque d'augmenter la salinité des nappes.⁴²

7. Comparaison des différents procédés de dessalement :

Les systèmes de dessalement présentent souvent des avantages et inconvénients similaires sous certaines conditions de fonctionnement. De ce fait il est difficile de mettre en évidence les différences d'un procédé par rapport à un autre sans avoir recours à d'autres critères de comparaison, parmi lesquels on trouve les critères techniques, économique et environnemental.

D'après (Darwish & Alsairafi 2004)⁴³, le procédé de dessalement par multiple flash occupe 87,3 % du marché du dessalement thermique ; alors que les multiples effets et les systèmes à compression de vapeur représentent respectivement 12,5 et 0,3 % des installations de dessalement mises en place d'où l'avantage d'expérience de MSF sur le MED. Malgré son exploitation massive justifiée par le pourcentage obtenu, le MSF est le type de dessalement le plus énergivore confirmé par plusieurs études le comparant aux systèmes à multiples effets. *Maurel*⁴⁴ énumère quelques avantages du MED par rapport aux MSF :

Une grande souplesse de fonctionnement avec une variation de la production de 15 à 100 % du régime nominal sans problème ce qui n'est pas le cas avec le MSF.

Pour une même quantité d'eau produite, le MED avec compression de vapeur consomme parfois la moitié de l'énergie d'un système à MSF.

Si le MED est plus performant que le MSF, il produit par contre deux fois moins d'eau douce que le système à compression de vapeur sur la base d'une consommation de vapeur égale.

Les systèmes de dessalement à multiples effets ont un coût d'investissement faible par rapport aux MSF. Les unités avec compression de vapeur ont un investissement de l'ordre de la moitié du coût du MSF.

Du point de vue thermodynamique et transfert thermique les multiples effets sont plus performants. L'énergie de pompage et la surface de transfert du système à multiple effets (MED) correspondent respectivement à 20 % et 50 % de ceux des multiples flashes (MSF).

Une installation à multiples effets sans thermocompression produit deux fois moins d'eau à consommation de vapeur égale. La pression de vapeur motrice peut être choisie sur une large

⁴¹ [KESBLA,2017] « Analyses physico-chimiques des eaux de mer dessalées par distillation « Cas d'ALZINC - Ghazaouet ». MASTER En Hydraulique. Université Aboubakr Belkaïd. Tlemcen.

⁴² [GALUS.C] « les techniques de dessalement de l'eau de mer prennent de l'essor » extrait du Monde.

⁴³ [Darwish, M.A. & Alsairafi, A., 2004] « Technical comparison between TVC/MEB and MSF. Desalination. » 170(3), pp.223-239. Available at : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916404800274>.

⁴⁴ [Maurel 2006].

échelle allant de 1,5 à 45 bars. Une unité à détentes successives aurait 16 à 20 étages pour obtenir le même rendement qu'un système à compression de vapeur.

Les impacts environnementaux liés aux différents procédés de dessalement concernent généralement les rejets de saumure non diluée qui contiennent des produits corrosifs ainsi que des réactifs. L'impact environnemental d'un procédé est évalué sur la base de l'emplacement de ses rejets et de leur temps de dilution.

L'analyse du cycle de vie des systèmes de dessalement thermique réalisée par (Raluy et al .2004)⁴⁵ montre que les MSF et le MED ont plus d'impacts négatifs sur l'environnement marin que l'osmose inverse avec une domination des MSF par rapport au MED. Cette différence s'expliquerait par une grande consommation énergétique des unités MSF contrairement aux systèmes multiples effets et à compression de vapeur.

Le tableau ci-dessous récapitule les consommations énergétiques, les avantages et inconvénients des différents procédés :

⁴⁵ [Raluy, R.G.et al.2004] « Life-cycle assessment of desalination technologies integrated with energy production systems. » Desalination Strategies in South Mediterranean Countries, 167(0), pp.445–458. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001191640400400X>.

Tableau 2.6.2 : Caractéristiques des différents procédés⁴⁶

Méthodes de dessalement	Avantages	Inconvénients
Multiple effet	Grande capacité de production Faible coût d'investissement Haut degré de pureté (<30 ppm) L'apport d'énergie indépendant de la salinité Service minimal	Dépendant du type d'énergie disponible Durée de construction longue Le contrôle de la qualité de l'eau difficile Rapport de production (30 % - 40 %) Nécessite de Main-d'œuvre Encombrant
Osmose inverse	Adapté à l'eau de mer et saumâtre Flexibilité par rapport à la quantité et à la qualité d'eau Faible consommation d'énergie par rapport au MED et au VC Non encombrant Souplesse à l'arrêt et au démarrage du système	Basse qualité (250-500 ppm) Nécessite haute eau d'alimentation de qualité Investissement et coût d'exploitation relativement élevés Pression d'alimentation assez grande Durée de construction longue pour une production à grande échelle.
Compression vapeur	Qualité de l'eau élevée (20 ppm) Haute charge opérationnelle Durée de construction courte Souplesse d'exploitation et de production	Coûts d'exploitation élevés Forte consommation d'énergie Absence de contrôle de la qualité de l'eau
électrodialyse	Exploitation à faible coût en capital et Source d'énergie flexible Taux de conversion élevé (80 %) Faible consommation d'énergie Faible encombrement et besoins en matériaux	Faible à la capacité de l'eau saumâtre à moyen (3000 ppm) Nécessite un prétraitement avec soin les aliments eau Faible capacité de production Pureté affectée par la qualité de l'eau d'alimentation
Multi flash	Flexibilité de la salinité de l'eau d'alimentation La production de haute pureté (<30 ppm) Grande capacité de production Exigences de compétence faible La production de l'eau et électricité Entrée haute énergie	Rapport de production faible (30 % -40 %) Coûts d'exploitation élevés Exigences élevées de construction Potentiellement limité pour l'amélioration

⁴⁶[SAMAKÉ O.2016].

8. Conclusion :

Les procédés de dessalement sont nombreux et en constantes évolution, chaque technique offre son lot de solutions mais engendre aussi différents inconvénients, le choix du procédé doit alors dépendre de plusieurs facteurs à la fois techniques et économiques, chercher le rapport qualité/prix est primordial afin de tirer le meilleur parti du dessalement.

PARTIE 03

SELECTION D'UN PROCEDE DE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER AVEC PROMETHEE : Etude de cas.

Chapitre 07 : Etat des lieux des ressources en eau dans la wilaya de Tlemcen.

Chapitre 08 : Description et présentation de la station de dessalement de Honaine

Chapitre 09 : Application de la méthode PROMETHEE

Chapitre 07 :
**Etat des lieux des ressources en eau dans la wilaya de
Tlemcen**

- 1. Introduction**
- 2. Description de la région d'étude (wilaya de Tlemcen).**
 - 2.1. Situation géographique.**
 - 2.2. Population et activités.**
 - 2.3. Caractéristiques hydrologiques de la ville de Tlemcen.**
 - 2.3.1. Les sous bassins versants.**
 - 2.3.2. Le réseau hydrographique du GUT.**
- 3. Les travaux réalisés en matière de mobilisation des ressources en eau à Tlemcen**
- 4. Conclusion.**

1. Introduction

La Wilaya de Tlemcen occupe une position de choix au sein de l'ensemble national, elle regroupe actuellement 20 dairas et 53 communes dont le chef-lieu de la Wilaya est Tlemcen.

Le groupement des communes de Tlemcen, Chetouane et Mansourah (Groupement Urbain de Tlemcen) est le centre de la Wilaya et constitue la zone la plus peuplée dont il représente 25 % de la population totale de la Wilaya.

Nous présentons dans ce chapitre d'une manière générale la Wilaya de Tlemcen, à savoir le contexte géographique, climatique, démographique, géologique, hydrologique, et sa situation hydrique.

2. Description de la région d'étude

2.1. Situation géographique

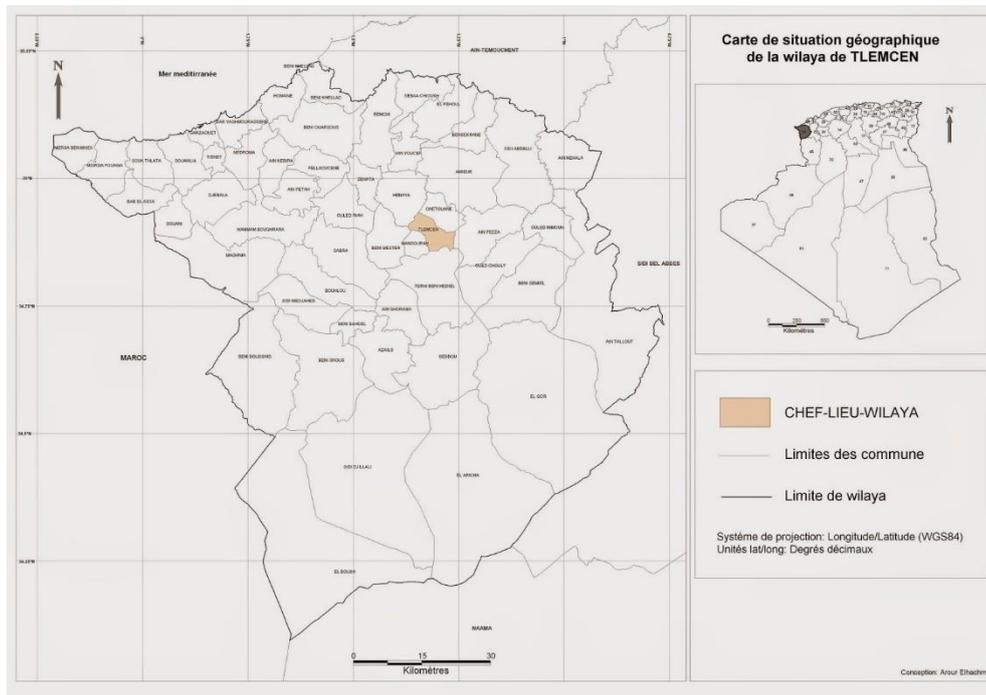
La wilaya est située sur le littoral Nord-ouest du pays et dispose d'une façade maritime de 120 km. C'est une wilaya frontalière avec le Maroc. Elle est limitée par :

- La mer méditerranée au Nord ;
- La wilaya d'Ain Témouchent à l'Est ;
- la wilaya de Sidi Bel Abbès à l'Est- Sud –Est ;
- La wilaya de Saida au Sud ;
- Le Maroc à l'Ouest.

La wilaya s'étend sur une superficie de 9 018 km². Le Chef-lieu de la wilaya est situé à 432 km à l'Ouest de la capitale, Alger.¹

¹[BRAHAMI. I & MAHAMED I F.2016] « Schéma optimal de l'utilisation des ressources en eau dans le Groupement Urbain de Tlemcen. » Master En Hydraulique. UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID.

Figure 3.7.1. Situation géographique de la wilaya de Tlemcen²



2.2. Population et activités :

La population totale de la wilaya est de 824 053 habitants, soit une densité de 91 habitants par Km².³

⇒ Taux de croissance de la population : 1.56%.

⇒ Population active (2010) : 324 877 hab.

⇒ Population occupée (2010) : 271 899 hab.

⇒ Population occupée par secteur d'activité :

- Agriculture : 97 475
- Commerces : 63 640
- Administration : 35 902
- Services : 30 231
- BTPH : 27 725
- Industrie : 12 726
- Autres : 4 200.

² <http://decoupageadministratifalgerie.blogspot.com/2014/10/cartegeographiqueTLEMCCEN.html>.

³ [Agence Nationale d'Intermédiation et de Régulation Foncière Rubrique Monographie Wilaya.2011] « Wilaya de TLEMCCEN ».

2.3. Caractéristiques hydrologiques de la ville de Tlemcen :

2.3.1. Les sous bassins versants : L'étendue de la ville de Tlemcen présente quatre sous bassins versants :⁴

1-Sous bassin Oued Khemis : Ce bassin, d'une superficie de 350 km², est caractérisé par des pentes assez abruptes dépassant généralement 25% aux abords de l'oued. A l'Est et l'Ouest du bassin les pentes sont fortes à moyennes (de 3% à 25%).

2-Sous bassin Oued Sebdou : Ce bassin occupe une superficie de 255,5 Km² avec une altitude maximale de 1465 m. dans les monts de Tlemcen. L'oued sebdou représente la source et le début du cours d'eau Tafna. En alimentant le barrage de Béni Behdel après avoir rejoint oued Khemis.

3- Sous bassin Oued Sikkak : Ce sous bassin comporte la présence du plateau de Terny et les falaises d'El Ourit vers les hautes altitudes, et de la plaine d'Henaya vers les basses altitudes. Il est parcouru par l'oued Ennechef au niveau de Mefrouche et rejoint l'oued sikkak dans la plaine d'hennaya.

4- Sous bassin Oued Chouly: Le cours d'eau de ce bassin à régime permanent doit sa pérennité aux nombreuses sources qui l'alimentent telles que : Aïn Tot Hamam, Aïn Ouissert. Ce cours d'eau draine la partie orientale et appelé oued Isser..

2.3.2. Le réseau hydrographique du GUT :

Le réseau hydrographique du groupement est représenté essentiellement par Oued El Ourit situé au Sud-est de la commune de Tlemcen en amont. En aval, il est rejoint par d'autre cours d'eau et prend alors le nom d'Oued Saf-Saf. Ainsi les composantes naturelles du chevelu hydrographique du groupement sont comme suit :

- **L'Oued El Horra**, au centre drainant la totalité des eaux usées de la ville de Tlemcen ;
- **L'Oued Sikkak**, au Nord de Ain El Houtz, son cours d'eau suit sensiblement l'axe Nord-sud de la ville de Tlemcen ;
- **Le talweg de Metchkana**, apparaît à l'Est de la ville de Tlemcen, il rejoint l'Oued Saf-Saf au niveau de la commune de Chetouane. Il existe un autre talweg encaissé à la limite ouest de la ville de Tlemcen : talweg Makhoukh drainant les eaux de la commune de mansourah.

Enfin un réseau régulier de ruisseaux constitue un éventail de petits talwegs vers le Nord-Ouest et le Nord-est de la ville de Tlemcen. Notons que tous ces Oueds font partie du grand bassin versant de la Tafna.

3. Les travaux réalisés en matière de mobilisation des ressources en eau à Tlemcen :

Le développement socio-économique de la région de Tlemcen et l'accroissement de la population ont poussé les autorités locales à mettre sur pied des programmes de prospection et d'exploitation des ressources en eau afin d'accompagner les différents plans d'urbanisme et d'aménagement tracés par les services de la wilaya depuis plus de trois décennies.

⁴[BENTAHAR K.2014] « GESTION QUANTITATIVE ET QUALITATIVE DE L'EAU DE LA VILLE DE TLEMEN. » Thèse de magister en hydraulique, Université de Tlemcen.

Les seules prospections par forages effectuées avant 1970 sont celles qui ont accompagné la réalisation du barrage Meffrouch situé à 5 km à vol d'oiseau environ au Sud-Est de Tlemcen, reconnaissance dans l'oued Isser, la plaine de Maghnia et de Zriga (zone frontalière) et une profonde reconnaissance de 600 m en 1953 dans la région du barrage de Beni Bahdel situé à environ 18 km à vol d'oiseau au Sud- Est de Tlemcen.⁵

Ainsi, nous avons répertorié un nombre de 278 forages et un linéaire total foré de 65.887m. Ces programmes de forages ont touché aussi bien les piémonts nord et sud des monts de Traras, les plaines et plateaux du bassin de la Tafna, les monts de Tlemcen mais aussi la partie sud de la wilaya qui est une zone steppique et qui demeure la région la plus démunie en ressources en eau de la wilaya. A la suite de ces travaux, de nombreuses nappes d'eau souterraines ont été mises en évidence. Très souvent les forages de reconnaissance sont convertis en forages d'exploitation et permettent l'alimentation en eau potable de la population aussi bien locale que celle des wilayas limitrophes, en particulier Oran, Ain-Temouchent et Sidi bel Abbès.

4. Conclusion :

En raison de la balance déficitaire qui caractérise non seulement le groupement urbain de Tlemcen, il s'est avéré nécessaire de chercher des nouvelles ressources tout en veillant à la protection des ressources existantes. Pour assurer l'alimentation en eau potable du GUT et certaines régions touchées par la sécheresse, la wilaya de Tlemcen a opté pour le dessalement de l'eau de mer. Un programme supplémentaire de réalisation pour renforcer le GUT à partir de la station de dessalement d'eau de mer située au Nord-ouest de la wilaya (à Honaine, plage de Tafassout) avec une capacité de 200000 m³ /j.

⁵[BENSAOULA et al.2012] « Trente années de prospection et de mobilisation des ressources en eau souterraine, par forages, dans la Wilaya de Tlemcen », Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 10.

CHAPITRE 08 :

Présentation et Description de la station de dessalement de Honaine Tlemcen.

- 1. Introduction**
- 2. Présentation de la station de dessalement de 'Honaine'.**
 - 2.1. Situation géographique.**
 - 2.2. Caractéristiques de l'eau de mer**
 - 2.3. Principales caractéristiques de fonctionnement de la station de dessalement de Honaine.**
- 3. Processus du dessalement appliqué dans la station du dessalement de Honaine.**
 - 3.1. Phase de Captation d'eau de mer et de pompage.**
 - 3.2. Phase de filtration (pré-traitement).**
 - 3.2.1. Le pré-traitement chimique.**
 - 3.2.1. Le pré-traitement physique.**
 - 3.3. Phase de procédé de dessalement (Osmose inverse RO).**
 - 3.4. Phase de reminéralisations (post traitement).**
 - 3.5. Pompage de l'eau dessalée.**
- 4. Conclusion.**

1. Introduction :

L'Algérie a construit 13 usines de dessalement en 2011 un peu partout sur son territoire et projetait de construire 43 usines pour 2019, dont la plus grande usine de dessalement d'eau de mer au monde (utilisant la méthode de l'osmose inverse).

Notre choix s'est porté sur la station de dessalement de Tafout à Honaïne (W.Tlemcen) dans l'extrême ouest algérien pour son importance et sa nouveauté.

Nous présentons dans ce chapitre d'une manière générale la station, à savoir sa position géographique, ses Principales caractéristiques de fonctionnement, et le processus du dessalement appliqué.

2. Présentation de la station de dessalement de 'Honaïne' :

Au Nord-Ouest Algérien, la Wilaya de Tlemcen a fait l'objet de l'installation d'une station de dessalement d'eau de mer, dans la région de 'Honaïne'. Sa capacité de production est de 200.000.m³/j, assurant l'approvisionnement en eau potable de 23 communes ainsi que les agglomérations urbaines du Grand-Tlemcen (Tlemcen, Mansourah et Chetouane), soit une population d'environ 555.000 habitants. La station de dessalement de l'eau mer de 'Honaïne', est la deuxième station de dessalement dont dispose la wilaya après celle de 'Souk Tleta', entamée en 2006 par le groupement espagnol GEIDA (composé des sociétés COBRA, SADYT, BEFESA et CODESA), a été opérationnelle en juillet 2012, avec un montant d'investissement de 250 millions de dollars.⁶

Figure 3.8.1 : Photo de la station de dessalement de Honaine



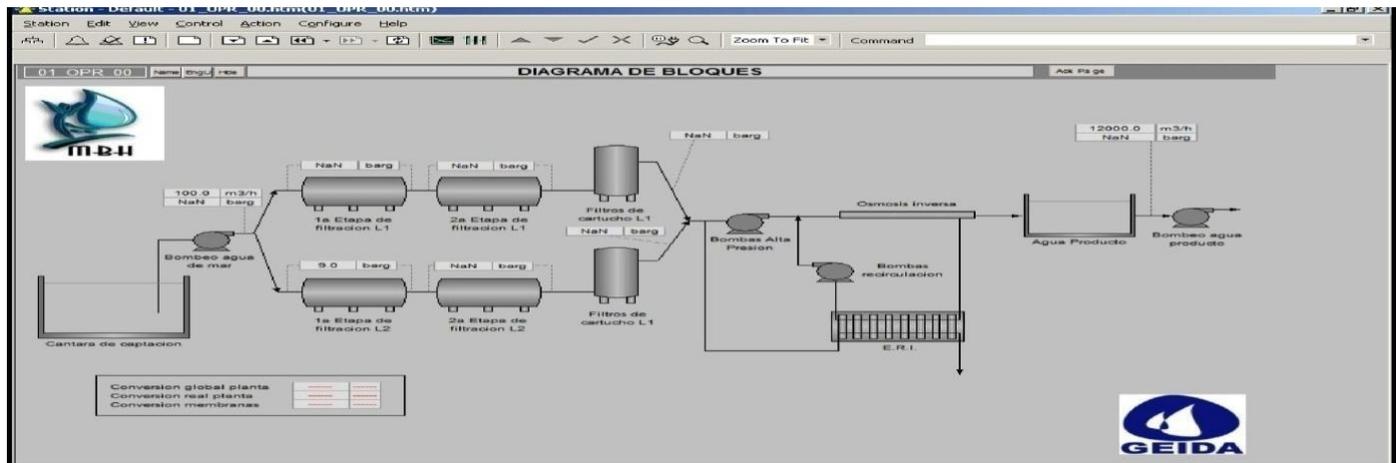
⁶ [I. ALLAM.2012] « La mise en exploitation de la station de dessalement de Honaine ». Mémoire pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état en hydraulique option hydraulique urbaine. Université de Tlemcen.

2.1. Situation géographique :

Située à 60km du chef-lieu de la Wilaya, la commune de Honaine s'étend sur une superficie totale de 6385 hectares, elle est limitée au :

- Nord-Est des Trara orientaux, limitrophe à la daïra de Béni Saf dans la wilaya d'Ain-Temouchent, limitée au Nord par la mer,
- À l'ouest par les daïras de Nedroma et de Ghazaouet,
- Et au sud par la daïra de Remchi ⁷

Figure 3.8.2 : Schéma générale de la station de Honaine⁸



2.2. Caractéristiques de l'eau de mer :

Les caractéristiques de l'eau de mer faisant l'objet du dessalement sont présentées dans le **Tableau 3.8.1**. Il s'agit des conditions de base pour entamer l'opération de dessalement. ⁹

⁷ [OTMANI S.2009] « Caractérisation anthropogénique de la population de Honaine du l'ouest algérien » Diplôme de magister, département des cultures populaires, faculté des lettres et sciences humaines et sociales. Université de Tlemcen.

⁸ [ABDELLAOUI. H.2015] « Etude comparative de la qualité de l'eau de mer dessalée par distillation et osmose inverse « cas de la station de Honaine. » Diplôme de Master en Hydraulique Option : Technologie de traitement des eaux. Université de Tlemcen.

⁹

Tableau 3.8.1 : Caractéristique de l'eau de mer Honaine.

Paramètres	Unité	Condition de base du site de la station de dessalement d'Honaïne
Température	°C	24
Solides dissous total	µg/l	40,074
Matières en suspension	µg/l	0,004
Chlorure	µg/l	22,289
Calcium	µg/l	1,047
Sulfate	µg/l	2,978
Magnésium	µg/l	1,545
Sodium	µg/l	11,472
Potassium	µg/L	0,583
Bicarbonate	µg/l	0,130
pH		8,2

2.3. Principales caractéristiques de fonctionnement de la station de dessalement de Honaine :

Ces caractéristiques sont résumées dans le tableau suivant : ¹⁰

¹⁰ [ABDELLAOUI. H. 2015]

Tableau 3.8.2 :1 Principales caractéristiques de fonctionnement de la station de dessalement de Honaine.

Désignation	Unités	Valeurs
Production Continue Prévue	m ³ /j	203 .000
Nombre total d'unité installée	U	10
Température de travail minimum prévue	⁰ C	18
Température de travail maximum prévue	⁰ C	24
Type de membrane		A enroulement en spirale
Matériau de la couche active		Polyamide aromatique
Rejet minimum en sel	%	99.45
Nombre de membrane par cuve sous pression	U	07
Nombre d'étages	U	01
Débit spécifique maximum	l/m ² /h	13.96
Pression d'entrée dans les membranes	Bars	62
Pression de sortie des membranes	Bars	64.5
Pas N°1		
Nombre de membrane dans le premier étage /unité	U	1820
Nombre de Cuve sous pression dans le premier étage /unité	U	260
Modèle de membrane		SWC5
Châssis		
Nombre de tubes de pression /Colonne	U	12
Nombre de colonne	U	24
Nombre de vides pour tube de pression en réserve	U	28
Tuyaux de distribution dans le châssis		
Nombre de collecteurs verticaux de distribution	U	2

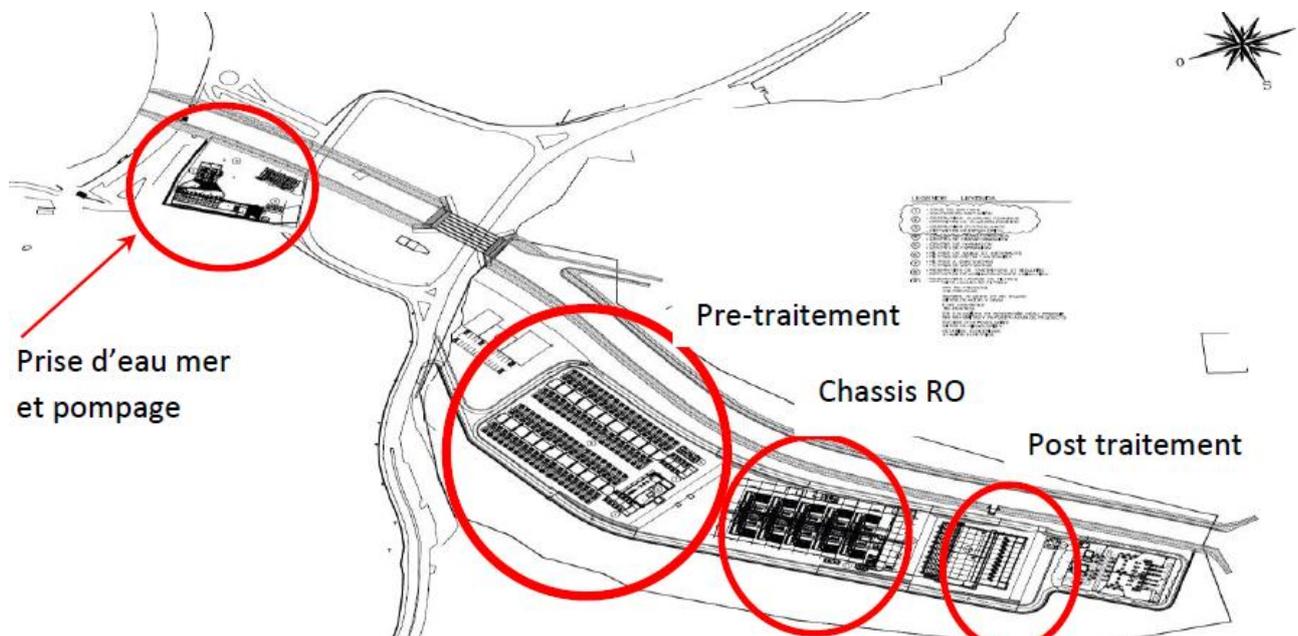
3. Processus du dessalement appliqué dans la station du dessalement de Honaine :

Le processus de traitement au niveau de la station de dessalement d'eau de mer de Honaine (**figure 3.8.3**) se décompose de quatre phases principales :¹¹

- 1- Phase de captation (prise d'eau de mer) et de pompage
- 2- Phase de filtration (prétraitement)
- 3- Phase de procédé de dessalement de l'eau de mer (osmose inverse RO)
- 4- Phase de reminéralisations (post traitement)

¹¹ [M. BENALLOUDA,2013] « Etude de l'influence. » Diplôme de Master en Hydraulique Option : Technologies de Traitement Des Eaux. Université de Tlemcen.

Figure 3.8.3 : Schéma des étapes de traitement à la station de dessalement de Honaine¹²



3.1. Phase de Captation d'eau de mer et de pompage :

Le captage va être effectué au moyen d'une tour de captage en béton armé. Cette tour a été conçue pour capter l'eau brute nécessaire à une production de 200.000 m³/jour, en tenant compte de la consommation interne de l'usine de désalinisation. La tour, de forme hexagonale, dispose de 6 fenêtres de 2,0*1,5 m de surface pour l'entrée d'eau brute, à une vitesse inférieure à 0,3 m/s. Les fenêtres d'entrée d'eau sont à 7,0 m (-11,00 m) au-dessus de la bathymétrie du fond marin afin d'éviter que, à cause de la houle, du sable et d'autres éléments présents au fond puissent s'introduire. La hauteur des tours de captage est de 9,00 m par rapport à l'appui sur le fond marin (-18,00). L'eau de mer, par le biais de l'émissaire de captage, entre dans la cuve d'eau de mer où elle sera préfiltrée à travers des grilles à gros et des tamis autonettoyants qui présentent un maillage de 1mm. L'émissaire de captage contient 3 tubes intérieurs DN-50 en PE (polyéthylène) jusqu'à la tour de captage. Le débit nécessaire à fournir à l'usine est de 18 934 m³/h, le débit d'eau qui doit être capté par la tour de captage est plus grand, car il comprend le débit nécessaire au nettoyage des tamis autonettoyants. Les matériaux extraits des tamis rotatifs sont dirigés vers un bac où se trouvent des pompes d'extraction de matériaux en suspension. Le groupe de pompage d'eau de mer comprend 11 (10+1) pompes, avec une capacité de pompage de 18 934 m³ /h chance. Les dix pompes à eau d'eau de mer seront installées en parallèle, l'une d'entre elles étant en réserve.¹³

¹² [I. ALLAM.2012].

¹³ [ABDELLAOUI. H.2015]

Figure 3.8.4 : Le captage de l'eau de mer



Figure 3.2.5 : Photo du bloc de pompes de captation¹⁴



3.2. Phase de filtration (prétraitement) :

C'est la deuxième étape du processus de dessalement dont le but est d'éliminer :

- a. Les solides en suspension.
- b. Les matières organiques.
- c. Les micro-organismes.

¹⁴[I. ALLAM.2012].

Elle est aussi nécessaire pour éviter la détérioration des pompes, l'incrustation, l'encrassement et la dégradation des membranes d'osmose inverse par les microorganismes. Cette étape comporte deux types de pré-traitements :

- **Le prétraitement chimique** consiste en l'addition d'inhibiteurs d'entartrage, de coagulants, de désinfectants et de polyélectrolytes ;
- **Les prétraitements physiques** incluent les préfiltres mécaniques, les filtres à cartouche, la filtration à sable et la filtration membranaire.¹⁵

3.2.1. Le pré-traitement chimique :

Cette opération s'effectue au niveau de la tour de captage de l'eau de mer ou dans l'aspiration des pompes à eau de mer ou dans l'impulsion de ces dernières. Elle consiste à l'injection d'hypochlorite de sodium NaOCL, de chlorure ferrique ($FeCl_3$) et du métabisulfite de sodium ($Na_2O_5S_2$).

- **Traitement par l'hypochlorite de sodium :** Cette étape se fait grâce à deux citernes NaOCL d'une capacité de 140 m^3 , munies de « 4 +1 » pompes destinées à injecter l'hypochlorite de sodium au niveau du système de pompage de l'eau de mer.

Figure 3.8.6: Photo d'une citerne de stockage d'hypochlorite de Sodium



- **Traitement par le chlorure ferrique :** Deux autres citernes de $FeCl_3$ munies de « 4 +1 » pompes sont utilisées pour injecter le $FeCl_3$ au niveau du système de pompage de l'eau de mer. Une injection éventuelle d'acide sulfurique pour ajuster le pH est possible lors du traitement. Cette injection a pour but d'éliminer les matières en suspension et les matières colloïdales présentes dans l'eau de mer.¹⁶

¹⁵ [TANSAKUL C., 2009] « Procédés hybrides à membranes pour le prétraitement d'eau de mer avant dessalement par osmose inverse. » Doctorat. Génie des procédés et de l'environnement. Université de Toulouse.

¹⁶ [ATALLAH.A. 2012] « PROCEDE DE DESSALEMENT ET QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE DE L'EAU DESSALEE PAR LA STATION DE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER DE HONAIN- TENEURS : CATIONS, ANIONS ET METAUX LOURD » Diplôme de Master en Biologie Option Alimentation et Nutrition. Université de Tlemcen.

Figure 3.8.7: photo de la citerne de stockage de chlorure ferrique



- **Injection du métabisulfite de sodium ($\text{Na}_2\text{O}_5\text{S}_2$) :** L'utilisation du métabisulfite de sodium permet d'éliminer le chlore résiduel contenu dans l'eau de mer avant son arrivée aux membranes d'osmose inverse, évitant leur détérioration par oxydation. L'injection de la solution de $\text{Na}_2\text{O}_5\text{S}_2$ se fait par l'ensemble des pompes (4+1) avant la filtration à sable ou à cartouche pour donner un maximum de temps de contact possible.¹⁷

Figure 3.8.8 : Photo des citernes de stockage du métabisulfite de sodium



- **Dosage du dispersant :** Afin d'éviter la précipitation des sels de sulfate de calcium, sulfate de strontium fluorure de calcium et autres sels, un dosage de dispersant est réalisé. L'équipement

¹⁷ [ATALLAH.A.2012].

est composé de deux réservoirs d'accumulation dissolution de 10 m³ de capacité chacun. Cinq pompes de dosage sont installées dont l'une d'elles étant de réserve. L'ajout du produit se fait en ligne et avant les filtres à cartouche.¹⁸

3.2.2. Le pré-traitement physique :

C'est un traitement destiné à éliminer fondamentalement les éléments solides, les algues et la matière organique, par le passage de l'eau de mer à travers des filtres à sable et anthracite et à travers des filtres à cartouches.

Le mouvement de l'eau dans ces filtres est vertical, pénétrant par la partie supérieure du filtre et descendant à travers les couches filtrantes qui retiennent les matières solides dans sa partie inférieure. Des collecteurs munis de buses recueillent l'eau filtrée.¹⁹ Cette opération comporte :

a. L'ébauchage :

L'ébauchage a deux objectifs :

- Protéger la station de l'arrivée possible et intempestive de grands objets capables de provoquer des obstructions dans les différentes unités de l'installation.
- Séparer et évacuer facilement les matières volumineuses entraînées par l'eau brute qui pourrait diminuer l'efficacité des traitements suivants ou compliquer leur réalisation.

L'opération peut être plus ou moins efficace selon la séparation entre les barreaux des grilles. On peut distinguer :

- Ebauchage fin, avec une séparation de 3 à 10 mm,
- Ebauchage moyen, avec une séparation de 50 à 25 mm,
- Pré-ébauchage, avec une séparation de 50 à 100 mm.

Les grilles mécaniques sont protégées par une prégrille aux barreaux plus espacés (séparation de 50 à 100 mm), prévue, généralement, pour un nettoyage manuel mais qui devra être également automatique dans le cas des installations importantes ou si l'eau brute arrive chargée de grosses matières.²⁰

b. La Filtration :

La filtration de l'eau s'effectue sur différents types de filtres qui sont :

- Un système de filtre à sable, anthracite et gravier ;
- Un système de filtre à cartouches.
- Filtration à sable et anthracite.

¹⁸ [ALLAMI,2012].

¹⁹ [A. ATTALAH. 2012].

²⁰ [GEIDA IDAM HONAINÉ] « cours pour le personnel d'exploitation et de maintenance de la station dessalement de Honaine. »

Ce système élimine la plupart des particules en suspension, huile et graisses qui restent dans l'eau de mer et, produit une eau filtrée à basse turbidité prête pour l'étape d'osmose inverse.

Ce système de filtration comporte 80 filtres répartis en deux phases :

La première phase est constituée de 48 filtres contenant chacun

- Une couche supérieure de 600 mm de hauteur d'anthracite de 0.4 à 1.6 de diamètre.
- Une couche intermédiaire de 400 mm de hauteur de lit de sable de 0.4 à 0.8 de diamètre.
- Une couche inférieure comporte à la fois 100 mm d'anthracite de 1.4 à 2.5 mm et 100 mm de sable de 4 à 8 mm.

La deuxième phase est constituée de 32 filtres contenant

- Une couche supérieure de 700 mm de hauteur d'anthracite de 0.4 à 0.8 mm de diamètre.
- Une couche intermédiaire de 200 mm de hauteur de lit de sable de 0.55 mm de diamètre et de 1.4 de coefficient d'uniformité.
- Une couche inférieure comprenant 100mm de sable de 2 mm et de 1.4 de coefficient d'uniformité.

Les deux types de filtres sont soumis à un système de lavage.

Figure 3.8.9: Schéma de l'étape de filtration

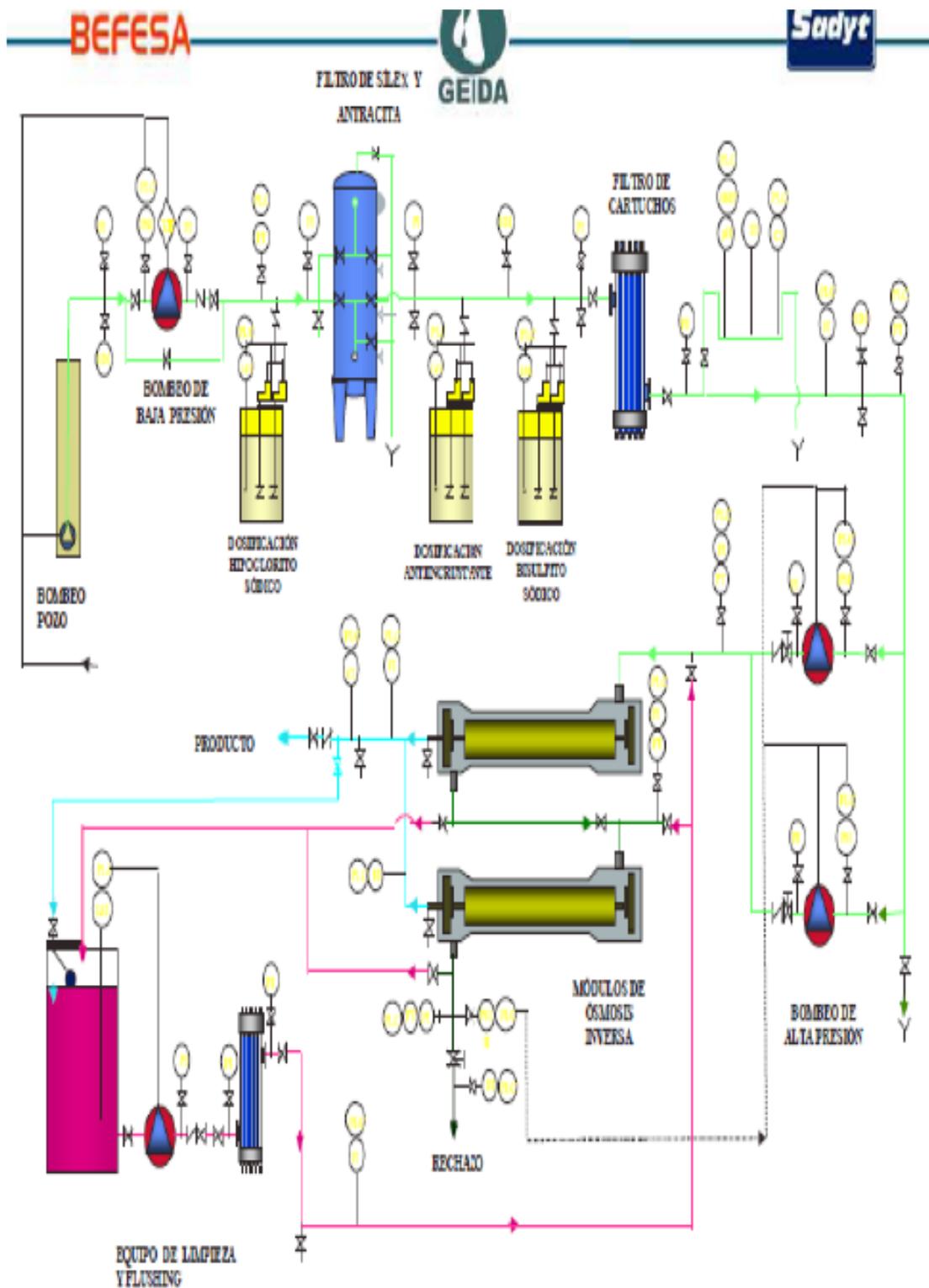


Figure 3.8.10 : filtres à sables et anthracite (Station de dessalement-Honaïne)



▪ **Filtration à cartouche :**

C'est une microfiltration assurée par des cartouches en polypropylène de 25 micron et d'un diamètre de 61mm, dans des réservoirs métalliques en position verticale (**Figure 3.8.7**).

Son rôle est la protection des pompes à haute pression, contrairement aux filtres à sable et anthracite. Ces filtres sont renouvelés périodiquement après 171 jours d'utilisation.²¹

²¹ [CHENAOUI B., 2010] « Dessalement de l'eau de mer à la station de MAINIS et son impact sur l'environnement. » Séminaire Ouargla. Université de Chlef.

Figure 3.8.11 : filtres à cartouches au niveau de la station (Station de dessalement-Honaïne)



c. Réservoir d'eau filtrée :

L'eau filtrée produite est stockée dans un réservoir fermé. Cette eau, à partir de ce réservoir, est utilisée pour alimenter les unités d'osmose inverse ; une autre partie est utilisée pour le rinçage et le nettoyage des filtres à sable. Ces derniers subissent l'accumulation des matières solides qui provoquent une augmentation de la résistance à l'écoulement ainsi que la diminution de la production d'eau filtrée. Un barbotage avec l'air est introduit afin d'améliorer l'efficacité du lavage par inversion du flux de bas en haut.²²

²² [HACHEMAOUI B., 2014] « Qualité physico-chimique de l'eau dessalée et traitée par la station de dessalement de l'eau de mer de Souk Tlata - teneurs en bore, nitrites, nitrates et métaux lourds-. » Mémoire Pour l'obtention du Diplôme de Master Option Alimentation et Nutrition. Université Abou Bakr BELKAID, Tlemcen. p91.

3.3. Phase de procédé de dessalement :

La phase d'osmose inverse est la partie principale de la station Elle est constituée par 10 lignes dénommées Rack. Chaque ligne est composée de :

- Châssis à membranes.
- Une pompe à haute pression.
- Pompe de recirculation.
- Système d'Echange de Pression.

La capacité de production nominale de chacune unité est de 20300 m³/jour. Chaque unité comprend 222 modules à 7 éléments du type SWC5 Max de Hydranautics.²³

Figure 3.8.12: Photo du bloc d'osmose inverse



3.4. Phase de reminéralisations (post traitement) :

L'eau osmosée provenant des bâtis des membranes est traitée avec de l'anhydride carbonique (CO₂) et des tours de calcite. Le CO₂ est emmagasiné sous forme liquide dans des tanks isolés, à -20 °C. À partir d'un tank, le CO₂ est vaporisé par quatre évaporateurs électriques. Deux pompes de 100 m³/h effectuent une aspiration du collecteur d'eau du perméat, à la sortie des racks d'osmose inverse. Les pompes refoulent l'eau à travers des réservoirs de mélange, dans les réservoirs de mélange de CO₂ vaporisé. Après ajustement du pH de l'eau avec du CO₂, l'eau est amenée aux colonnes de calcites.²⁴

²³ [I. ALLAM.2012].

²⁴ [I. ALLAM.2012].

3.5. Pompage de l'eau dessalée :

Il est utilisé 11 pompes pour refouler l'eau de mer dessalée à partir du réservoir d'un réservoir de stockage de 5000 m³ existant dans la station. Onze pompes de refoulement, dont une est en réserve, et d'une capacité de pompage de 833 m³/h chacune est installées. Les pompes effectuent leur aspiration au sein du réservoir de stockage.²⁵

4. Conclusion :

La ville Honaine est située à mi-distance entre les deux sites de Ghazaouet et de Béni-Saf, à une altitude de 15 m. Ses coordonnées Lambert sont : 35° 10' latitude Nord et 1°39' longitude ouest. Cette ville historique se situe à 69 Km du Chef-lieu de la wilaya de Tlemcen. Honaine se trouve dans une petite baie à 52 Km de la frontière Algéro-Marocaine. La station de dessalement de l'eau de mer à Honaine constitue l'un des plus grands projets réalisés par le gouvernement algérien en matière d'approvisionnement en eau potable, elle présente un moyen industriel fiable de production d'eau douce pour la wilaya de Tlemcen.

²⁵ [I. ALLAM.2012].

CHAPITRE 09 :

APPLICATION DES METHODES PROMETHEE ET LE LOGICIEL VISUAL-PROMETHEE.

- 1. Introduction.**
- 2. Complexités dans la sélection de la technologie de dessalement.**
- 3. Contexte de décision : identification des alternatives et critères de décision.**
 - 3.1. Identification des alternatives.**
 - 3.2. Les principaux critères d'évaluation : Critères de choix d'un procédé de dessalement.**
- 4. Collecte des données et matrice dévaluation.**
- 5. Application de PROMETHEE sur les procédés de dessalement.**
 - 5.1. Estimation des poids des critères.**
 - 5.2. Fonction de préférence pour chaque critère.**
 - 5.3. Implémentation de PROMETHEE : Application du logiciel *Visual-Promethee 1.4 Academic Edition*.**
 - 5.3.1. Les poids des critères.**
 - 5.3.2. Les flux de préférences Φ^+ Φ^- Φ .**
 - 5.3.2. Classement partiel du Visual PROMETHEE 1.4 Academic Edition.**
 - 5.3.3. Classement complet du Visual PROMETHEE 1.4 Academic Edition.**
 - 5.3.4. Diamant PROMETHEE.**
 - 5.3.5. Graphe PROMETHEE.**
 - 5.3.6. Arc-en-ciel PROMETHEE.**
 - 5.3.7. Analyse de performance Efficacité.**
 - 5.3.8. Le plan GAIA.**
 - 5.4. Discussion des résultats.**
 - 5.5. Analyse de sensibilité.**
- 6. Conclusion.**

1. Introduction :

En Algérie, à l'exception de l'unité d'Arzew qui fonctionne avec le procédé multi flash (MSF) pour une production de 90 000 m³/j et d'une puissance électrique de 320 Mégawatts, toutes les autres stations programmées seront réalisées avec le procédé d'osmose inverse (RO). Ce procédé est moins coûteux en investissement que le MSF, consomme moins d'énergie et est préconisé dans les sites où il n'y a pas besoin de production d'énergie électrique en parallèle.²⁶

La méthode PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation), classe les « actions », du meilleur au moins bon compte tenu de l'ensemble de tous les critères pris en considération et non par critère pris de façon isolée, et relève de la problématique γ (classement des actions les unes par rapport aux autres).

Nous utiliserons cette méthode pour voir si elle peut déjà donner une indication de ce que peut être l'affectation dans les catégories, c'est-à-dire si les meilleures actions classées sur l'ensemble des critères pertinents retenus sont aussi celles qui seront dans la catégorie la meilleure. Bien plus nous pourrons nous servir de PROMETHEE comme méthode multicritère alternative pour confirmer sinon, faciliter la lecture des résultats à obtenir par l'évaluation partielle. Pour ce faire nous aurons recours au logiciel **Visual- PROMETHEE** qui combine PROMETHEE et la représentation graphique GAIA qui nous permettra de ressortir la bonne décision.

2. Complexités dans la sélection de la technologie de dessalement :

Dans le chapitre 03 partie 02 ont été exposés les différents procédés de dessalement de l'eau de mer ou de l'eau saumâtre. Cependant il est important de préciser que seules certaines techniques bénéficient d'une utilisation à grande échelle. On peut retenir entre autres les méthodes de distillation (multiple effets, flash, compression de vapeur) et les techniques membranaires (l'osmose inverse). Les techniques de distillation représentent 31 % des installations alors que 63 % utilisent l'osmose inverse. Chacun des procédés de ces deux groupes ci-dessus présente des avantages et des inconvénients qui expliquent le choix d'une technique par rapport à une autre.

3. Contexte de décision : Identification des alternatives et critères de décision :

3.1. Identification des alternatives :

Les responsables de la gestion des ressources en eau au niveau de la wilaya de Tlemcen la station de Honaine ne peuvent accorder le même intérêt aux différents procédés de dessalement :

A1: Multi-flash distillation (Multi Stage Flash) MSF

A2 : Multiple Effets Distillation MED

A3 : Compression de Vapeur (Vapor Compression) VC

A4 : Osmose inverse (Reverse Osmose) RO

A5 : Electro Dialyse ED

²⁶ [Bengueddach.2005].

Et par conséquent ils ne peuvent pas asseoir une pratique commune dans leur prise en Charge et exploitation. Ainsi, ils seraient intéressés par un classement de ces stratégies selon les critères qui représentent parfois des points de vue antagonistes. Une stratégie jugée intéressante pour un critère peut ne pas l'être pour d'autres critères.

Pour pouvoir comparer ces différentes stratégies et déterminer la plus optimale parmi eux, nous avons utilisé la méthode PROMETHEE. Pour ce faire, nous avons fixé un certain nombre de critères et associé un poids ainsi qu'un critère généralisé à chaque critère.

3.2 Les principaux critères d'évaluation : Critères de choix d'un procédé de dessalement

Les facteurs à prendre en compte dans le choix d'un procédé de dessalement sont de quatre ordres :

1. Les critères techniques
2. Les critères économiques
3. Les critères d'évaluation sociaux et comportementaux
4. Les critères environnementaux.

Ces critères possèdent des critères quantitatifs, autres qualitatives, il y a des critères à maximiser et autres à minimiser. Ces critères sont :

- **Les Critères d'évaluation technique :** Parmi les critères techniques se trouvent :
 - **Durée de vie de la technologie.**
 - **Salinité de l'eau produite :** selon l'usage qui en sera fait, elle peut varier de 300 à 500 ppm pour l'approvisionnement en eau potable à 15-30 ppm pour l'alimentation en eau industrielle.
- **Les critères d'évaluation économiques :** Les critères économiques retenus sont les suivants :
 - **Coût de l'investissement :** dépend de sa nature (énergie renouvelable, gaz, fuel) et de sa disponibilité locale (pays importateurs ou producteurs...);
 - **Consommation de l'Energie :** quantité de l'Energie consommées par litre
 - **Coût de la maintenance.**
- **Critères d'évaluation sociaux et comportementaux :**
 - **Degré de complexité :** Compétence requise pour l'opération.
 - **Acceptation de la technologie du dessalement :** facilite d'acceptation de la technologie de dessalement.
- **Critères d'évaluation environnementaux :**

- **Degré d'utilisation de l'énergie verte** : Niveau ou étendue de l'utilisation de l'énergie verte. Ce critère a été longuement délaissé pour ne pas dire complètement négligé, il s'agit là de l'aspect environnemental (écologique, climatique... etc.).

Tableau 3.9.1 : les critères d'évaluation avec leurs natures et unités.

Groupes	Critères	Notation	Genre	Unités	Max / Min
Critères techniques	Durée de vie de la technologie	C1	Quantitative	Années	Max
	Salinité de l'eau produite	C2	Quantitative	PPM	Min
Critères économiques	Coût de l'investissement	C3	Quantitative	Unit/l	Min
	Coût de la maintenance	C4	Quantitative	Unit/l	Min
	Consommation de l'Energie	C5	Quantitative	KWh/m ³	Min
Critères sociaux et comportementaux	Dégré de complexité	C6	Qualitative	-	Min
	Acceptation de la technologie du dessalement	C7	Qualitative	-	Max
Critères environnementaux	Degré d'utilisation de l'énergie verte	C8	Qualitative	-	Max

4. Collecte des données et matrice dévaluation :

Avant de procéder à l'analyse multicritère par PROMETHEE, nous essayerons de compléter notre tableau d'évaluation.

Le tableau d'évaluation (matrice de jugement) est le modèle général dévaluation multicritère représente le cadre formel qui permet l'analyse logique et transparente du processus qui doit nous conduire à une décision.

A l'achèvement de ce tableau (voir tableau 3.9.2) le décideur aura acquis une meilleure connaissance de tous les paramètres nécessaires pour une utilisation juste et efficace.

Tableau 3.9.2 : Données des différentes techniques de dessalement de l'eau de mer (Tableau d'évaluation)

	Multi-stage flash MSF (A ₁)	Multiple effets distillation MED (A ₂)	Compression de vapeur VC (A ₃)	Osmose inverse RO (A ₄)	Électrodialyse ED (A ₅)
C1 : durée de vie de la technologie	25	25	10	5	10
C2 : salinité de l'eau produite	10	10	10	350	350
C3 : cout de l'investissement	2000	1800	1700	500	328
C4 : cout de la maintenance	5	1.53	1.73	0.75	0.2
C5 : Consommation de l'Energie	83.33	61.11	20	3	0.6
C6 : degré de complexité	9	8	7	5	3
C7 : Acceptation de la technologie du dessalement	4	4	2	5	4.5
C8 : Degré d'utilisation de l'Energie verte	2	2	2	3	3

Source : Station de dessalement de Honaine.

Partant de cette matrice, la méthode PROMETHEE procède à une comparaison de toutes les alternatives deux à deux et aboutit au classement final de ces alternatives tant sous la forme d'une matrice numérique que d'une représentation graphique.

5. Choix et justification de la méthode de résolution :

Notons tout d'abord que la phase du choix des méthodes multicritères pour la résolution d'un problème n'est pas indépendante de la phase modélisation. On a vu précédemment que les méthodes d'aide à la décision multicritères sont subdivisées en trois grandes familles. La théorie de l'utilité multi-attribut, les méthodes de surclassement, les méthodes interactives.

Les méthodes de surclassement reposent sur l'utilisation de la relation de surclassement. Leur intérêt dépend de la possibilité pour le décideur d'examiner l'ensemble des relations de surclassement entre les différentes actions pour lui laisser la possibilité d'explorer et de résoudre ces zones de contradictions et de conflits. Le principe des méthodes multi-attribut, consiste en l'agrégation des différents critères et actions en une seule fonction représentative des préférences du décideur. Donc, la structure de préférence correspondante est un préordre ou un ordre total. Par conséquent, l'incomparabilité n'est pas admise (ou assimilée à l'indifférence). Il est également utile de remarquer que dans une problématique de rangement, le résultat final est un préordre. Les méthodes interactives se trouvent entre les deux approches précédentes. Elles sont développées pour résoudre les problèmes de choix. Par la suite, les méthodes interactives sont à exclure pour traiter notre problème, du fait qu'il est posé en termes de problématique de rangement. Reste les deux autres familles des méthodes multicritères, à savoir : qui conviennent à notre problème, et qui ont fait l'objet de plusieurs applications pratiques.

Notre choix s'est porté sur la méthode PROMETHEE I et II qui appartiennent à la famille des méthodes de surclassement, que nous avons présentées dans le chapitre 3. Ces dernières ont été retenus, et ce, pour des raisons principales. Ils sont simples à exploiter et présentent l'avantage d'être facilement comprises par le décideur. Elles permettent de répondre à une problématique en termes de procédure de classement. Ainsi, nous pouvons répondre à la question relative à la décision d'intégrer tel ou tel procédés.

6. Application de PROMETHEE sur les procédés de dessalement :

PROMETHEE propose deux variantes : l'une permet de construire une relation de préordre partiel sur les alternatives (PROMETHEE I), l'autre utilise cette base pour construire un préordre complet (PROMETHEE II).

On va procéder comme suit :²⁷

1. Choisir pour chaque critère une fonction d'intensité de préférence ; justifier choix et seuils.
2. Observer les matrices de préférences : $P_j(a ; b)$ pour chaque critère, la matrice des indices de préférence agrégés.
3. Les flux entrants et sortants.
4. Expliciter la relation de pré-ordre partiel selon **PROMETHEE I**. Dessiner le graphe de cette relation (il est possible de le représenter de façon compacte du fait qu'il ne comporte pas de boucle).

²⁷ [Mohamed Mammeri,2013].

5. Expliciter le préordre total selon **PROMETHEE II**.

On a 08 critères et 05 actions :

▪ Les actions :

A1: MSF (Multi stage flash)

A2 : MED (Multiple effets distillation)

A3 : VC (Compression de vapeur)

A4 : RO (Osmose inverse)

A5 : ED (Electrodialyse).

▪ Et les critères :

C1 : durée de vie de la technologie

C2 : salinité de l'eau produite

C3 : cout de l'investissement

C4 : cout de la maintenance

C5 : Consommation de l'Energie

C6 : degré de complexité

C7 : Acceptation de la technologie du dessalement

C8 : Degré d'utilisation de l'Energie verte.

Et la matrice d'évaluation est comme suit :

Tableau 3.9.3 : Matrice d'évaluation

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
A1	25	10	2000	5	83.33	9	4	2
A2	25	10	1800	1.53	61.11	8	4	2
A3	10	10	1700	1.73	20	7	2	2
A4	5	350	500	0.75	3	5	5	3
A5	10	350	328	0.2	0.6	3	4.5	3

6.1. Estimation des poids des critères :

Pour l'analyse des alternatives par rapport aux critères, importance relative des critères les uns par rapport aux autres doit être calculé. Dans ce travail, la comparaison par paire de chaque critère a été faite par trois décideurs et les valeurs moyennes de leurs réponses ont été tabulé dans le **(tableau 3.9.4)**.

- **C1 : Durée de vie de la technologie : 10%**
- **C2 : Salinité de l'eau produite :15%**
- **C3 : Coût de l'investissement :20%**
- **C4 : Coût de la maintenance :10%**
- **C5 : consommation de l'énergie :20%**
- **C6 : Degré de complexité :15%**
- **C7 : Acceptation de la technologie du dessalement :5%**
- **C8 : Degré de l'utilisation de l'énergie verte : 5 %.**

Ces valeurs ont été représentées dans le **(tableau 3.9.4)**.

Tableau 3.9.4 : Poids de chaque critère.

Critères	Poids	Poids
C1: Durée de vie de la technologie	0.100	10%
C2: Salinité de l'eau produite	0.150	15%
C3: Cout de l'investissement	0.20	20%
C4: Cout de la maintenance.	0.10	10%
C5: Consommation de l'Energie	0.20	20%
C6: Degré de complexité	0.150	15%
C7: Acceptation de la technologie du dessalement	0.05	5%
C8: Degré d'utilisation de l'Energie verte.	0.05	5%

6.2. Fonction de préférence pour chaque critère :

➤ **Critère 1 : Durée de vie de la technologie :**

Tableau 3.9.5 : Unité de mesure du critère 01

Durée de vie de la technologie	
La technologie	Unités (Années)
A1 : MSF (Multi stage flash)	25
A2 : MED (Multiple effets distillation)	25
A3 : VC (Vapor Compression)	10
A4 : RO (Reverse Osmose)	5
A5 : ED (Electrodialyse)	10

Tableau 3.9.6 : Informations sur critère 01

Le poids	10%
Type de critère	Critère Usuel
Seuil de préférence	Pas de paramètres
Genre de critère	Maximum

➤ **Critère 2 : Salinité de l'eau produite :**

Tableau 3.9.7 : Unité de mesure du critère 02

Salinité de l'eau produite	
La technologie	Unités (PPM)
A1 : MSF (Multi stage flash)	10
A2: MED (Multiple effets distillation)	10
A3 : VC (Compression de vapeur)	10
A4 : RO (Osmose inverse)	350
A5 : ED (Electrodialyse)	350

Tableau 3.9.8 : Informations sur critère 02

Le poids	15 %
Type de fonction de préférence	Critère Usuel
Seuil de préférence	Pas de paramètres
Type de critère	Min

➤ Critère 3 : Cout de l'investissement :

Tableau 3.9.9 : Unité de mesure du critère 03

Cout de l'investissement	
La technologie	Unite/litre
A1 : MSF (Multi stage flash)	2000
A2 : MED (Multiple effets distillation)	1800
A3 : VC (Compression de vapeur)	1700
A4 : RO (Osmose inverse)	500
A5 : ED (Electrodialyse)	328

Tableau 3.9.10 : Informations sur critère 03

Le poids	20 %
Type de fonction de préférence	Critère Usuel
Seuil de préférence	Pas de paramètres
Type de critère	Min

➤ Critère 4 : cout de la maintenance :

Tableau 3.9.11 : Unité de mesure du critère 04

Cout de la maintenance	
La technologie	Unité (Unité / litre)
A1 : MSF (Multi stage flash)	5
A2 : MED (Multiple effets distillation)	1.53
A3 : VC (Compression de vapeur)	1.73
A4 : RO (Osmose inverse)	0.75
A5 : ED (Electrodialyse)	0.2

Tableau 3.9.12 : Informations sur critère 04

Le poids	10 %
Type de fonction de préférence	Critère Usuel
Seuil de préférence	Pas de paramètres
Type de critère	Min

➤ **Critère 5 : Consommation de l'Energie :**

Tableau 3.9.13 : Unité de mesure du critère 05

Consommation de l'Energie	
La technologie	Unite (Kwh / m³)
A1 : MSF (Multi stage flash)	83.33
A2 : MED (Multiple effets distillation)	61.11
A3 : VC (Compression de vapeur)	20
A4 : RO (Osmose inverse)	3
A5 : ED (Electrodialyse)	0.6

Tableau 3.9.14 : Informations sur critère 05

Le poids	20 %
Type de fonction de préférence	Critère Usuel
Seuil de préférence	Pas de paramètres
Type de critère	Min

➤ Critère 6 : degré de complexité :

Tableau 3.9.15 : Unité de mesure du critère 06

Degré de complexité	
La technologie	Unité (points)
A1: MSF (Multi stage flash)	9
A2 : MED (Multiple effets distillation)	8
A3 : VC (Compression de vapeur)	7
A4 : RO (Osmose inverse)	5
A5 : ED (Electrodialyse)	3

Tableau 3.9.16 : Informations sur critère 06

Le poids	15%
Type de fonction de préférence	Critère Usuel
Seuil de préférence	Pas de paramètres
Type de critère	Minimum

➤ Critère 7 : Acceptation de la technologie du dessalement :

Tableau 3.9.17 : Unité de mesure du critère 07

Degré de complexité	
La technologie	Unité (points)
A1 : MSF (Multi stage flash)	4
A2 : MED (Multiple effets distillation)	4
A3 : VC (Compression de vapeur)	2
A4 : RO (Osmose inverse)	5
A5 : ED (Electrodialyse)	4.5

Tableau 3.9.18 : Informations sur critère 07.

Le poids	5 %
Type de fonction de préférence	Quasi-critère
Seuil d'indifférence	Q=50%
Type de critère	Maximum

➤ Critère 8 : Degré d'utilisation de l'Energie verte :

Tableau 3.9.19 : Unité de mesure du critère 08

Degré de complexité	
La technologie	Unité (points)
A1: MSF (Multi-stage flash)	2
A2 : MED (Multiple effets distillation)	2
A3 : VC (Compression de vapeur)	2
A4 : RO (Osmose inverse)	3
A5 : ED (Electrodialyse)	3

Tableau 3.9.20 : Informations sur critère 08.

Le poids	5 %
Type de fonction de préférence	Critère a paliers
Seuil d'indifférence	Q=0.25
Seuil de préférence	P=0.5
Type de critère	Max

Dans l'aide à la décision multicritères l'évaluation des données joue un rôle crucial. Le tableau de performance, les pondérations de critères, le type et les paramètres des fonctions de préférences sont autant d'éléments fortement liés aux résultats obtenus par l'application d'une méthode multicritère.

6.3. Implémentation du Visual PROMETHEE :

6.3.1. Le logiciel Visual PROMETHEE :

Visual PROMETHEE est la dernière et la plus complète implémentation logicielle du logiciel Méthodes d'aide à la décision multicritère (MCDA) PROMETHEE et GAIA.

Visual PROMETHEE est développé par VPSolutions sous la supervision du professeur Bertrand Mareschal de la Solvay Brussels School of Economics and Management de l'Université Libre de Bruxelles (ULB).

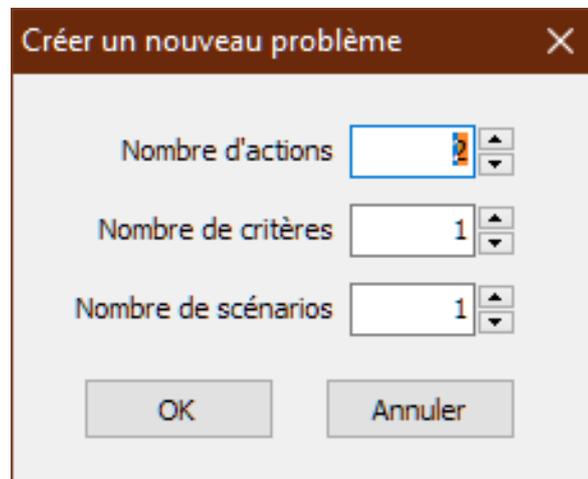
Le professeur Bertrand Mareschal a développé et applique les méthodes PROMETHEE et GAIA pour 30 ans à côté du professeur Jean-Pierre Brans aux universités ULB et VUB de Bruxelles.

Avec Visual PROMETHEE, vous pouvez partager l'expertise d'un expert mondial dans le domaine des multicritères d'aide à la décision et de l'un des auteurs originaux des méthodes PROMETHEE et GAIA.

6.3.2. Application du logiciel Visual-Promethee 1.4 Academic Edition :

Pour l'implémentation de la méthode PROMETHEE, nous utilisons le logiciel online Visual PROMETHEE²⁸, en spécifiant tout d'abord la table de performances (**Figure 3.3.1**), où chaque technique est évaluée suivant les 08 critères de Production, Coût et fiabilité. A partir des valeurs estimées précédemment de F et G, chaque critère est évalué suivant sa criticité $C = F \times G$ donnant ainsi un scénario de base.

Figure 3.9.1 : Fenêtre de création d'un nouveau problème.



Source: Visual PROMETHEE 1.4 Academic Edition.

Cette fenêtre nous demande le nombre d'actions utilisés, dans notre étude, ces actions sont montrées par les techniques de dessalement de l'eau de mer, son nombre est 05, et les critères utilisés pour le choix de la meilleure technique de dessalement dans la station de dessalement de Honaine wilaya de Tlemcen, le nombre ces critères est 08.

²⁸ <https://www.promethee-gaia.net/academic-edition.html>.

PARTIE 03 : SELECTION D'UN PROCEDE DE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER AVEC PROMETHEE : Etude de cas.

Après remplir la matrice d'évaluation dans le logiciel *Visual Promethee* avec le type de chaque critère, son poids, les types de fonction de préférence ainsi que les Seuils de préférence et les seuils d'indifférences pour chaque critère, on obtient une fenêtre suivante :

Figure 3.9.2 : Fenêtre de Visual-Promethee après remplir la matrice d'évaluation.

The screenshot shows the 'Visual PROMETHEE Academic' software window. The main area displays a table for 'Scénario1' with columns for various criteria and their values. The table is organized into sections: 'Préférences', 'Statistiques', and 'Evaluations'.

	<input checked="" type="checkbox"/>						
Scénario1	Durée de vie	Salinité de l'e...	Cout de l'inv...	Cout de la m...	Consommati...	Degré de co...	Acceptat
Unité	Années	PPM	Unit/l	Unit/l	KWh/m3	points	
Cluster/Groupe	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Préférences							
Min/Max	max	min	min	min	min	min	
Poids	10,00	15,00	20,00	10,00	20,00	15,00	
Fn. de préférence	Usuel	Usuel	Usuel	Usuel	Usuel	Usuel	Forme
Seuils	absolu	absolu	absolu	absolu	absolu	absolu	
- Q: Indifférence	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	
- P: Préférence	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	
- S: Gaussien	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	
Statistiques							
Minimum	5,00	10,00	328,00	0,20	0,60	3,00	
Maximum	25,00	350,00	2000,00	5,00	83,33	9,00	
Moyenne	15,00	146,00	1265,60	1,84	33,61	6,40	
Ecart-type	8,37	166,57	704,11	1,67	32,99	2,15	
Evaluations							
<input checked="" type="checkbox"/>	Multi-stage Flash	25,00	10,00	2000,00	5,00	83,33	9,00
<input checked="" type="checkbox"/>	Multiple Effets d...	25,00	10,00	1800,00	1,53	61,11	8,00
<input checked="" type="checkbox"/>	Compression de ...	10,00	10,00	1700,00	1,73	20,00	7,00

At the bottom of the window, the status bar shows: Actions: 5 (5 active) | Critères: 8 (8 active) | Scénarios: 1 (1 active) | Local.: Belgium [€/€] | Sauvegardé

Source: *Visual PROMETHEE 1.4 Academic Edition*.

Le logiciel *Visual Promethee 1.4 Academic Edition* nous permet d'analyser chaque alternative c'est à dire chaque technique de dessalement séparément avec des schémas et des figures significatifs et plus explicatifs.

6.3.2.1. Les poids des critères :

Les poids des critères adoptés dans notre travail ont été déterminés selon les spécialistes dans le domaine de dessalement de l'eau de mer, c'est-à-dire les décideurs, comme suit :

- C1 : durée de vie de la technologie.
- C2 : salinité de l'eau produite.
- C3 : cout de l'investissement.
- C4 : cout de la maintenance.
- C5 : Consommation de l'Energie.
- C6 : degré de complexité.
- C7 : Acceptation de la technologie du dessalement.
- C8 : Degré d'utilisation de l'Energie verte.

Après remplir les poids des critères, on obtient la fenêtre suivante :

Figure 3.9.3 : Fenêtre des poids des critères

Nom	Mode: %	Lock	Hierarchical Weight
aucun(e)	- 100,0% +	<input type="checkbox"/>	100%
aucun(e)	- 100,0% +	<input type="checkbox"/>	100%
Durée de vie	- 10,0% +	<input type="checkbox"/>	10%
Salinité de l'eau	- 15,0% +	<input type="checkbox"/>	15%
Cout de	- 20,0% +	<input type="checkbox"/>	20%
Cout de la maintenance	- 10,0% +	<input type="checkbox"/>	10%
Consommation de	- 20,0% +	<input type="checkbox"/>	20%
Degré de complexité	- 15,0% +	<input type="checkbox"/>	15%
Acceptation de la	- 5,0% +	<input type="checkbox"/>	5%
Degré de l'utilisation de	- 5,0% +	<input type="checkbox"/>	5%

Hiérarchique Absolu

Source: Visual PROMETHEE 1.4 Academic Edition.

6.3.2.2. Les flux de préférences Φ^+ Φ^- Φ :

Cette répartition est bien entendu liée à la pondération retenue pour les critères. On obtient la fenêtre suivante :

Figure 3.9.4 : Fenêtre des flux positives et négatives et nets

Rang	action		Φ	Φ^+	Φ^-
1	Electro-Dialyse	<input checked="" type="checkbox"/>	0,5625	0,7250	0,1625
2	Osmose Inverse	<input checked="" type="checkbox"/>	0,1875	0,5625	0,3750
3	Compression de vapeur	<input checked="" type="checkbox"/>	-0,0750	0,4000	0,4750
4	Multiple Effets	<input checked="" type="checkbox"/>	-0,1500	0,3500	0,5000
5	Multi-stage Flash	<input checked="" type="checkbox"/>	-0,5250	0,1625	0,6875

Source: Visual PROMETHEE 1.4 Academic Edition.

D'après les résultats montrés dans la **Figure 3.3.5** obtenus par la méthode PROMETHEE :

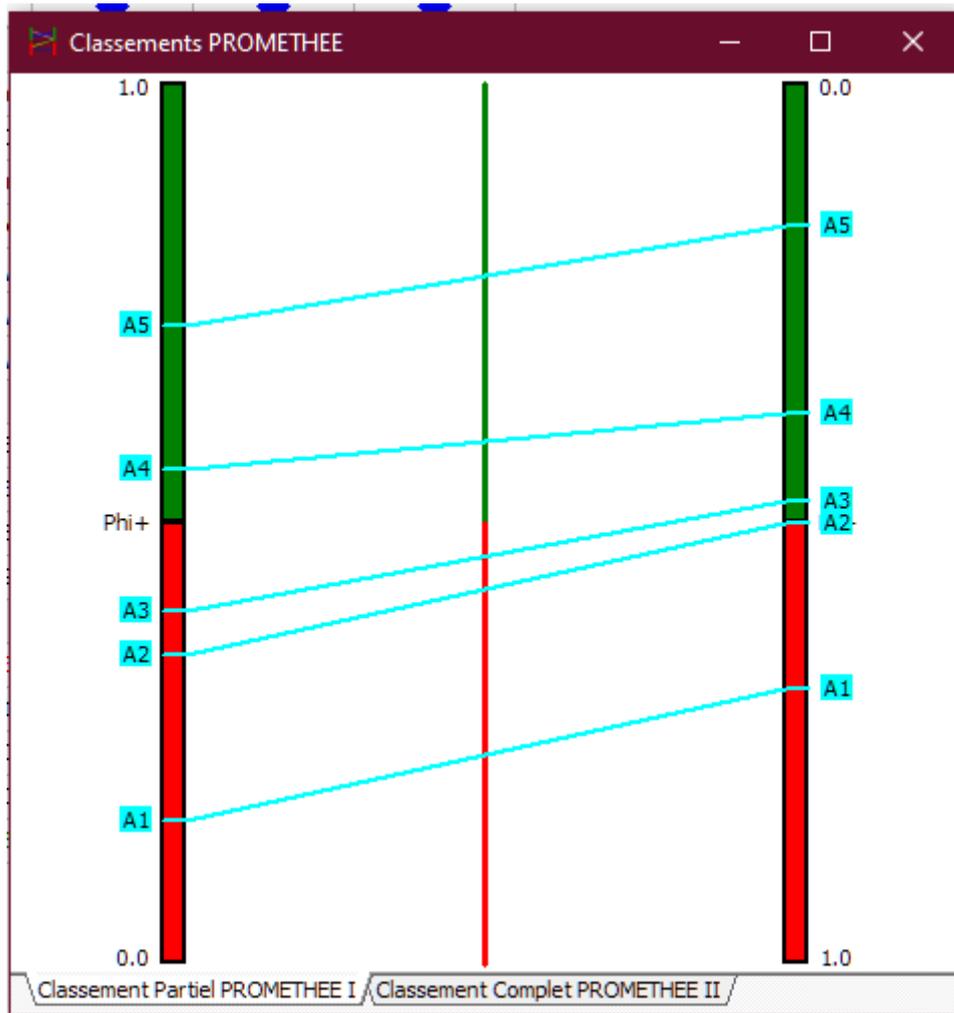
- L'action Electro-Dialyse ED est la plus prioritaire pour le dessalement de l'eau de mer parmi les autres actions avec comme flux positif de $\Phi^+ = 0,7250$, flux négatif de $\Phi^- = 0,1625$ et le flux net de $\Phi = 0,5626$.
- L'action Osmose Inverse OI a été classé la deuxième technique pour le dessalement de l'eau de mer avec un flux positif de $\Phi^+ = 0,5626$, flux négatif de $\Phi^- = 0,3750$ et le flux net de $\Phi = 0,1875$.
- La technique compression de vapeur CV a été classé la troisième avec un flux positif de
 - $\Phi^+ = 0,4000$, flux négatif de $\Phi^- = 0,4750$ et le flux net de $\Phi = - 0,0750$.
- La technique Multi effets distillation MED a été classé la quatrième technique pour le dessalement de l'eau de mer avec un flux positif de $\Phi^+ = 0,3500$, flux négatif de $\Phi^- = 0,5000$ et le flux net de $\Phi = - 0,1500$.
- La technique MSF est la cinquième technique avec un flux positif de $\Phi^+ = 0,1625$, flux négatif de $\Phi^- = 0,6875$ et le flux net de $\Phi = - 0,5250$.

6.3.2.3. Classement partiel du Visual PROMETHEE 1.4 Academic Edition :

Il existe deux classements PROMETHEE calculés :

- Le classement partiel PROMETHEE I est basé sur le calcul de deux flux de préférences (Phi + et Phi-). Cela permet une incomparabilité entre les actions lorsque les flux de préférence Phi + et Phi- donnent classements contradictoires.
- Le classement complet de PROMETHEE II est basé sur le flux de préférences nettes (Phi).

Figure 3.9.5 : Fenêtre du classement partiel de PROMETHEE



Source: Visual PROMETHEE 1.4 Academic Edition.

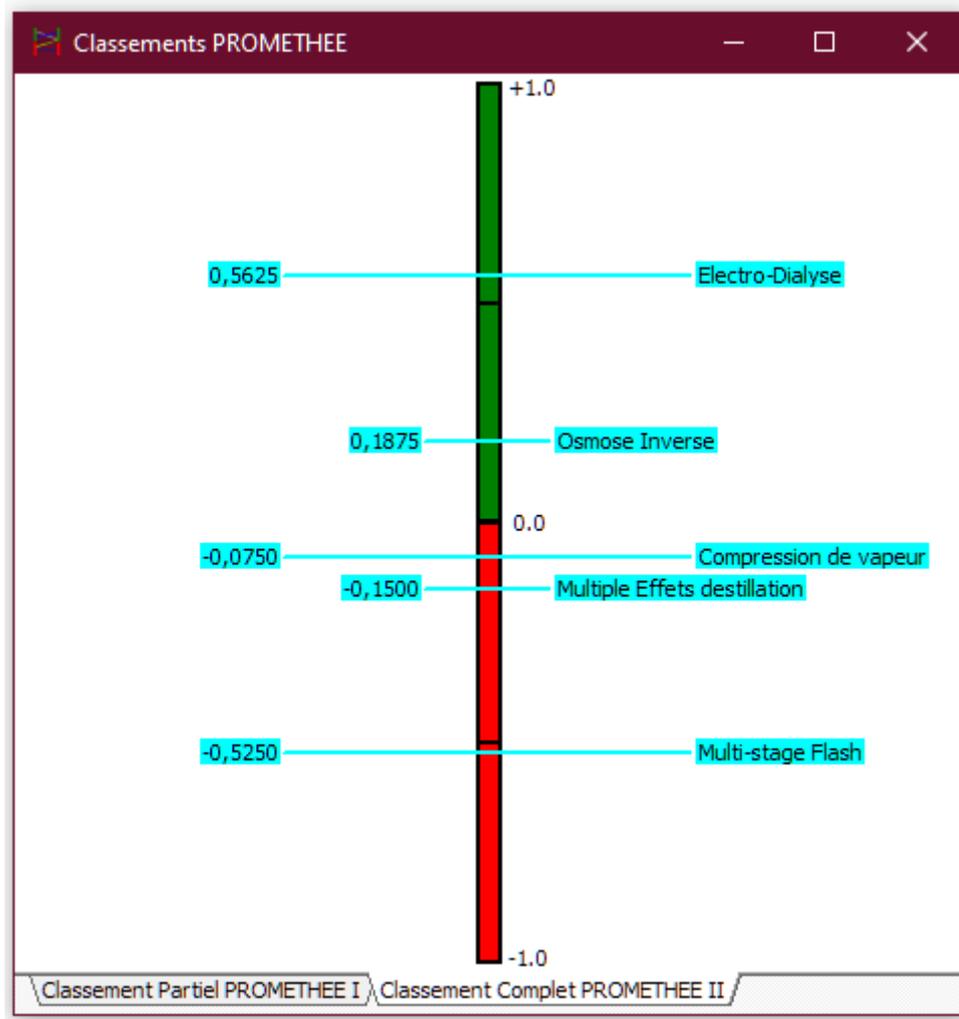
Sur le schéma PROMETHEE I classement partiel (**Figure 3.3.2**) la barre la plus à gauche indique le classement des actions selon Phi + : l'action 5(ED) est en tête, suivi par l'action 4 (RO), l'action 3(VC), l'action 2 (MED), et l'action 1.

A La barre la plus à droite indique le classement selon Phi- : l'action 5(ED) est en tête, suivi par l'action 4 (RO), l'action 3(VC), l'action 2 (MED), et l'action 1.

6.3.2.4. Classement complet du Visual PROMETHEE 1.4 Academic Edition:

La fenêtre du classement complet est représentée comme suit :

Figure 3.9.6 : Fenêtre du classement complet de PROMETHEE



Source: Visual PROMETHEE 1.4 Academic Edition.

Ceci est confirmé par le classement complet de PROMETHEE II, deux groupes d'actions apparaissent clairement :

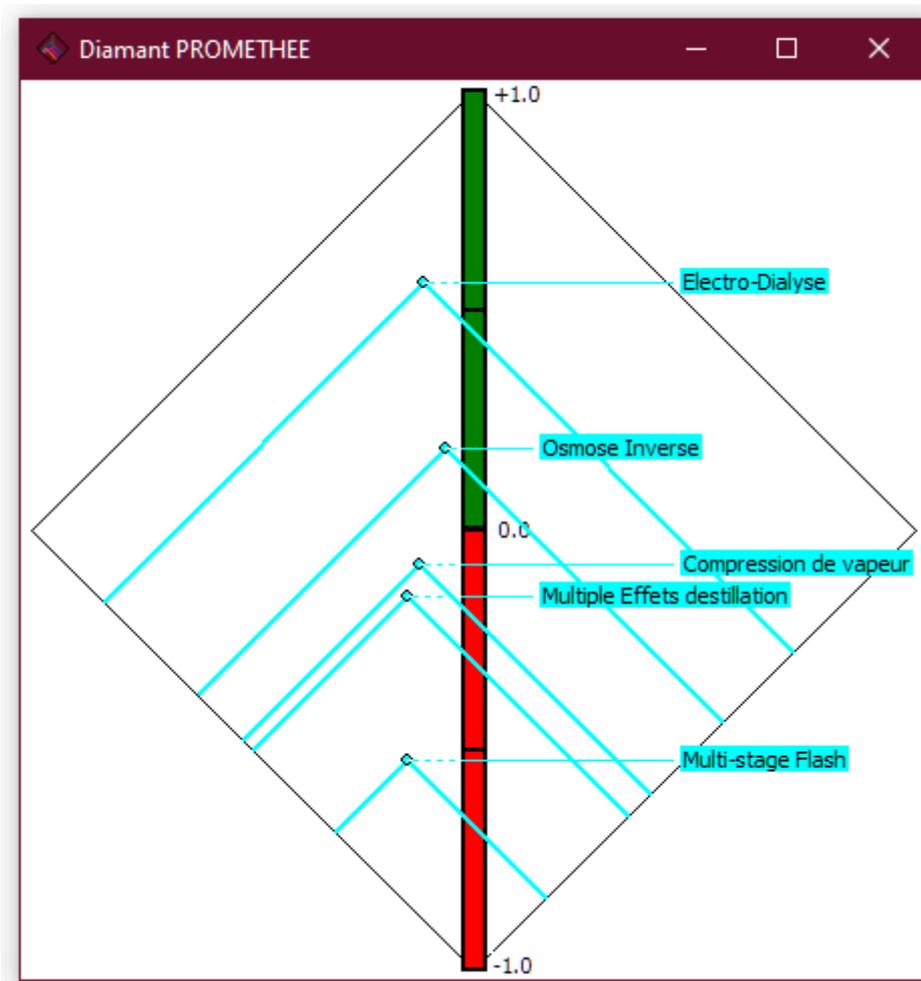
- l'action Electro-Dialyse (ED) a le score Phi le plus élevé.
- l'action Electro-Dialyse (ED) a un score phi positif loin du score Phi de l'action Osmose Inverse (RO).
- l'action compression de vapeur (VC) suivi par l'action multiple effets distillation (MED) qui ont un flux net négatif, et en bas du Classement PROMETHEE II se trouve l'action multi stage Flash (MSF).

Bien que le classement complet de PROMETHEE II soit plus facile à expliquer, il est également moins informatif car les différences entre Phi + et Phi- scores ne sont plus visibles.

6.3.2.5. Diamant PROMETHEE:

Le diamant PROMETHEE est une représentation alternative bidimensionnelle conjointe des deux PROMETHEE I et II classements. Le carré correspond au plan (Phi +, Phi-) où chaque action est représentée par un point. L'avion est incliné à 45 ° de sorte que la dimension verticale donne le débit net de Phi. Les scores Phi + augmentent de gauche à gauche Le coin et Phi- les scores augmentent de gauche à droite.

Figure 3.9.7 : Fenêtre du Diamant PROMETHEE pour les techniques de dessalement.



Source: Visual PROMETHEE 1.4 Academic Edition.

Pour chaque action, un cône est tiré de la position de l'action dans le plan.

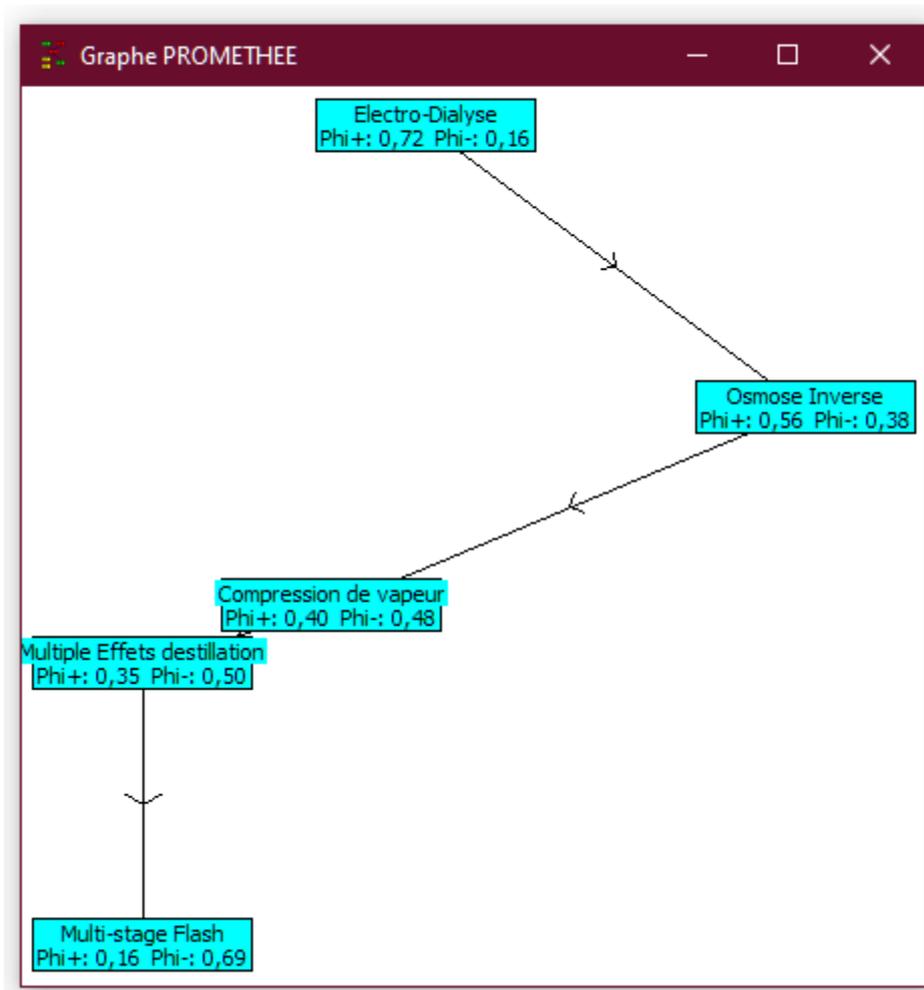
Comme le cône l'action Electro-Dialyse (ED) recouvre tous les autres, cette action est préférée à toutes les autres du PROMETHEE I classement partiel.

L'avantage du PROMETHEE Diamond est qu'il est facile de visualiser la proximité entre Phi + et Phi- scores globalement.

6.3.2.6. Graphe PROMETHEE:

Le réseau PROMETHEE représentation de la partielle PROMETHEE I. Les actions sont représentées par les nœuds et les flèches sont dessinées pour indiquer les préférences. Les incompatibilités sont donc très faciles à détecter.

Figure 3.9.8 : Fenêtre du Graphe PROMETHEE pour les techniques de dessalement.



Source: Visual PROMETHEE 1.4 Academic Edition.

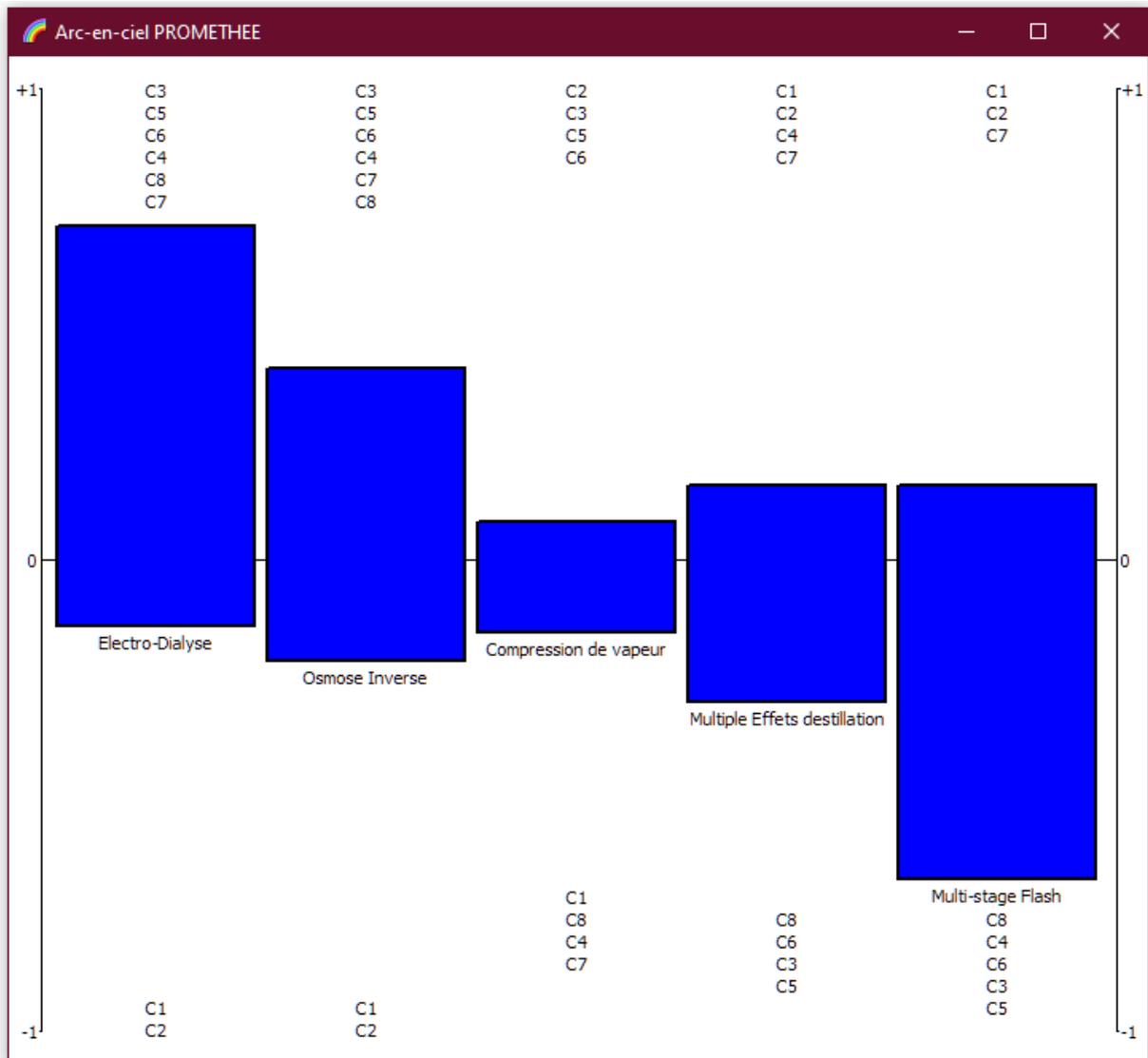
La **Figure 3.9.8** montre le réseau PROMETHEE qui présente le classement partiel de PROMETHEE I.

La technique ED est nettement préférée aux autres techniques, Suivi par la technique RO, et les autres techniques sont en bas du classement.

6.3.2.7. Arc-en-ciel PROMETHEE :

En analysant le graphe arc en ciel de PROMETHEE, nous pourrions voir les composants des flux positif et négatif de chaque action.

Figure 3.9.9 : Fenêtre d'Arc-en-ciel PROMETHEE pour les techniques de dessalement.



Source: Visual PROMETHEE 1.4 Academic Edition.

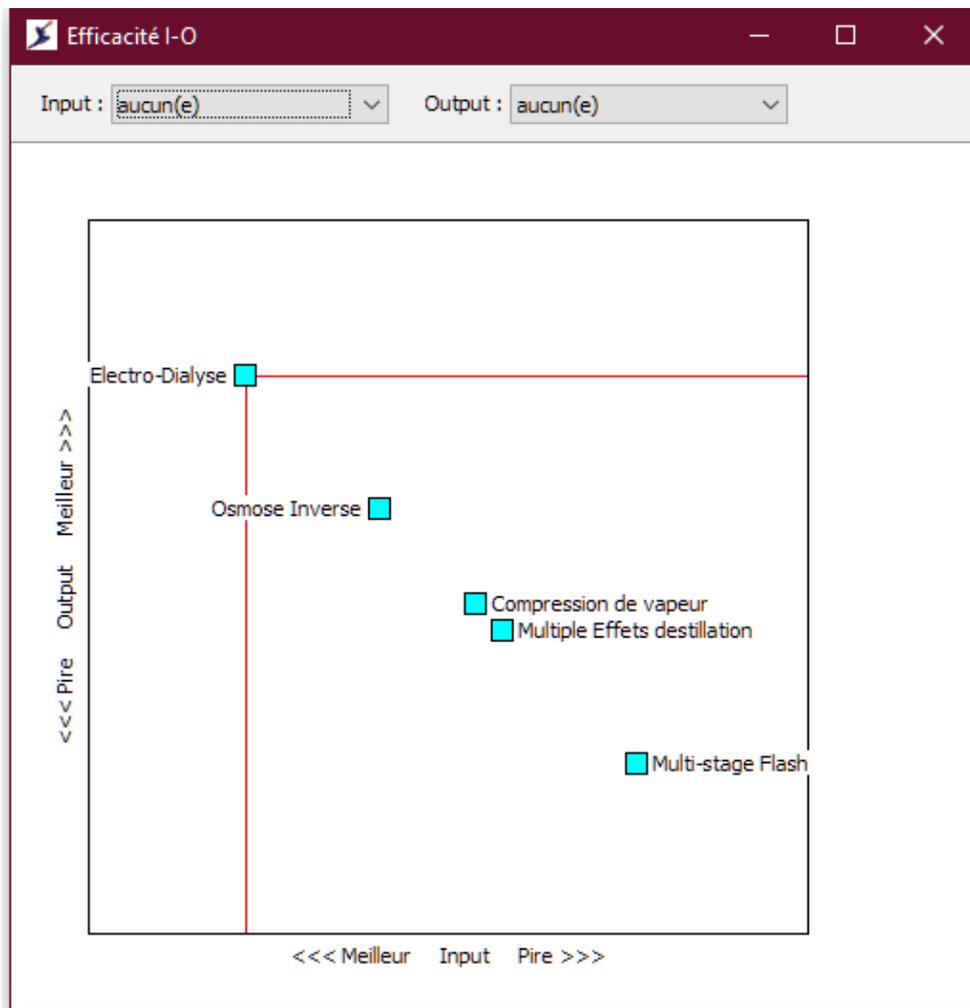
D'après la (Figure 3.9.9) on constate que :

Il paraît évident que l'action Electro-Dialyse (ED) est la solution ayant le Φ^+ le plus élevé. La solution est positive sur les critères économiques (coût de l'investissement C3, coût de la maintenance C4, et consommation de l'énergie C5), les critères sociaux (degré de complexité C6 et acceptation de la technologie de dessalement C7) et le critère environnementale (degré de l'utilisation de l'Energie verte C8).

6.3.2.8. Analyse de performance Efficacité :

Avec l'analyse de performance Efficacité on peut classer les actions meilleures, les actions acceptables et les actions refusées.

Figure 3.9.10 : Fenêtre d'analyse de performance efficacité pour les techniques de dessalement.



Source: Visual PROMETHEE 1.4 Academic Edition.

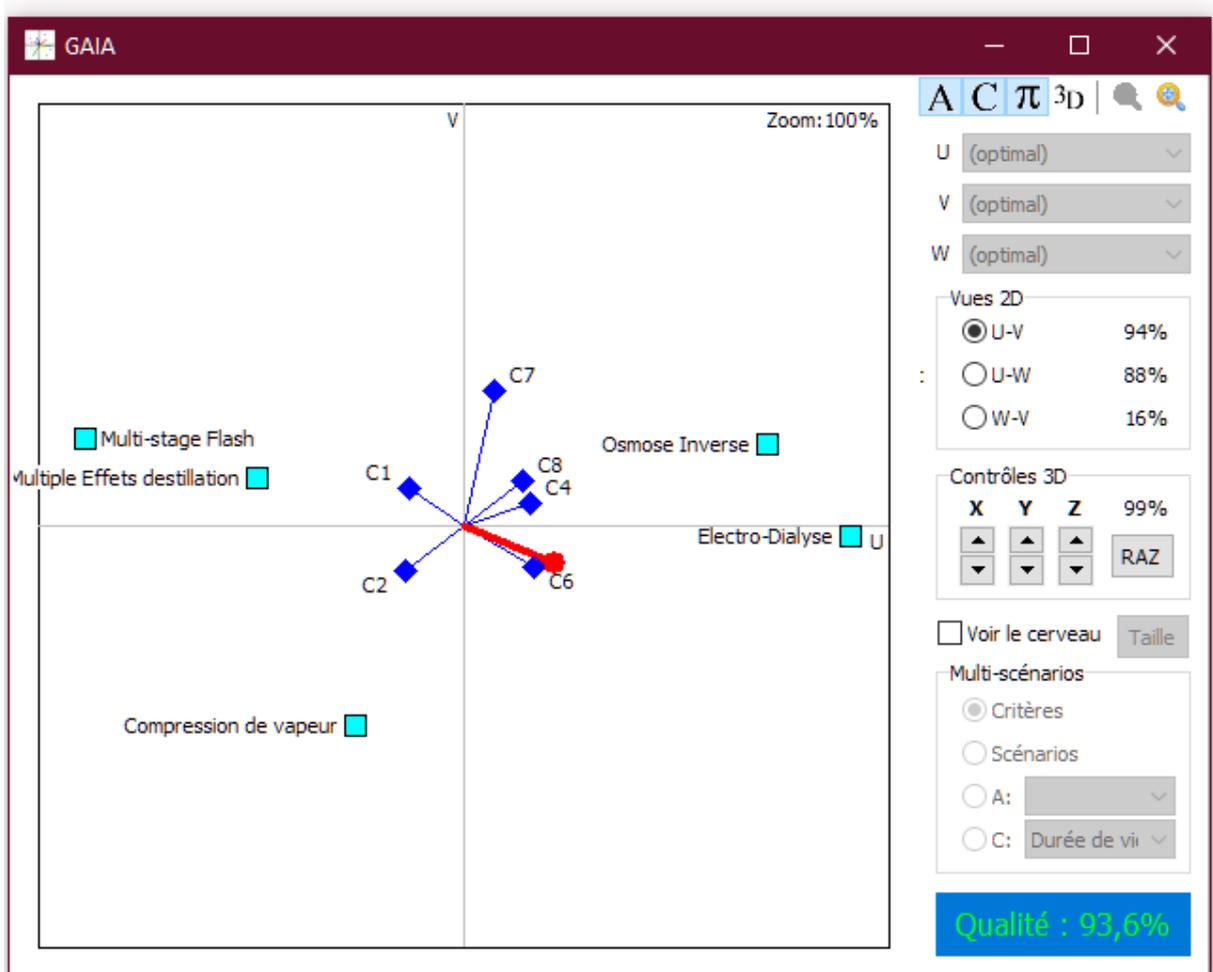
Selon le schéma d'analyse de performance Efficacité (**Figure 3.9.10**) on voit clairement que l'action Electro-Dialyse (ED) et l'action Osmose Inverse (RO) est classées les meilleures, après on trouve les actions compression de vapeur (VC) et multiple effets distillation (MED) comme des techniques acceptables, et à la fin on trouve la technique multi stage Flash (MSF) comme la pire technique de dessalement pour la station de Honaine Tlemcen.

6.3.2.9. Le plan GAIA :

Parmi les schémas les plus significatives on trouve le plan GAIA.

Dans notre travail, on a obtenu le schéma suivant :

Figure 3.9.11: Fenêtre du plan GAIA pour les techniques de dessalement



Source: Visual PROMETHEE 1.4 Academic Edition.

- La qualité du plan GAIA = 93.6 % ce qui nous indique que le plan est bon et acceptable.
- Les actions sont bien dispersées dans le plan.
- Les critères sont assez proches des axes.

En analysant, la répartition des actions et des critères sur le plan nous constatons les points forts et les points faibles des différentes techniques. Les points forts correspondent aux axes pointant dans la direction de la technique. Les points faibles correspondent aux axes pointant dans la direction opposée de la technique.

On trouve alors que :

- l'action A5 (ED) et opposée à l'action A1 (MSF) et A2 (MED).
- l'action A3 (VC) est opposée à l'action A4 (RO).

Dans le plan GAIA, les actions les meilleures au sens du rangement Prométhée II sont représentées par des points situés dans la direction de l'axe de décision π .

La direction du critère C6 (degré de complexité) est dans la même direction de l'action A5 (ED) ce qui nous montre que la technique ED est la meilleure en matière de degré de complexité.

La direction du critère C2 (salinité de l'eau produite) est dans la même direction que l'action A3 (VC) ce qui nous permet à dire que la technique (VC) est la meilleure selon le critère de salinité de l'eau.

La direction des critères C4 et C7 et C8 sont dans la même direction que l'action A4 (RO) ce qui nous emmène à dire que l'action A4 est la meilleure en matière de cout de la maintenance et le critère d'acceptation de la technologie de dessalement et le critère de degré de l'utilisation de l'Energie verte.

La direction du critère C1 (Durée de vie) est dans la même direction que les actions A1 (MSF) et A2 (MED) ce qui nous invite à dire que les techniques MSF et MED sont plus durable que les autres techniques.

On remarque aussi que les deux meilleures actions sont respectivement A5 (ED) et A4 (RO) puisqu'elles dispersent selon la direction de l'axe de décision π .

L'axe de décision π est légèrement orienté vers le quadrant contenant A5 (ED) ce qui montre que (ED) est la meilleure action et prends la première position, résultat confirmé par le graphe PROMETHEE.

Comme complément, les graphes de GAIA Web permettent aussi de visualiser les critères sur lesquelles chaque action peut être priorisée. Il permet aussi de voir les similarités entres les critères.

Le graphe suivant nous montre la position de l'action A5 Electro-Dialyse (ED) :

Figure 3.9.12 : Fenêtre GAIA web pour la technique (ED)



Source: Visual PROMETHEE 1.4 Academic Edition.

L'axe de décision π s'approche très fortement de l'origine. Il semble indiquer l'action A5 (ED) comme étant la meilleure, ce qui, vu le classement Prométhée I et II.

6.3.3. Discussion des résultats :

L'étude des différents schémas obtenus par le logiciel *Visual PROMETHEE 1.4 Academic Edition* conduit aux remarques suivantes :

- Dans notre application, on remarque l'absence du chevauchement entre les actions et les critères ainsi que leurs poids, les résultats sont clairs et faciles à voir, le classement clairement constaté est défini comme suit :

La technique Electro- Dialyse (ED) en première position, la technique Osmose Inverse (RO) en deuxième position, la technique compression de vapeur (VC) en troisième position, la technique Multiple Effets Distillation (MED) en dernier la technique Multi-Stage-Flash (MSF).

- L'absence du chevauchement est causée par l'utilisation des flux de préférence nets dans le classement des techniques, car ces derniers nous montre très clairement la préférence d'une technique par rapport aux autres selon tous les critères utilisés dans notre recherche.

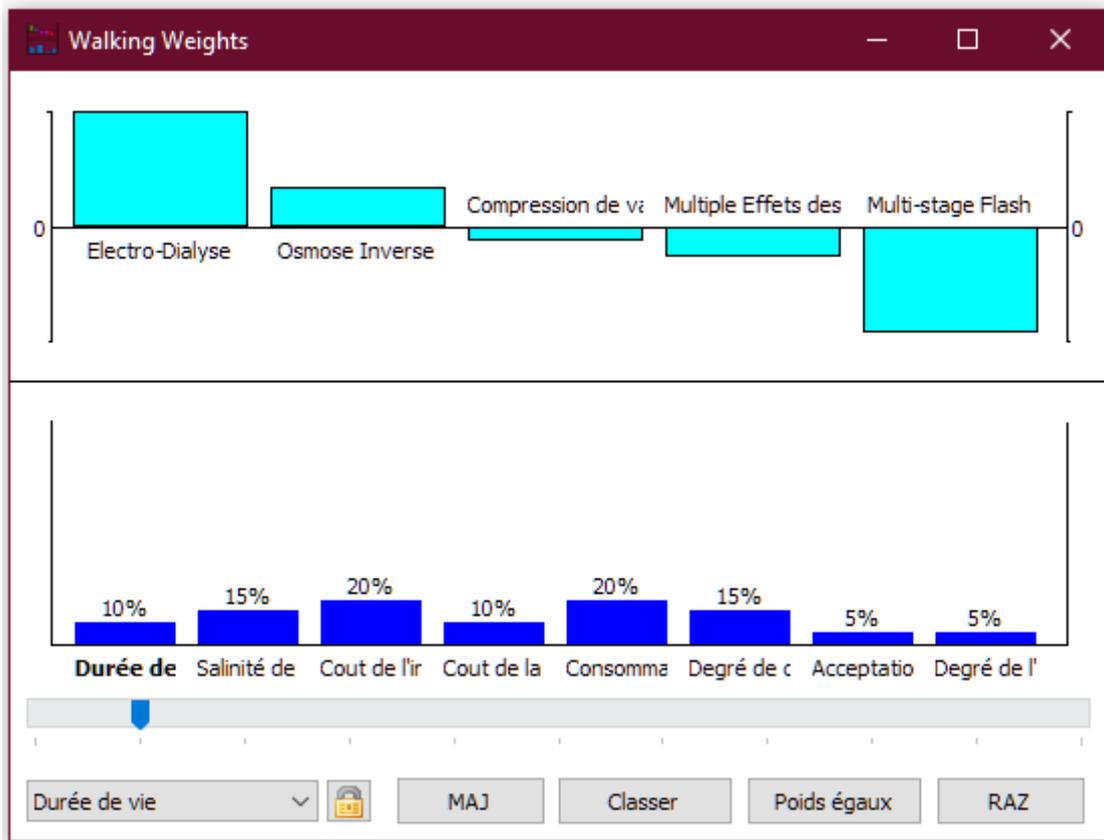
6.3.4. Analyse de sensibilité :

L'analyse de sensibilité est une étape indispensable dans le processus de décision, son but est d'évaluer la stabilité et la validité d'une solution identifiée comme répondant au mieux aux objectifs en vertu de changements dans les paramètres.

Pour l'analyse de sensibilité des poids des critères et les intervalles on utilise la fenêtre *Intervalle de sensibilité* dans le logiciel Visual Promethee, cette dernière nous donne l'intervalle dont lequel on peut ajouter ou diminuer dans le poids du critère en gardant les mêmes résultats de la solution primal.

La (**figure 3.9.10**) nous montre le classement complet des actions : Electro Dialyse (ED), Osmose inverse (RO), compression de la vapeur (VP), la technique multiple effets distillation (MED) et en dernier la technique Multi-stage Flash (MSF).

Figure 3.9.13: Fenêtre de changement des poids [walking weights] .



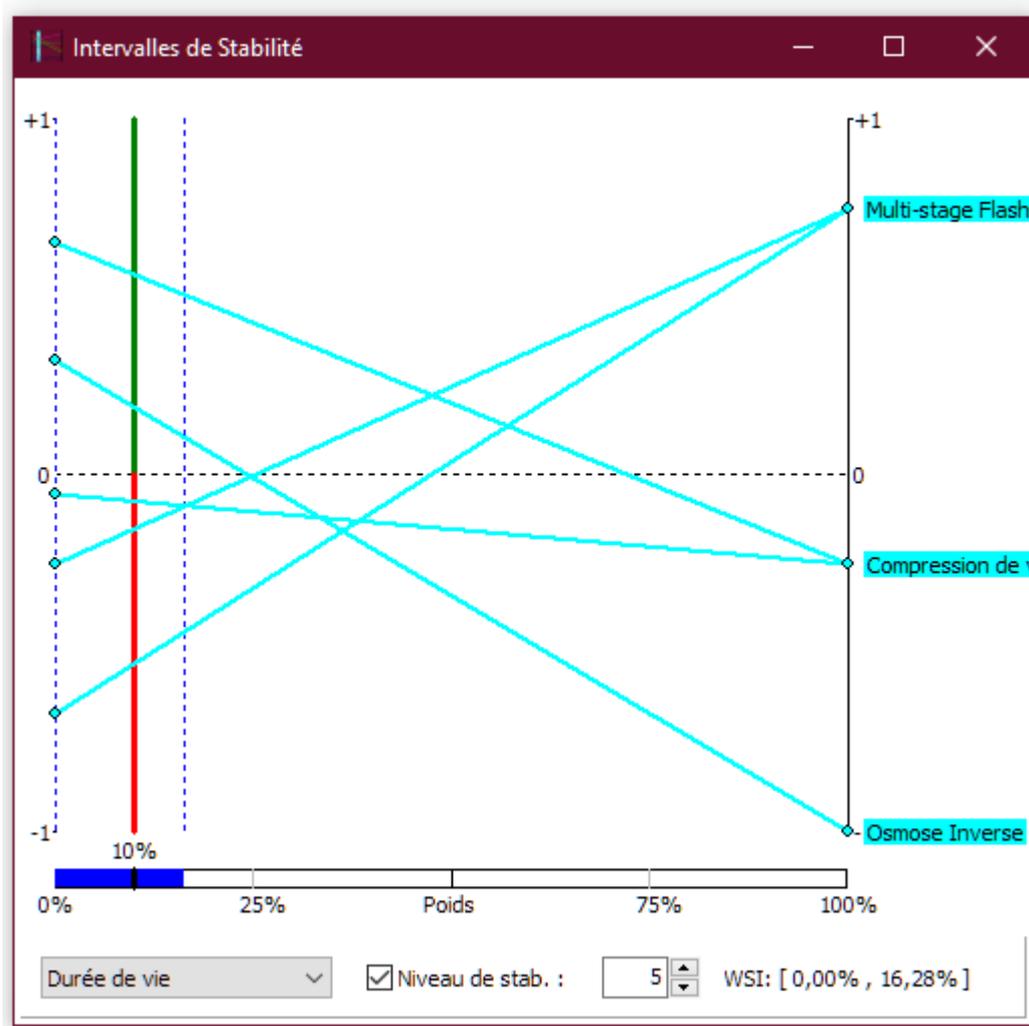
Source : Visual-Promethee 1.4.

- Le critère 1 : durée de vie de la technologie :

Le premier poids utilisé pour ce critère est : 10 %.

La figure suivante nous montre l'intervalle de stabilité pour le critère durée de vie de la technologie.

Figure 3.9.14 : fenêtre de l'intervalle de stabilité pour le critère C1.



Source : Visual-Promethee 1.4.

D'après la **(figure 3.9.14)** on constate que l'intervalle de stabilité pour le critère C1 durée de vie de la technologie est [0.00%, 16.28%]. Cet intervalle est montré dans la figure par les deux lignes de pointillées verticales en bleus.

C'est-à-dire que le poids du critère C1 doit être entre 0% et 16.28% pour garder la stabilité des résultats du PROMETHEE.

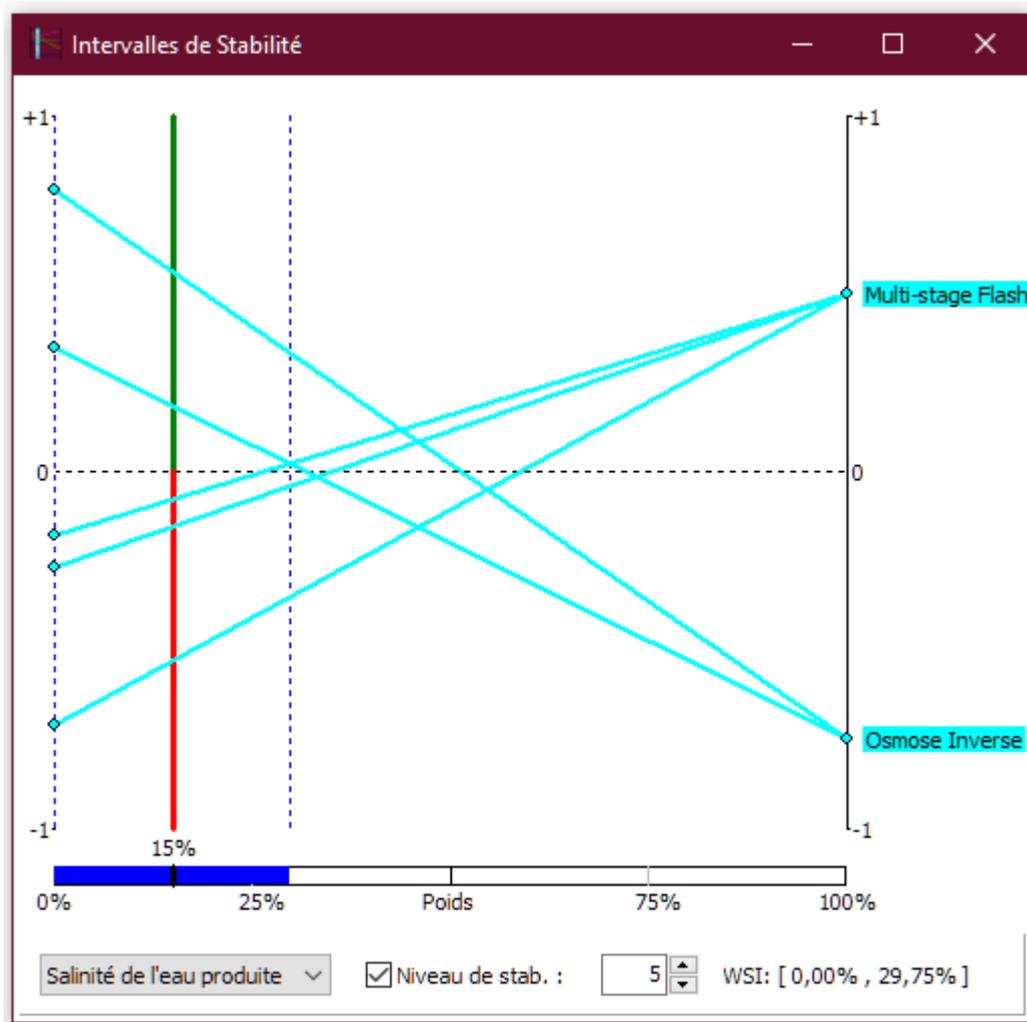
On remarque aussi que si le poids du critère C1 dépasse 16.28% la technique Multi-stage Flash (MSF) sera classée la première, ce qui nous conduit à dire que la technique (MSF) a la plus longue durée de vie.

- **Le critère 2 : salinité de l'eau produite :**

Le premier poids utilisé pour ce critère est : 15 %.

La figure suivante nous montre l'intervalle de stabilité pour le critère salinité de l'eau produite.

Figure 3.9.15: Fenêtre intervalle de stabilité pour le critère salinité de l'eau produite.



Source : Visual-Promethee 1.4.

D'après la **(figure 3.9.15)** on constate que l'intervalle de stabilité pour le critère C2 salinité de l'eau produite est [0.00%, 29.75%]. Cet intervalle est montré dans la figure par les deux lignes de pointillées verticales en bleus.

C'est-à-dire que le poids du critère C1 doit être entre 0% et 29.75% pour garder la stabilité des résultats du PROMETHEE.

On remarque aussi que si le poids du critère C 2 dépasse 29.75 % la technique Multi-stage Flash (MSF) sera classée la première, et en deuxième position la technique Osmose Inverse (RO), ce qui

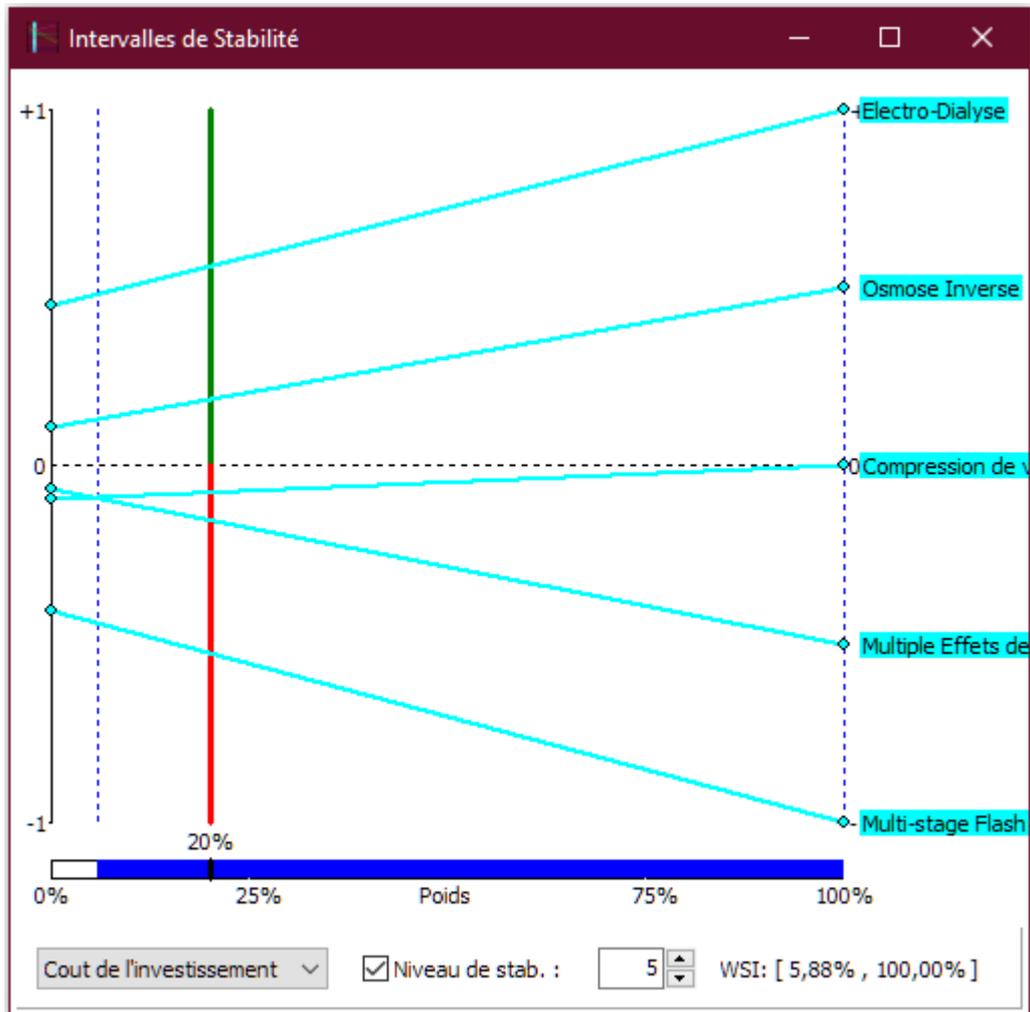
nous mène a dire que la technique (MSF) nous donne une eau moins salée que les autres techniques.

- **Le critère C3 : cout de l'investissement :**

Le premier poids utilisé pour ce critère est : 20 %.

La figure suivante nous montre l'intervalle de stabilité pour le critère cout de l'investissement.

Figure 3.9.16 : Fenêtre intervalle de stabilité pour le critère cout de l'investissement.



Source : Visual-Promethee 1.4.

D'après la **(figure 3.9.16)** on constate que l'intervalle de stabilité pour le critère C3 cout de l'investissement est [5.88%, 100 %]. Cet intervalle est montré dans la figure par les deux lignes de pointillées verticales en bleus.

C'est-à-dire que le poids du critère C3 doit être 5.88 % au minimum pour garder la stabilité des résultats du PROMETHEE.

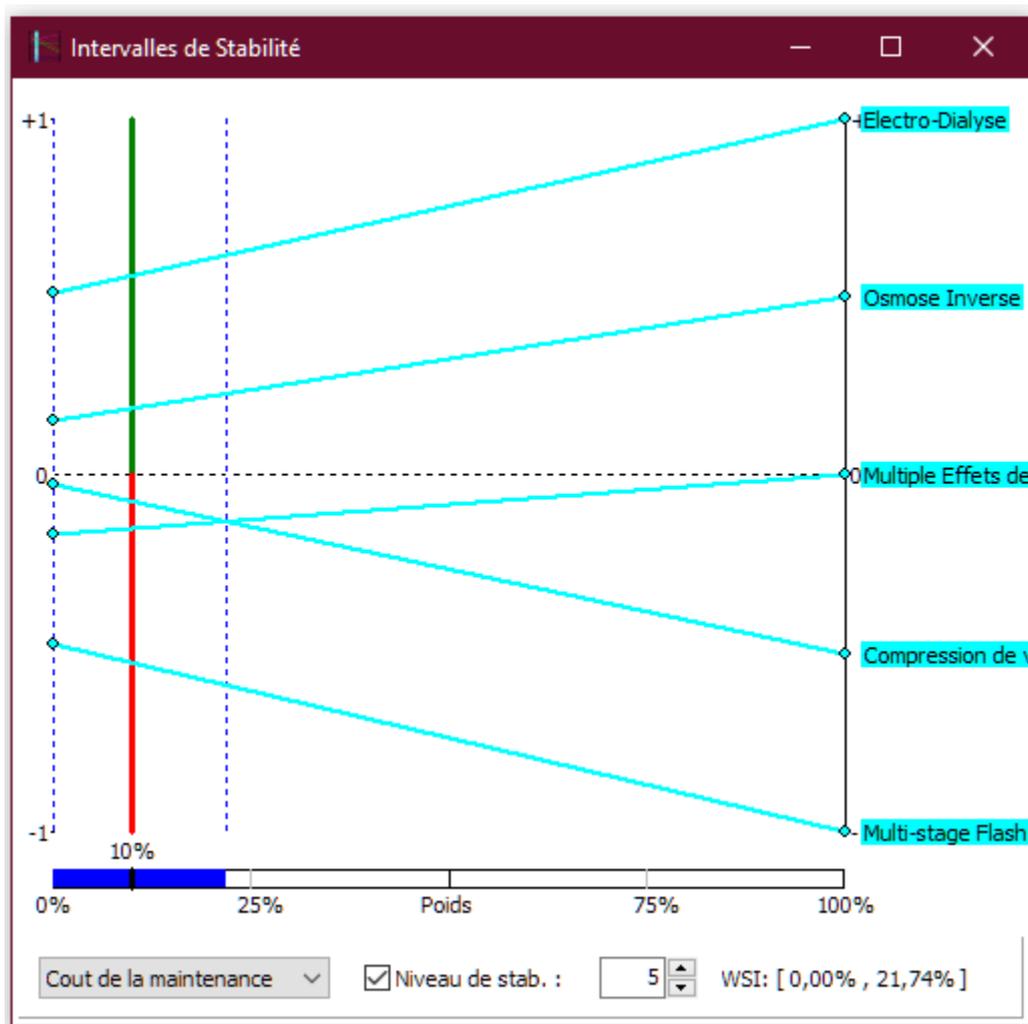
On remarque aussi que tant que le poids du critère C3 est entre 5.88% et 100% on obtiendra les mêmes premiers résultats.

- **Le critère C4 : cout de la maintenance :**

Le premier poids utilisé pour ce critère est : 10 %.

La figure suivante nous montre l'intervalle de stabilité pour le critère cout de la maintenance.

Figure 3.9.17 : Fenêtre intervalle de stabilité pour le critère cout de la maintenance.



Source : Visual-Promethee 1.4.

D'après la **(figure 3.9.17)** on constate que l'intervalle de stabilité pour le critère C4 cout de la maintenance est [0.00%, 21.74 %]. Cet intervalle est montré dans la figure par les deux lignes de pointillées verticales en bleus.

C'est-à-dire que le poids du critère C4 ne doit pas dépasser 21.74 % pour garder la stabilité des résultats du PROMETHEE.

On remarque aussi que même si le poids du critère C4 dépasse 21.74 % la technique du dessalement de l'eau de mer Electro-Dialyse (ED) gardera sa position en premier avec la technique Osmose

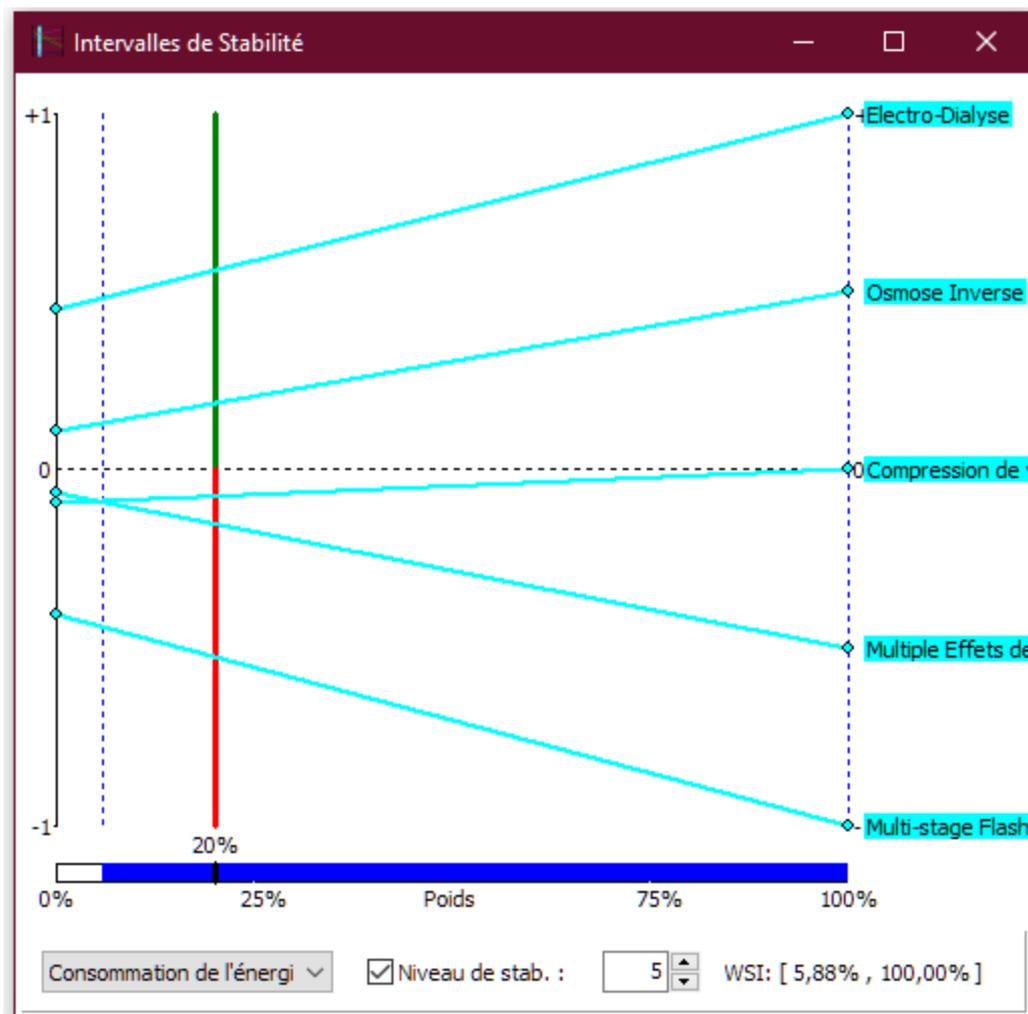
Inverse (RO), ce qui nous permet de dire que ces deux dernières techniques sont les meilleures en matière de cout de maintenance.

- **Le critère C5 : Consommation de l'Energie :**

Le premier poids utilisé pour ce critère est : 20 %.

La figure suivante nous montre l'intervalle de stabilité pour le critère consommation de l'Energie.

Figure 3.9.18 : Fenêtre intervalle de stabilité pour le critère cout de la maintenance.



Source : Visual-Promethee 1.4.

D'après la **(figure 3.9.18)** on constate que l'intervalle de stabilité pour le critère C5 consommation de l'énergie est [5.88 %, 100%]. Cet intervalle est montré dans la figure par les deux lignes de pointillées verticales en bleus.

C'est-à-dire que le poids du critère C5 doit être entre au minimum 5.88 % pour garder la stabilité des résultats du PROMETHEE.

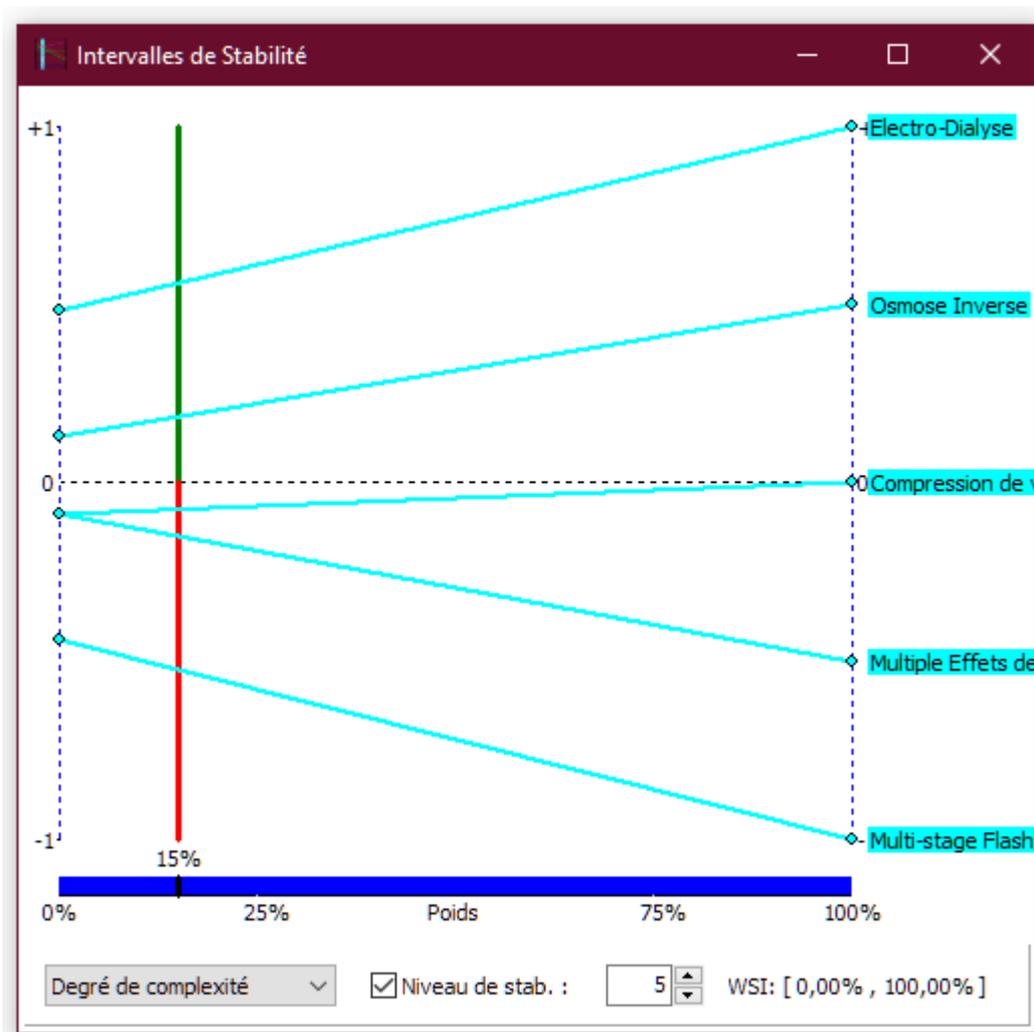
On remarque aussi que le poids du critère C5 ne doit pas être inférieur que 5.88 % , et comme ca on aura les mêmes premiers résultats, c'est a dire la technique Electro-Dialyse (ED) en première position, et ce qui nous mène a dire que la technique ED ne consomme pas trop d'énergie en comparant avec les autres

- **Le critère C6 : degré de complexité :**

Le premier poids utilisé pour ce critère est : 15 %.

La figure suivante nous montre l'intervalle de stabilité pour le critère degré de complexité.

Figure 3.9.19 : Fenêtre intervalle de stabilité pour le critère degré de complexité.



Source : Visual-Promethee 1.4.

D'après la (figure 3.9.19) on constate que l'intervalle de stabilité pour le critère C6 degré de complexité est [0.00%, 100 %]. Cet intervalle est montré dans la figure par les deux lignes de pointillées verticales en bleus.

C'est-à-dire que n'importe quel changement dans le poids du critère C6 n'aura aucun effet sur la stabilité des résultats du PROMETHEE.

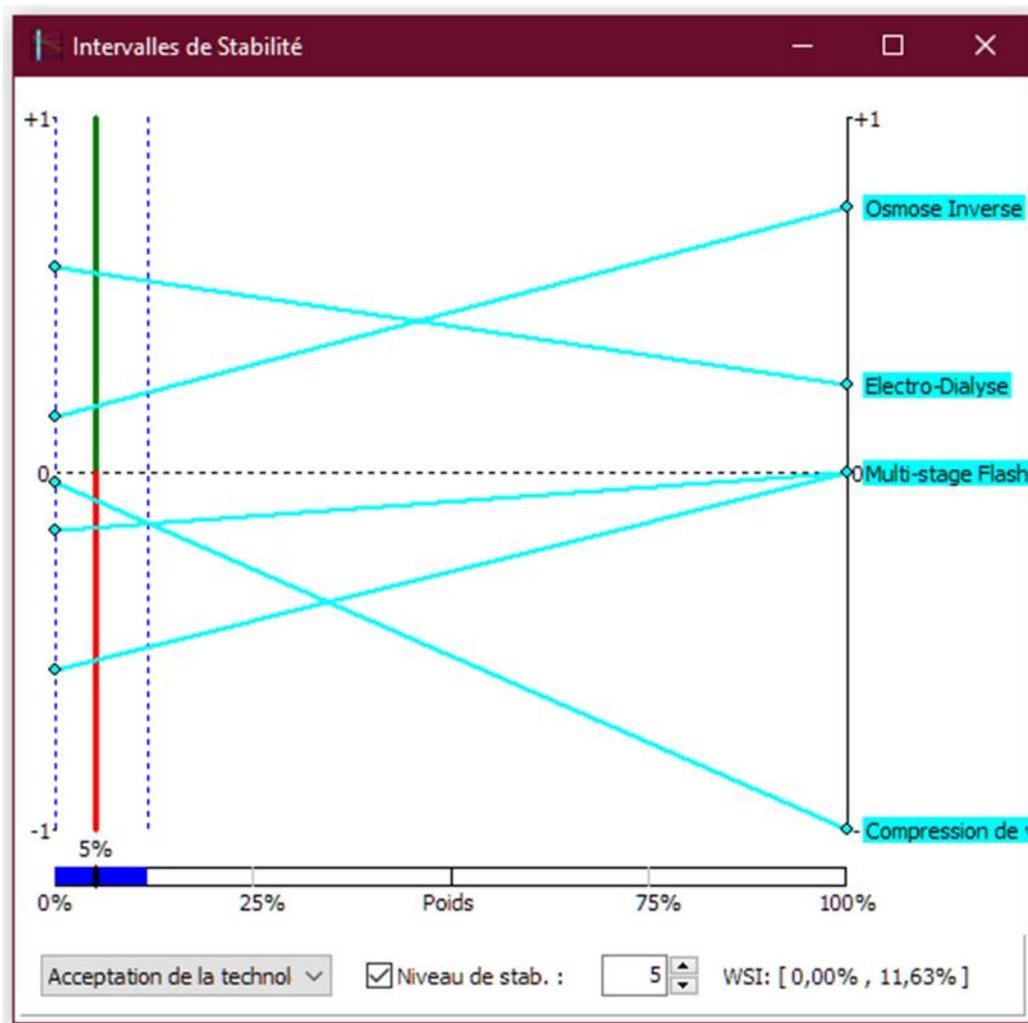
La technique (ED) occupe toujours la première position.

- **Le critère C7 : Acceptation de la technologie du dessalement :**

Le premier poids utilisé pour ce critère est : 5 %.

La figure suivante nous montre l'intervalle de stabilité pour le critère acceptation de la technologie du dessalement.

Figure 3.9.20 : Fenêtre intervalle de stabilité pour le critère acceptation de la technologie du dessalement.



Source : Visual-Promethee 1.4.

D'après la **(figure 3.9.20)** on constate que l'intervalle de stabilité pour le critère C7 acceptation de la technologie du dessalement est [0.00%, 11.63 %]. Cet intervalle est montré dans la figure par les deux lignes de pointillées verticales en bleus.

C'est-à-dire que le poids du critère C7 ne doit pas dépasser 11.63 % pour garder la stabilité des résultats du PROMETHEE.

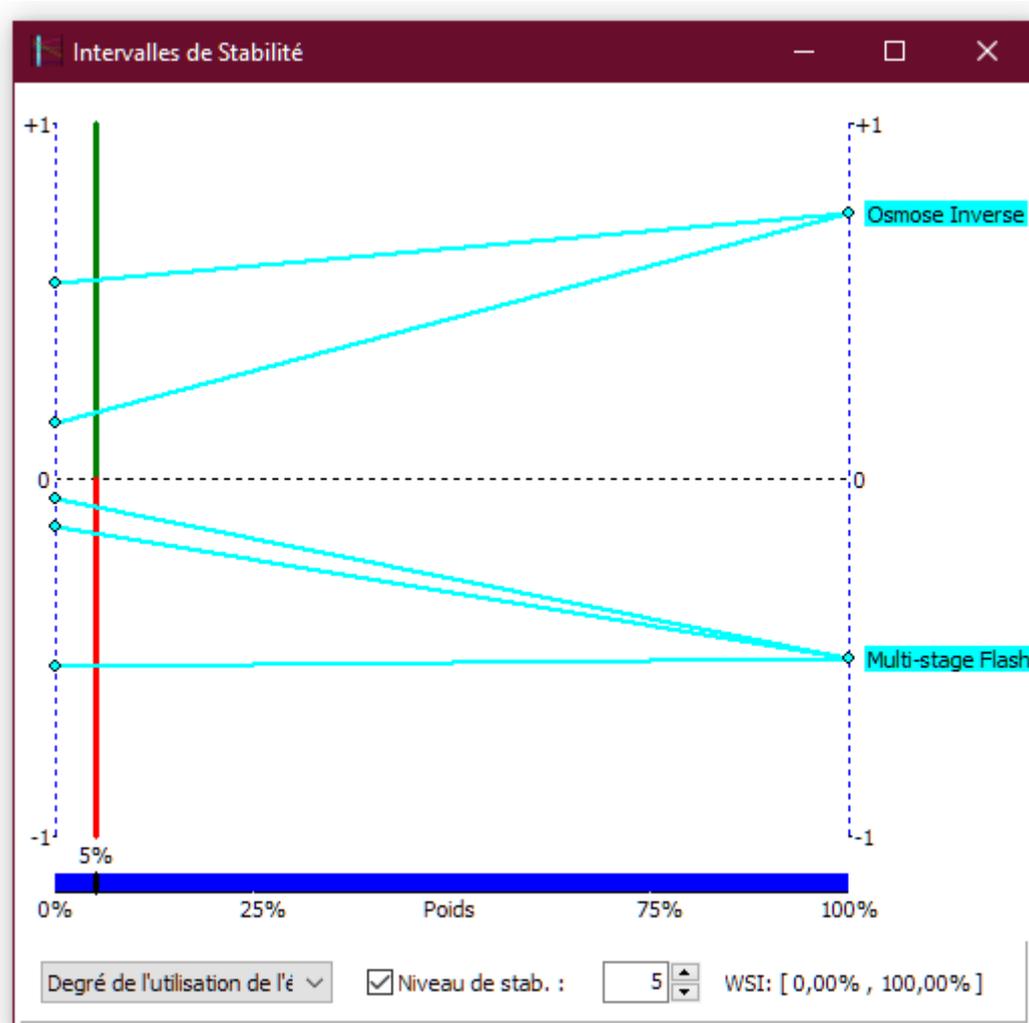
On remarque aussi que si le poids du critère C1 dépasse 11.63 % la technique Osмосe Inverse (RO) sera classée la première, ce qui nous conduit à dire que la technique (RO) est la technique la plus acceptée par les experts en dessalement de l'eau de mer.

- **Le critère C8 : Degré d'utilisation de l'Energie verte :**

Le premier poids utilisé pour ce critère est : 5 %.

La figure suivante nous montre l'intervalle de stabilité pour le critère degré de l'utilisation de l'énergie verte.

Figure 3.9.21 : Fenêtre intervalle de stabilité pour le critère degré de l'utilisation de l'Energie verte.



Source : Visual-Promethee 1.4.

D'après la **(figure 3.3.21)** on constate que l'intervalle de stabilité pour le critère C8 degré de l'utilisation de l'énergie verte est [0.00%, 100 %]. Cet intervalle est montré dans la figure par les deux lignes de pointillées verticales en bleus.

C'est-à-dire que le poids du critère C8 n'influence pas sur la stabilité des résultats du PROMETHEE.

A n'importe quel poids pour ce critère C8 la technique Osmose Inverse (RO) sera la meilleure c'est à dire la technique qui respecte le mieux l'environnement en utilisant l'énergie verte.

7. Conclusion :

Ce chapitre de notre thèse nous aura permis de pratiquer sur une étude de cas, la méthode PROMETHEE qui a été utilisée pour classer les différents procédés avec l'analyse de sensibilité avec le logiciel Visual-PROMETHEE. Nous avons cherché à identifier lequel des cinq procédés pouvait permettre d'assurer la disponibilité et la bonne qualité de l'eau dans la station de dessalement de l'eau de mer de Honaine Tlemcen et dans un contexte de durabilité.

CONCLUSION GENERALE

- 1. Conclusions.**
- 2. Perspectives.**

1. Conclusion :

En 2015 il était estimé qu'une personne sur dix n'avait pas accès à l'eau potable.¹ De plus, grâce aux modèles développés par l'Institut des Ressources Mondiales pour étudier les changements climatiques et les scénarios socio-économiques, il est prévu qu'au moins 33 pays subiraient d'extrêmes pénuries d'eau d'ici 2040. Pourtant, l'eau est une des ressources les plus présentes et inépuisables sur Terre, couvrant les trois quarts de la planète. Environ 97% de l'eau sur Terre est de l'eau salée et 3% est de l'eau douce dont une grande partie est piégée sous forme de glace au niveau des pôles. Du fait de sa nette abondance, dessaler l'eau de mer, ou les eaux saumâtres, est une solution présentant un immense attrait. C'est dans ce contexte global que s'est inscrit le travail de cette thèse.

L'Algérie dispose de ressources naturelles limitées, irrégulières et très inégalement réparties. A l'exception des eaux fossiles du Sahara, les ressources hydrauliques naturelles sont principalement situées dans le Nord du pays. 90 % de la totalité des écoulements superficiels (estimée à 12,4 milliards de m³/an) se trouvent sur la région littorale (7 % de la superficie du territoire), les 10 % restant se partagent entre les Hauts Plateaux et les bassins sahariens. La part que prend l'alimentation en eau potable est considérablement accrue en volume et en proportion. De 16 % de la consommation globale en 1975, elle est passée à 35 % actuellement. Durant la même période, la part de l'eau agricole a chuté de 80 % à 60 %, celle de l'industrie restant égale à 3,5 %. La disponibilité d'une eau de bonne qualité est un élément indispensable pour prévenir les maladies et améliorer la qualité de vie. Actuellement, la situation en Algérie se caractérise par une demande en eau croissante, alors que la qualité de l'eau se détériore.

Le gouvernement algérien, dans sa nouvelle stratégie de développement des ressources hydriques, préconise l'exploitation des ressources d'eau non conventionnelles à travers notamment le dessalement de l'eau de mer destiné à l'alimentation en eau potable et l'épuration des eaux usées utilisée dans l'irrigation. Alors cette nouvelle politique de gestion du secteur de l'eau constitue une bonne alternative pour palier à la problématique de l'eau en Algérie, il faut aussi revenir aux ressources hydriques dites conventionnelles à savoir la mobilisation des eaux superficielles et souterraines disponibles en optimisant la capacité des ouvrages d'adduction et de stockage tels que les barrages, les retenues collinaires et les transferts.

Le dessalement d'eau de mer est un programme à la fois ambitieux et stratégique pour l'Algérie. L'installation de filières de dessalement plus économes, à osmose inverse ou avec autres procédés a rendu réaliste le développement de cette voie.

L'aide à la décision est un domaine au carrefour de plusieurs disciplines incluant la théorie de la décision, les sciences politiques, la sociologie, la recherche opérationnelle, l'intelligence artificielle, les systèmes d'information, les méthodes de décision discrètes, etc. L'aide à la décision n'a pas pour but de se substituer au décideur en lui proposant une solution toute faite. Elle cherche d'abord à l'éclairer et à le guider vers des décisions qu'il aura la responsabilité de prendre.

Dans cette thèse, nous avons proposé une approche multicritère pour la sélection d'un procédé de dessalement dans un contexte de développement durable.

Nous avons ainsi structuré notre mémoire en trois parties. En premier lieu, nous avons élaboré une revue de littérature sur les notions de l'aide multicritère à la décision, les différentes méthodes multicritères, ainsi que les principales notions sur la gestion des ressources en eau principalement en Algérie. La dernière partie présentait une étude de cas.

¹ Fonds des Nations Unies pour l'enfance, Organisation Mondiale de la Santé, 2015.

PROMETHEE nous a permis de classer les procédés de dessalement dans la station de Honaine. La méthodologie proposée peut également être appliquée à tout autre problème de sélection impliquant des critères multiples et contradictoires.

Comme résultats de notre étude, les alternatives : ED (Electrodialyse) (A5), RO (Osmose inverse) (A4) et VC (Compression de vapeur) (A3) sont les meilleurs procédés à utiliser pour la station de dessalement de Honaine de Tlemcen.

Les résultats ont montré que les dimensions économiques (50 %) et techniques (25%) avaient plus de priorité que d'autres (environnementales, sociales). En outre, Coût de l'investissement (20%) et consommation de l'énergie (20%) étaient les critères les plus importants, tandis qu'Acceptation de la technologie du dessalement (5%) et Degré de l'utilisation de l'énergie verte (5 %) avaient le moins d'importance. Grâce à cette méthode, le nombre de priorité de chaque facteur efficace peut être déterminé de manière simple et précise, ce qui aide les décideurs et les gestionnaires à planifier davantage les projets de dessalement de l'eau de mer dans les stations actuels et futurs.

Ceci permet donc de conclure le travail de cette thèse qu'il est donc envisageable et pertinent de coupler une installation ED (Electrodialyse) avec une source d'énergie renouvelable, afin de maintenir le bon fonctionnement de La station de dessalement de l'eau de mer de Honaine Tlemcen.

2. Perspectives :

Enfin, nous soulignons que ce travail de recherche est un sujet très vaste. Les résultats obtenus ouvrent des perspectives scientifiques qui pourront faire l'objet de recherches futurs.

Nous ouvrons des perspectives de recherche très intéressantes sur plusieurs questions :

- Nous avons l'aspect multicritères où nous pourrions intégrer d'autres méthodes d'analyse multicritères. Des perspectives d'utilisation d'autres méthodes d'aide multicritère à la décision et un approfondissement de la méthode est aussi possible.
- Un point sensible dans les systèmes d'aide à la décision est à prendre en charge, c'est l'attribution des poids aux différents décideurs. A ce titre, il nous semble intéressant d'intégrer dans la plateforme des méthodes appropriées pour aider le coordinateur à mieux gérer cette opération.
- D'autres procédés de dessalement de l'eau de mer peuvent faire l'objet de travaux futures car dans la pratique, la manière de présenter les solutions ont un impact sur leur évaluation dans le sens où les ingénieurs vont étudier.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

BIBLIOGRAPHIE

1. [Abdelkader Adla. 2010] « Aide à la Facilitation pour une prise de Décision Collective : Proposition d'un Modèle et d'un Outil. ». Université Paul Sabatier - Toulouse III.
2. [A. Kettab,2001] « Les ressources en eau en Algérie : stratégies, enjeux et vision », In Elsevier Science Desalination, (2001) 25-33, Alger, Algérie.
3. [Albert Lukuitshi. 2003] « Application d'ELECTRE TRI et PROMETHEE comme méthodologie multicritère ».
4. [Abdellaoui. M et Gonzales. 2013] « Théorie de l'utilité multi-attributs ». CNRS, GRID-ENSAM, université Paris 6.
5. [Azondékon, H.S. and Martel, J.M. 1999] « Value of additional information in multicriterion analysis under uncertainty. » European Journal of Opérationnel Research, 117, 45-62.
6. [AYADI. D et al 2010] « Application de la méthode multicritère d'aide à la décision PROMETHEE pour le système HACCP », International Metrology Conference CAFMET.
7. [Ayadi. D. 2012] « OPTIMISATION MULTICRITERE DE LA FIABILITE : APPLICATION DU MODELE DE GOAL PROGRAMMING AVEC LES FONCTIONS DE SATISFACTIONS DANS L'INDUSTRIE DE TRAITEMENT DE GAZ. », THESE DE DOCTORAT, UNIVERSITE d'ANGERS et UNIVERSITE DE SFAX.
8. [A. Guitouni M et al, 2010] « Cadre méthodologique pour différencier les méthodes multicritères » Université Laval. Canada.
9. [A. BENABADJI. I. SAIDI.2016] « Etude sur le Dessalement de l'Eau Saumâtre préparée à partir des Eaux de Mer issues du prétraitement de la station de Souk-Tlata. » Master en : Technologies de Traitement des eaux Université de Tlemcen.
10. [Ahmed Kerfouf.2012] « Les techniques de dessalement d'eau de mer : quel impact sur l'environnement ? » Journées internationales ' Dragages, produits de dragages et développement durable ', Hammamet, Tunisie.
11. [AHMOUDA Iman et al.2016] « Traitement des rejets de dessalement de l'eau de mer "Les Dunes" Oran ». Master en Génie minier. UNIVERSITE LARBI TEBSSI-TEBESSA.
12. [B. FATOUMATA,2009] « Analyse multicritère pour la priorisation des interventions en matière d'approvisionnement en eau en milieu rural au Sénégal : Cas de la région de Diourbel ». Mémoire de maîtrise en science. Sciences et génie civil, université LAVAL QUÉBEC.
13. [Benyahia M, Kerfouf A., Abdelhakk K, & Moueddene K.2006] « Enjeux, stratégies et perspectives de la gestion des ressources en eau Oranie (Algérie Nord –Occidentale) ».
14. [Bernard Roy, 1985] « Méthodologie multicritère d'aide à la décision », Economica, Paris.
15. [BELARIBI F.Z. 2009] « Les outils d'aide à la décision » Mémoire de magister en sciences économiques, Université de Tlemcen.

BIBLIOGRAPHIE

16. [BRANS, VINCKE, & MARESCHAL, 1986] « How to select and how to rank projects: The method. » European Journal of Operational Research, 1986, vol. 24, issue 2, 228-238.
17. [Brans J.P, 1982] « Elaboration d'instruments d'aide à la décision : méthode PROMETHEE » Université Laval, Québec.
18. [BOUZIANI Mustapha.2006] « Lexique de l'eau en santé publique », Édition Dar El Gharb, Algérie, P 40.
19. [B. Mouhouche.2011] « Maîtrise de la pratique de l'agriculture comme palliatif au manque d'eau en Algérie », 9ème Conférence Internationale « EURO-RIOB 2011 » sur l'application actuelle et future de la Directive - Cadre Européenne sur l'Eau, Porto, Portugal, 27–30 Septembre 2011.
20. [Brahim MOUHOUCHE] « Les problèmes du manque d'eau et l'agriculture algérienne » Laboratoire de Maitrise de l'Eau en Agriculture ENSA ex [NA, El-Harrach, 16200 Alger.
21. [B. CHENAOUI.2010] « Dessalement de l'eau de mer à la station de MAINIS et son impact sur l'environnement. » Séminaire Ouargla. Université de Chlef.
22. [BOYE H. 2008] « Eau, énergie dessalement et changement climatique en méditerrané » Plan bleu centre d'activité régional, conseil général du l'environnement et du développement durable.
23. [Brans. 1992] « How to discrimante hard and soft multicriteria problems in the discrate case: the PROMETHEE VI procedure ».
24. [BOUBEKEUR.R. 2017] « Analyse multicritère d'aide à la décision. », Master en Informatique, UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS – MOSTAGANEM.
25. [BESSENASSE M., 2006] « Dessalement d'eau de mer de trois stations du littoral Algérois. » 14th International Soil Conservation Organization Conference. Water Management and Soil conservation in Semi-Arid Environment. Marrakech, Morocco, May 14-19, 2006 (ISCO), p 80.
26. [Denis Bouyssou] « Science de décision ou aide à la décision ».
27. [D. Bouyssou Th. Marchant P. Perny.2005] « Théorie du choix social et aide multicritère `a la décision » LAMSADE, Université Paris Dauphine.
28. [D. Diakoulaki. 1999] « ranking of alternative actions: extension of the PROMETHEE method. » , European journal operational research.
29. [D. Birkett 2012] « The History of Desalination Before Large-Scale Use in Desalination and Water Resources » History, Development and Management of Water Resources, Vol I. Paris. I (Encyclopedia of life support systems).
30. [DUNGLAS J. 2014] « Le dessalement de l'eau de mer, une nouvelle méthode pour accroître la ressource en eau. » Groupe eau. Académie d'agriculture de France.

BIBLIOGRAPHIE

31. [Department for Communities and Local Government.2009] « Multi-criteria analysis: a manual. » London.
32. [E.K. GABLA,2016] « LA SÉLECTION DE PROJET DANS UN CONTEXTE DE DÉVELOPPEMENT DURABLE EN PRÉSENCE D'INCERTITUDE », Diplôme de maître en sciences en gestion de projet, Université du Québec à Rimouski.
33. [Ginting R, 2000] « Intégration du système d'aide à la décision multicritères et du système d'intelligence économique dans l'ère concurrentielle »Thèse de Doctorat, l'Université de droit et des sciences d'Aix-Marseille.
34. [Gueddouj , Ouaret .2002] « Optimisation multicritère pour la gestion d'un réseau d'AEP » , Université de Bejaia.
35. [Guitouni.A et al ,2010] « Cadre méthodologique pour différencier les méthodes multicritères, » Rapport technique, Université Laval, Canada.
36. [Hammami. A. 2003] « Modélisation technico-économique d'une chaîne logistique dans une entreprise réseau », Thèse de doctorat, l'école national supérieure des mines de Saint Etienne.
37. [Hakim SEFIANE, Olivier SENECHAL.2007] « Application du multicritère pour l'aide à la décision en maintenance. », Université de Valenciennes et du Hainaut Cambresis, France. CPI'2007 – Rabat, Maroc.
38. [HAMOUNI, 2008] « Etude des prétraitements en osmose inverse pour une eau de mer [ressource textuelle, sauf manuscrits] : cas de la station de dessalement de Corso (Alger, Est). » Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene. Alger.
39. [Harrison E. Mutikanga & Saroj K. Sharma & Kalanithy Vairavamoorthy.2011] « Multi-criteria Decision Analysis: A Strategic Planning Tool for Water Loss Management. »Water Resour Manage, Water Resour Manage, volume 25, pp.3947–3969.
40. [Institut Supérieur de Commerce et de Comptabilité de BIZERTE.2009] « Chapitre III : Les Méthodes de Décision Multicritères. Multi-Criterias Decision Making “MCDM” » Université 7 Novembre à Tunis Carthage.
41. [Jean Marc Martel.1999] « l'aide multicritère à la décision : méthodes et applications. », Faculté des sciences de l'administration, Université LAVAL, CANADA, 1999.
42. [Jeong-hwa AN. 2011] « Le choix d'un système de transport durable : analyse comparative des systèmes de transport guidé de surface. » Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est.
43. [Jean-Baptiste Rakotoarivelo. 2018] « Aide à la décision multi-critère pour la gestion des risques dans le domaine financier. » Université Paul Sabatier - Toulouse III.
44. [Jean Dunglas.2014] « Le dessalement de l'eau de mer Une nouvelle méthode pour accroître la ressource en eau. » l'Académie d'agriculture de France. Groupe Eau. Notes de travail n° 4.
45. [Lakhdar Zella .2007] « L'eau pénurie ou incurie ».

BIBLIOGRAPHIE

46. [LATRECH.A.2017] « Intégration de l'approche Multicritère dans la gestion de la coopération d'un groupe d'experts en télémaintenance. », Master en Informatique, UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS – MOSTAGANEM.
47. [Le Partenariat mondial de l'eau (GWP).2009] « MANUEL DE GESTION INTÉGRÉE DES RESSOURCES EN EAU PAR BASSIN ».
48. [MATE.2011] « Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement ». Plan National d'Actions pour l'Environnement et le Développement Durable (PNAE-DD).
49. [MEBARKI A. 2009] « Ressources en eau et aménagement en Algérie 'Les bassins hydrographiques de l'Est ».
50. [Michael. D et Constantin. Z. 2004] « Multi-criteria Decision Aid Classification Methods », Kluwer Academic Publishers, USA.
51. [MOHAMED MOUINE,2011] « COMBINAISON DE DEUX MÉTHODES D'ANALYSE DE SENSIBILITÉ », FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC.
52. [Mohamed Mammeri,2013] « Une approche d'aide multicritère à la décision pour l'évaluation du confort dans les trains : construction d'un modèle d'évaluation. ». Université Paris Dauphine.
53. [MÉNDEZ.M et al. 2006] « Multiple-Objective Genetic Algorithm Using The Multiple Criteria Decision Making Method TOPSIS», MOPGP'06: 7th Int. Conf. on Multi-Objective Programming and Goal Programming.
54. [Mohanrao,I.P. 2014] « Selection and Evaluation of Potential Storm water arvesting Sites in Urban Areas. » College of Engineering and Science, Victoria University.
55. [MAUREL A.2006] « Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres. 2nd Edition Lavoisier.
56. [N. BOUBOU.2015] « Eau, environnement et énergies renouvelables : vers une gestion intégrée de l'eau en Algérie. » UNIVERSITÉ ABOU BEKR BELKAID –TLEMCEM.
57. [Olivier TSHIBAMBA,2005] « La problématique de la gestion intégrée des ressources en eau en République Démocratique du Congo : Analyse et stratégies ». Université de Kinshasa.
58. [OTHMANI. I. 1998] « Optimisation multicritère : fondements et concepts. Modélisation et simulation. » Université Joseph-Fourier – Grenoble. France.
59. [Omann ,I.2004] « Multi-criteria decision aid as an approach for sustainable development analysis and implementation. » These de doctorat, Universite de Karl-Franzens.
60. [P. BANDELIER .2017] « Le dessalement d'eau de mer et des eaux saumâtres » Article : 121.Encyclopedie de l'Energie.

BIBLIOGRAPHIE

61. [PATIER & BLANCHON, 2010] « Documentation photographiques. 8078. L'Eau, une ressource menacée ? » La documentation Française. Paris.
62. [PLAN D'ACTION POUR LA MÉDITERRANÉE, 2001] « DESSALEMENT DE L'EAU DE MER DANS LES PAYS MÉDITERRANÉENS : ÉVALUATION DES IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT ET LIGNES DIRECTRICES PROPOSÉES POUR LA GESTION DE LA SAUMURE ».
63. [P. Vivekh, M. Sudhakar, M. Srinivas* and V. Vishwanthkumar.2015]«Desalination technology selection using multi-criteria evaluation: TOPSIS and PROMETHEE -2. »International Journal of Low-Carbon Technologies Advance.
64. [I. P. Mohanrao, 2014] « Selection and Evaluation of Potential Stormwater arvesting Sites in Urban Areas. » College of Engineering and Science, Victoria University.
65. [Tsoukia ,2003] « De la théorie de la décision à l'aide à la décision. » LAMSADE. Université Paris Dauphine.
66. [Taibi B. 2010] « L'analyse Multicritère comme outil d'aide à la décision : Application de la méthode PROMETHEE Etude de cas : l'entreprise SEROR », Thèse de magister, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen.
67. [TAHRAOUI.D .2010] « Qualité des eaux de mer après dessalement au niveau de la station de dessalement de la ville de Ténès (Chlef) et l'impact de dessalement sur l'environnement (milieu aquatique). » WATMED5, Lille-France.
68. [TERRA MESSAOUD, 2006] « Le secteur de l'eau en Algérie » Directeur de l'Alimentation en Eau Potable – MRE.
69. [THOREL, M. 2014] « Aide à la décision multicritère pour la prescription de scénarios d'amélioration énergétique via une approche globale », Thèse de doctorat, Université de GRONBLE, France.
70. [Vincent PORTIGLIATTI. 2003] « Contribution à l'allocation dynamique de ressources pour les composants expressifs dans les systèmes répartis » Thèse de doctorat de l'université de Franche-Comté.
71. [Vaidya O.S and Kumar S. 2006] « Analytic Hierarchy Process: An Overview of Applications. European Journal of Operational Research, 169. 1-29.
72. [VOOGD H ,1983] «Multicriteria Evaluation for Urban and Regional Planning», Pion Ltd, London.
73. [Viviane Renaudin.2003] « Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres. »
74. [Philippe Vincke.1989] « L'aide multicritère à la décision », Editions Ellipses, Bruxelles.
75. [Philippe Lenca.2004] « Aide multicritère à la décision : méthodes de sur-classement ». GET/ENST Bretagne.

BIBLIOGRAPHIE

76. **[Plan bleu.2006]** « Les notes du plan bleu (N°4 2006) faire face aux crises et pénuries d'eau en Méditerranée ».
77. **[Partenariat mondial pour l'eau Comité technique consultatif (TAC).2000]** « La gestion intégrée des ressources en eau. » TAC BACKGROUND PAPERS NO. 4
78. **[Raju et al. 2000]** « Multicriterion Analysis for Sustainable Water Resources Planning: A Case Study in Spain. » *Water Resources Management*, 14, 435–456.
79. **[Remini. B. 2005]**« La problématique de l'eau en Algérie ».
80. **[Renaud Caillet]** « Analyse multicritère : étude et comparaison des méthodes existantes en vue d'une application en analyse de cycle de vie. » Centre interuniversitaire de recherche et analyse des organisations CIRANO, Montréal.
81. **[Roy B. 1985]** « Méthodologie Multicritère d'Aide à la Décision. » Economica, Paris.
82. **[Roy B., Bouyssou D., 1993]** « Aide multicritère à la décision : méthodes et cas »Economica, Paris.
83. **[Roy. B. and Vanderpotten. D, The European School of MCDA.1996]** « Emergence, Basic Features and Current Works. » *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* 5, 22-38.
84. **[RAKOTOARIVELO Jean Baptiste.2015]** « ANALYSE COMPARATIVE DE METHODES MULTICRITERES D'AIDE A LA DECISION POUR LE SECTEUR FINANCIER. », Rapport de recherche, UNIVERSITE PAUL SABATIER DE TOULOUSE.
85. **[Roy.B et al. 1993]** « Méthodes multicritères ELECTRE : description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale. », Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
86. **[Sami Ben Mena]** « méthodes multicritères d'aide à la décision : bases méthodologiques et méthodes de surclassement ».
87. **[Sami Ben Mena.2000]** « Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision » ; Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux.
88. **[Salomon, J. 2012]** « Le dessalement de l'eau de mer est-il une voie d'avenir ? » *Revue de Geografia e Ordenamento de Território*, n. ° 1 (Junho). Centre de Estudos de Geografia et Ordenamento do Território.
89. **[A. Schärli.1985]** « Décider sur plusieurs critères : panorama de l'aide à la décision multicritère », Presse polytechniques et universitaires romandes, Suisse.
90. **[A. Scharli. 1996]** « Pratiquer Electre et Prométhée. » Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne.

BIBLIOGRAPHIE

91. [M. Seddiki, 2016] « Aide à la décision multicritère pour la rénovation thermique des bâtiments en maçonnerie : Cas de l'Algérie. », Thèse de doctorat, Université des sciences et de technologie, Oran.
92. [V. Clivillé, L. Berrah, 2006] « Une approche multicritère pour l'aide à la sélection de portefeuilles de projets ». 6e Conférence Francophone de MODélisation et SIMulation - MOSIM'06.
93. [Vincke, 1989] « L'aide multicritère à la décision. » Éditions de l'Université de Bruxelles, Paris, Éditions Ellipses.
94. [Saaty, T. L. 1980] « The Analytic Hierarchy Process. » New York.
95. [Scharlig, A. 1996] « Pratiquer Electre et Prométhée. » Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1996.
96. [Scharlig, A. 1985] « Décider sur Plusieurs Critères : Panorama de l'Aide à la Décision Multicritère » Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne.
97. [Vaidya, O.S. and Kumar, S. 2006] « Analytic Hierarchy Process: An Overview of Applications » European Journal of Operational Research, 169. 1-29.
98. [Roy B., Bouyssou D. 1993] « Aide multicritère à la décision : méthodes et cas », Paris : Editions Economica.
99. [VOOGD H, 1983] « Multicriteria Evaluation for Urban and Regional Planning », Pion Ltd, London. 1983.
100. [V. Renaudin et Al] « Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres. » Université Henri Poincaré et LSGC (Laboratoire des Sciences du Génie Chimique), CNRS, Nancy.
101. [M. MOUINE, 2011] « COMBINAISON DE DEUX MÉTHODES D'ANALYSE DE SENSIBILITÉ » FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC.
102. [P. Mohanrao , 2014] « Selection and Evaluation of Potential Stormwater diverting Sites in Urban Areas » College of Engineering and Science, Victoria University.
103. [Schärli, 1985] « Décider sur plusieurs critères : panorama de l'aide à la décision multicritère », Presse polytechniques et universitaires romandes, Suisse.

Webographie

1. ec.europa.eu/europeaid/evaluation/methodology/examples/too_cri_res_fr.pdf.
2. <http://www.promethee-gaia.net/faq-pro>.
3. https://www.actuenvironnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/dessalement.php.
4. <http://www.lenntech.fr>.
5. <http://udes.cder.dz/dessalement.php>.
6. <http://maghrebinfo.20minutes-blogs.fr/archive/2008/07/07/l-algerie-investit-gros-dans-le-dessalement-de-l-eau-de-mer.html>.
7. Eau : L'Algérie met le paquet, <http://www.winrak.com/eau-l-algerie-met-le-paquet.html>.
8. L'Algérie investit gros dans le dessalement de l'eau de mer, <http://maghrebinfo.20minutes-blogs.fr/archive/2008/07/07/l-algerie-investit-gros-dans-le-dessalement-de-l-eau-de-mer.html>.
9. www.clemspreims.free.fr.
10. www.fondation-lamap.org.
11. <http://decoupageadministratifalgerie.blogspot.com/2014/10/cartegeographiqueTLEMEN.html>.
12. <https://www.promethee-gaia.net/academic-edition.html>.

ANNEXES 01 : Exemple sur la méthode PROMETHEE

1. Présentation du problème :

Dans l'étude de notre problème, En effet cinq offres possibles ont été recensées ; ainsi les différentes marques automobiles requises pour la présente étude sont considérées comme les actions, d'une part :¹

Action 1 : Renault (France).

Action 2 : Fiat (Italie).

Action 3 : Mercedes (Allemagne).

Action 4 : Volvo (Suède).

Action 5 : Toyota (Japon).

D'autre part, cinq critères d'évaluation sont pris en considération avec leurs poids respectifs :

C1 : prix.

C2 : Puissance.

C3 : consommation.

C4 : habitabilité.

C5 : le confort.

Dans le cas concret proposé, les fonctions de préférence devront être choisies de façon à maximiser les critères C2, C4, C5, et minimiser les critères C1 et C3.

Les poids : on donne pour chaque critère un poids reformuler dans le tableau suivant :

Table 5.1 – poids des critères

critère	poids
prix	5
Puissance	3
consommation	4
habitabilité	2
confort	2

Pour les calculs de fonction de préférence on doit donner un type pour chaque critère comme suivante :

Type de fonction de préférence : les critères prix, consommation, le confort : A paliers

Le critère Puissance, habitabilité : Linéaire

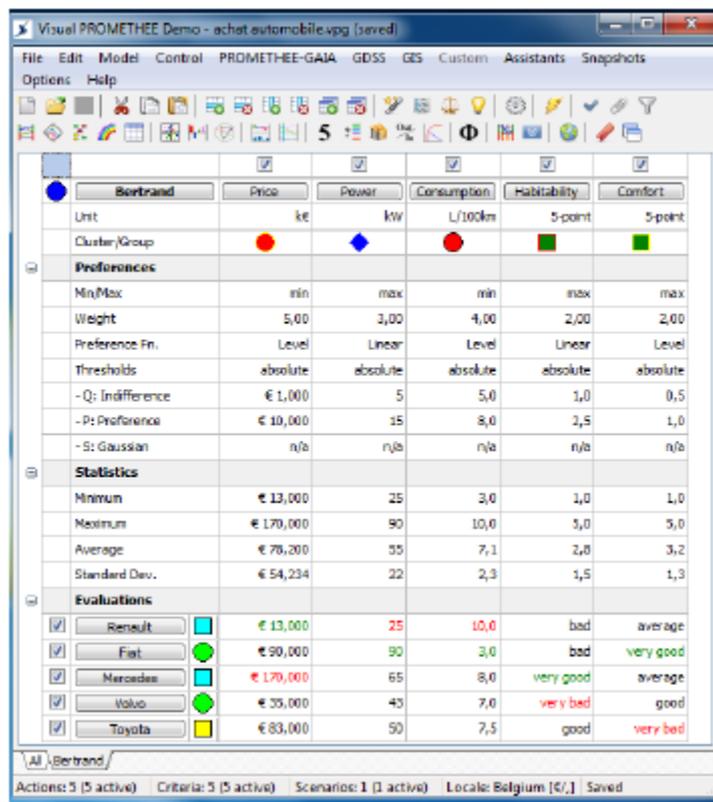
Le tableau suivant présente les valeurs du seuil de préférence, seuil d'indifférence : les critères qualitatives et quantitatifs :il y a de catégorie : quantitatifs est prix, Puissance et consommation qualitatives est habitabilité, confort (very good=5, good=4, average=3, bad=2, very Bad=1) la figure représente notre travail (l'exemple d'achat d'une automobile) avec le logiciel Visual PROMETHEE comme suivant :

¹ [Chetouane H et Ghalmi H.2019] « Sur Les Méthodes Multicritère D'aide à La Décision. » Master en Informatique Spécialité : Génie Logiciel et Systèmes Distribués. Université Djilali Bounaâma-Khemis Miliana.

Table 5.2 : Seuil de préférence, seuil d'indifférence

	seuil de indif- férence Q	seuil de préfé- rence P
prix	1.000	10.000
Puissance	5	15
consommation	5	8
habitabilité	1	2.5
confort	0.5	1

Figure 5.1 – l'interface de Visual PROMETHEE



3.2 Analyse des résultats avec Visual PROMETHEE

3.2.1 Les flux de surclassement :

Figure 5.2 – Flux de préférences globales

Rank	Car	Phi	Phi+	Phi-
1	Fiat	0,1745	0,4219	0,2474
2	Volvo	0,1000	0,3750	0,2750
3	Renault	0,0104	0,3438	0,3333
4	Toyota	-0,1286	0,2464	0,3750
5	Mercedes	-0,1563	0,2656	0,4219

3.2.2 Classement PROMETHEE :

Il existe deux classements PROMETHEE calculés :

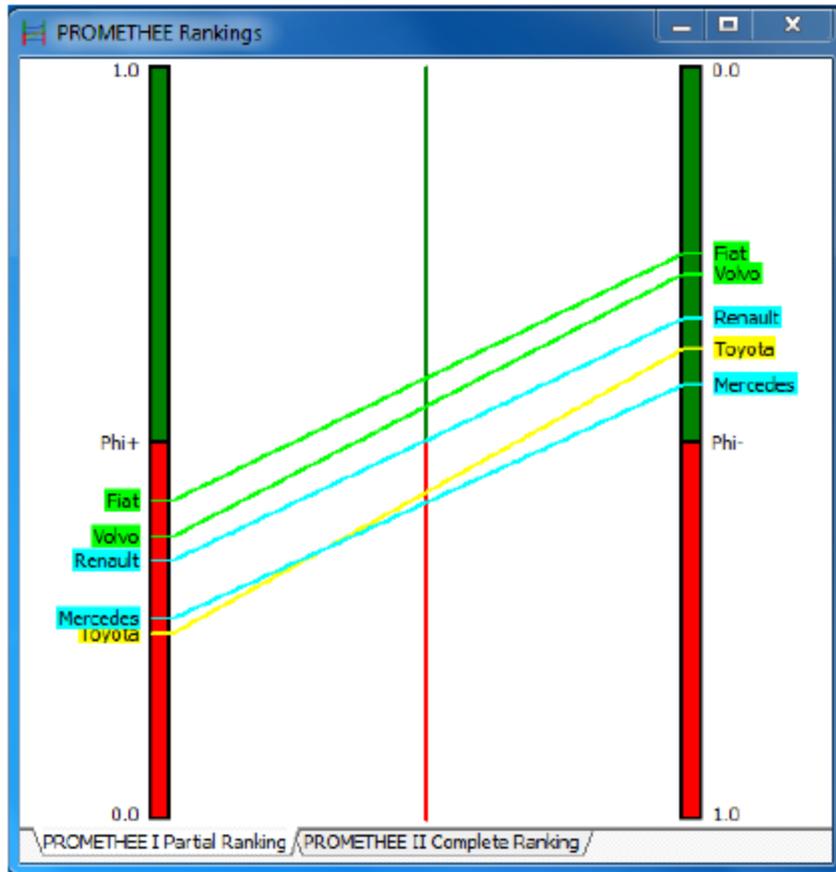
- Le classement partiel PROMETHEE I est basé sur le calcul de deux flux de préférences (Phi + et Phi-). Cela permet une incomparabilité entre les actions lorsque les flux de préférence Phi + et Phi- donnent des classements contradictoires.
- Le classement complet de PROMETHEE II est basé sur le flux de préférences nettes (Phi).

La figure [5.2] représente les flux de préférence globale du critère, on peut remarquer que les actions Volvo et Renault sont situées en milieu du classement, tandis que les actions Fiat et Mercedes sont concentrées dans le bas du classement, l'action Toyota se situe au dernier classement. Cette répartition est bien entendu liée à la pondération retenue pour les critères.

3.2.2.1 Classement des actions PROMETHEE I :

Sur l'onglet PROMETHEE I Classement partiel figure [5.3], la barre la plus à gauche indique le classement des actions. Selon Phi + : le Fiat est en tête, suivi du Volvo, de Renault, du Mercedes, et Toyota en dernier. La barre la plus à droite indique le classement selon Phi- : Fiat est toujours en tête, suivi du Volvo, de Renault, du Toyota, dans sa fois Mercedes au dernier.

Figure 5.3 – PROMETHEE I classement

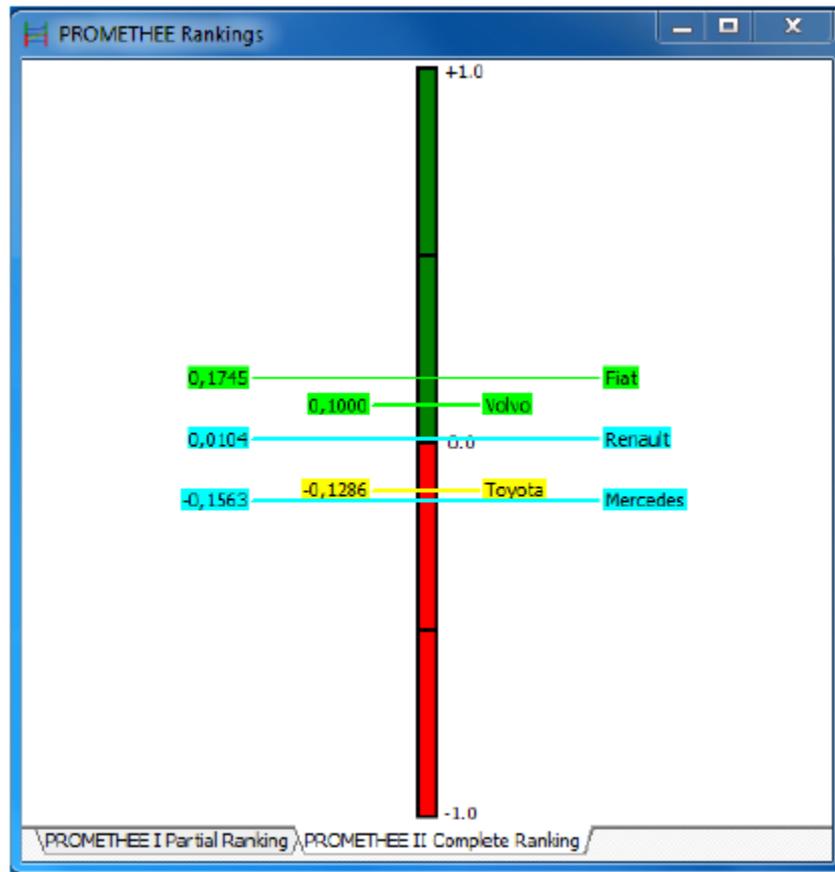


3.2.2.2 Classement des actions PROMETHEE II

La figure [5.4] présente un rangement complet de PROMETHEE II pour les différentes marques automobiles(action)

- * la voiture Fiat classer on première position parce que la valeur de phi net et max.
- * la voiture Volvo et Renault classer après Fiat, donne une valeur faible de phi net proche de zéro.
- *les voitures Toyota, Mercedes donne des valeurs négative donc le mois faible dans PROMETHEE II.

Figure 5.4 – PROMETHEE II classement



3.2.3 Plan GAIA :

La figure (5.5) montre le plan GAIA pour la démonstration Visual PROMETHEE. Dans ce cas, la quantité de les informations contenues dans le plan sont égales a 99 % (comme indique dans la fenêtre GAIA dans Visual PROMETHEE).

Les actions : sont représentées par des points :

Les actions tres différentes les unes des autres apparaissent tres éloignées les unes des autres dans le plan GAIA. Il est le cas pour les voitures Fiat et de Toyota.

Les actions similaires apparaissent proches les unes des autres dans le plan GAIA. Au-dessus photo, c'est le cas des deux voitures de Renault et Volvo .

Les critères : sont représentés par des axes dessinés du centre du plan.

Nous avons les propriétés suivantes :

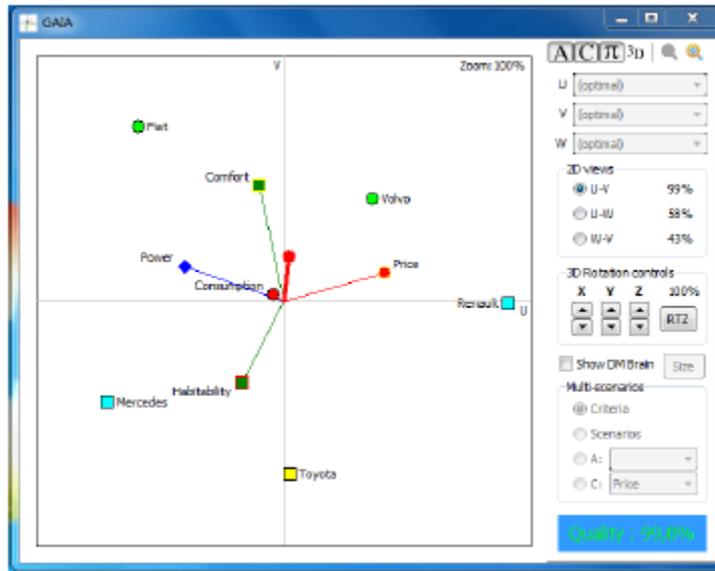
Les critères exprimant des préférences similaires sont représentés par des axes orientés dans des directions similaires. C'est le cas par exemple power et de confort.

Les critères exprimant des préférences opposées sont représentés par des axes orientés de manière opposée.

Directions : C'est le cas par exemple d'habitabilité et prix.

La longueur d'un axe critère est représentative de son pouvoir discriminant relatif : plus l'axe est long plus discriminant le critère.

Figure 5.4 – Le plan GAIA



2. Conclusion :

L'objectif des méthodes d'analyse multicritère PROMETHEE est de construire via un système de préférences floues, un classement des actions des meilleures aux moins bonnes ; ce classement étant un préordre partiel (préférence stricte, indifférence et incomparabilité) pour PROMETHEE I, et un préordre complet (indifférence et préférence stricte) pour PROMETHEE II.